

Indice

Capítulo 1

CONSIDERACIONES GENERALES 1

1.	Alcance	2
2.	Limitaciones	2
3.	Responsabilidad	3
4.	Materiales especiales	3
5.	Especificaciones	3
6.	Dirección de la obra	3
7.	Personal	4
8.	Equipo	4
9.	Supervisión e inspección	4
10.	Muestreo y ensayo de los materiales	5
11.	Normas	6

Capítulo 2

NATURALEZA DEL CONCRETO 7

1.	Definición del concreto	8
2.	Importancia del concreto	8
3.	Requisitos de las mezclas	8
4.	Composición del concreto	9
5.	La pasta	9
6.	El gel	10
7.	Hidratación y curado del concreto	12
8.	Porosidad de la pasta	12

9.	El agregado	16
10.	Capacidad de retención del agua en los poros	19
11.	Naturaleza química de la pasta	20
12.	Naturaleza química del agregado	21
13.	Propiedades del concreto	22
14.	Importancia de la selección de los materiales	22
15.	Importancia de la dosificación de las mezclas	23
16.	Importancia de la preparación	24
17.	Importancia del control	24
18.	Importancia de la preparación técnica	24
19.	Factores en la variación de calidad	25
20.	Ventajas y limitaciones del concreto	25

Capítulo 3

CEMENTOS

27

1.	Introducción	28
2.	Preliminares históricos	28
3.	Definiciones	30
4.	Fabricación del cemento	33
5.	Los compuestos principales del cemento	49
6.	Los compuestos secundarios del cemento	60
7.	Productos secundarios complementarios	66
8.	Reacción química	72
9.	Faguado	74
10.	Endurecimiento de las pastas	78
11.	Propiedades físicas	84
12.	Tipos de cemento	94
13.	Requisitos químicos	98
14.	Requisitos físicos	98
15.	Requisitos de obra	99
16.	Efectos sobre las propiedades del concreto	99
17.	Normalización	117



18.	Condiciones de compra	118
19.	Aprobación o rechazo del cemento	118
20.	Muestreo del cemento	121
21.	Ensayo del cemento	121
22.	Certificación del cemento	121
23.	Normas técnicas peruanas	122
24.	Glosario	123

Capítulo 4

AGREGADOS

127

1.	Introducción	128
2.	Consideraciones iniciales	129
3.	Comportamiento de las rocas como agregado	131
4.	Canteras	136
5.	Propiedades del agregado	137
6.	Clasificación de los agregados	171
7.	Consideraciones generales	176
8.	Agregado fino	179
9.	Agregado grueso	182
10.	Hormigón	186
11.	Agregado marginal	187
12.	Agregados reciclados o productos de desecho	190
13.	Control de calidad	190
14.	Almacenamiento de los agregados	193
15.	Muestreo de los agregados	194
16.	Ensayo de los agregados	196

CAPITULO 5

EFFECTOS DEL AGREGADO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO

201

1.	Introducción	202
2.	Criterios de selección	202
3.	Proporciones de la mezcla	203
4.	Trabajabilidad	205
5.	Consistencia	208
6.	Segregación	210
7.	Exudación	211
8.	Cohesividad	211
9.	Tiempo de fraguado	212
10.	Contenido de aire	212
11.	Peso unitario	213
12.	Temperatura del concreto	214
13.	Facilidad de bombeo	214
14.	Acabado del concreto	215
15.	Congelación	216
16.	Humedecimiento y secado	220
17.	Calentamiento y enfriamiento	221
18.	Acción del fuego	221
19.	Propiedades térmicas	222
20.	Abrasión	223
21.	Materiales inconvenientes	224
22.	Ataque por ácidos y sales	225
23.	Reacción álcali-agregado	226
24.	Otras reacciones químicas	231
25.	Resistencia	232
26.	Contracción	243
27.	Propiedades térmicas	244
28.	Peso unitario	245
29.	Modulo de elasticidad	245
30.	Escurrimiento plástico	246
31.	Capacidad de fricción superficial	246
32.	Efectos del procesamiento y manejo de los agregados	248
33.	Efectos del costo del agregado	252

Capítulo 6**AGUA****253**

1.	Conceptos generales	254
2.	Requisitos de calidad	254
3.	Utilización de aguas no potables	255
4.	Aguas prohibidas	257
5.	Limitaciones	257
6.	Agua de mar	258
7.	Requisitos del comité 318 del ACI	260
8.	Almacenamiento	261
9.	Muestreo	261
10.	Ensayo	262

Capítulo 7**ADITIVOS Y ADICIONES****263**

1.	Definición	264
2.	Condiciones de empleo	264
3.	Razones de empleo	264
4.	Consideraciones en el empleo de aditivos	265
5.	Consideraciones económicas	267
6.	Clasificación	268
7.	Precauciones en el empleo de aditivos	271
8.	Responsabilidad del contratista	272
9.	Selección del porcentaje del aditivo	273
10.	Preparación del aditivo	273
11.	Incorporación a la mezcla	274
12.	Equipo dosificador	274
13.	Mantenimiento y protección	275
14.	Acelerantes	276
15.	Aire incorporado	287

16.	Reductores de Agua-Reguladores de fragua	348
17.	Aditivos minerales	353
18.	Generadores de Gas	356
19.	Aditivos para inyecciones	357
20.	Aditivos productores de expansión	358
21.	Aditivos ligantes	358
22.	Ayudas para bombeo	359
23.	Aditivos colorantes	360
24.	Aditivos floculantes	361
25.	Aditivos fungicidas, insecticidad y germicidas	361
26.	Aditivos impermeabilizantes	362
27.	Aditivos reductores de impermeabilidad	363
28.	Aditivos reductores de la expansión álcali-agregado	364
29.	Aditivos inhibidores de la corrosión	364
30.	Aditivos Superplastificantes	365
31.	Microsilices	374
32.	Almacenamiento de los aditivos	387
33.	Muestreo de los aditivos adiciones	388
34.	Ensayo de los aditivos y adiciones	389



CAPITULO

01

CONSIDERACIONES GENERALES

INSTITUTO DE LA CONSTRUCCIÓN Y GERENCIA

1. ALCANCE

Este libro tiene como propósito el complementar al Reglamento Nacional de Construcción y a la Norma Técnica de Edificación E.060 en el conocimiento de la Naturaleza y los Materiales empleados en la preparación del concreto utilizado en estructuras.

El texto de este libro trata de analizar la naturaleza del concreto y puntualizar los procedimientos, requisitos, exigencias mínimas y Normas que deberían ser conocidos y cumplidos por el Contratista y la Supervisión en el proceso de selección y empleo de los materiales a ser utilizados en la preparación del concreto para una obra determinada.

Es fundamental recordar que las indicaciones y notas de las especificaciones técnicas del proyecto deberán cumplir con los requisitos de la Norma Técnica de Edificación «Concreto Armado» E.060, la cual tiene prioridad cuando sus recomendaciones estén en discrepancia con Normas a las que ella hace referencia. Las anotaciones de este Libro ayudarán a cumplir dichos requisitos.

Las Recomendaciones de este Libro están referidas a materiales para concretos de peso normal y en su elaboración se ha tomado en consideración, entre otros muchos documentos y normas, las disposiciones establecidas en la Norma Técnica de Edificación E.060-89; y las del Building Code Requirement for Structural Concrete del ACI (318-99). Podrán ser aplicadas a la construcción de estructuras de concreto liviano o pesado, estructuras prefabricadas y/o estructuras especiales en la medida que ello sea pertinente y se cuente con la indicación de las especificaciones y/o autorización escrita de la Supervisión.

Las aclaraciones y complementaciones a las especificaciones del Proyecto son resueltas en obra por la Supervisión, con indicación escrita en el Cuaderno de Obras. La Supervisión podrá solicitar la colaboración del Ingeniero Proyectista, cuya opinión escrita tiene el mismo valor que los citados documentos.

Los ajustes en las especificaciones de obra, debido a las necesidades de una estructura determinada, pueden hacerse por la Supervisión, a pedido del contratista, empleando para ello un listado de requisitos suplementarios a dichas especificaciones. Dichos ajustes, que deben quedar claramente indicados en el Cuaderno de Obra, dependerán de la naturaleza y complejidad de la estructura.

2. LIMITACIONES

Las recomendaciones de este Libro no son aplicables, sin autorización escrita de la Supervisión, a los aspectos relacionados con materiales para Concreto Pesado para pantallas; Concreto Aislante; Concreto Refractario o Concreto Liviano.

3. RESPONSABILIDAD

Todas las etapas analizadas en este Libro deberán ser ejecutadas en por personal profesional y técnico calificado.

La dirección y supervisión del Proyecto corresponden a ingenieros civiles colegiados, quienes son responsables del cumplimiento de lo indicado en las especificaciones del mismo.

4. MATERIALES ESPECIALES

Prevía autorización escrita del Ingeniero Proyectista y de la Supervisión, el Contratista podrá emplear materiales no indicados en las especificaciones de obra.

La solicitud de autorización de empleo debe ser presentada por el Contratista a la Supervisión, acompañada por la información técnica que avala el pedido.

Las modificaciones aprobadas por escrito por la Supervisión tienen, en lo pertinente, la validez y efectos de las especificaciones del Proyecto a las cuales reemplazan o complementan. La solicitud y su aceptación deben figurar en el Cuaderno de Obra.

5. ESPECIFICACIONES

En relación con las especificaciones se tendrá en cuenta:

- a. Los originales y copias de las especificaciones de obra, y de las especificaciones de detalle, deberán llevar la firma, sello y número de registro de un ingeniero civil colegiado, el cual es el único autorizado a aprobar cualquier modificación a los mismos.
- b. Las especificaciones deberán tener toda la información necesaria para la correcta ejecución del Proyecto.
- c. Toda la información referente a los materiales empleados estará en obra a disposición de la Supervisión. Igualmente será archivada por la persona o entidad que licite la obra.

En las especificaciones de obra necesariamente deberá indicarse el nombre y fecha del o los Códigos y Normas empleados.

6. DIRECCION DE LA OBRA

El Contratista y la Supervisión, por si mismos o por ingenieros civiles colegiados que los representen en la obra, deberán estar presentes en la elección de los materiales y durante todas las etapas del proceso constructivo.

El Contratista ejecuta las diversas etapas del proceso constructivo de acuerdo a lo indicado en los planos, las especificaciones del Proyecto y demás documentos técnicos. Ninguna modificación a los mismos podrá ser efectuada sin autorización escrita de la Supervisión.

Si ello fuere necesario, el Contratista designará al Ingeniero Civil Colegiado que actuará como Ingeniero Residente de la Obra y lo representará en ella.

Cuando se requiera autorización previa de la Supervisión para emplear determinados materiales, el Ingeniero Residente la solicitará con 48 horas de anticipación a la iniciación de los mismos.

El Contratista llevará un Cuaderno de Obra con un registro diario de la información referida al avance del proceso constructivo. Este Cuaderno de Obra forma parte de los documentos entregados al propietario con el Acta de Recepción de Obra.

Entre las ocurrencias técnicas que deberán figurar en el Cuaderno de Obra estarán los certificados de la calidad y proporciones de los materiales integrantes del concreto.

7. PERSONAL

El personal profesional, técnico y obrero que participa en las diversas etapas del proyecto debe ser calificado. El personal profesional debe ser colegiado.

8. EQUIPO

El Contratista deberá contar en obra con todas las facilidades, equipos, e instalaciones, que permitan una ejecución eficiente y ordenada de las diferentes etapas del proyecto, incluida la de selección de los materiales.

9. SUPERVISION E INSPECCION

La Supervisión es seleccionada por el Propietario y lo representa ante el Contratista. Responde del cumplimiento de lo indicado en los planos y especificaciones del Proyecto. Las decisiones de la Supervisión obligan al Contratista.

La Supervisión es ejercida o está representada en obra por un ingeniero civil colegiado que actúa como Inspector. En zonas de alto riesgo sísmico el profesional debe ser de reconocida experiencia.

La Supervisión podrá estar a cargo del Ingeniero Proyectista, en su calidad de responsable directo de los planos y especificaciones de obra. Si él no asume esta responsabilidad, su contratación como Asesor es recomendable para

colaborar con la Supervisión en la ejecución del proyecto de acuerdo a sus requerimientos.

El Departamento de Inspección de Obras de la entidad pública licitante deberá tener personal profesional calificado para la supervisión de obras de concreto.

Las responsabilidades de la Supervisión deberán estar indicadas en el contrato de ésta, el cual debe ser de conocimiento del Contratista. Sólo la Supervisión tiene autoridad para modificar las especificaciones del Proyecto. La autorización escrita debe figurar en el Libro de Obra y contar con la autorización del Ingeniero Projectista cuando ello fuere necesario.

La Supervisión lleva un Libro de las diversas incidencias del proceso constructivo, el cual forma parte de los documentos entregados al Propietario con el Acta de Recepción de Obra.

El Contratista brinda a la Supervisión las facilidades necesarias para el cumplimiento de sus funciones.

Los honorarios de la Supervisión son abonados por el Propietario de la obra.

La selección de los materiales deberá ser inspeccionada en la forma que es requerida por el Reglamento Nacional de Construcción y la Norma Técnica de Edificación E.060.

El Ingeniero Inspector, bajo las ordenes de la Supervisión, deberá requerir el cumplimiento de las especificaciones. El registro de la Inspección deberá incluir: Calidad y proporciones de los materiales del concreto y resistencia de éste.

Los registros de la Inspección deberán ser conservados por la Supervisión no menos de dos años después de terminado el proyecto.

10. MUESTREO Y ENSAYO DE LOS MATERIALES

10.1 DEFINICION DE MUESTRA

Los materiales varían de lote en lote y aún dentro de un lote. No siendo económico ensayar todos los elementos de un lote es necesario emplear muestras.

Una muestra es una pequeña porción representativa de un volumen mayor de un material sobre el cual se desea obtener información.

El muestreo es el procedimiento a seguir para obtener muestras. Las propiedades de las muestra son presentadas como representativas de las de la unidad mayor a la cual representa.

10.2 PROGRAMA DE MUESTREO

La elección de un programa de muestreo determinado dependerá de la ubicación del material en obra y de la información que se desee obtener, ya sean valores promedio o variación dentro del lote que está siendo ensayado.

Modelos para un muestreo probabilístico se dan en la Norma ASTM E105 «Recommended Practice for Probability Sampling of Materials»; en la Norma ASTM E122 «Recommended Practice for Choice of Sample Size to Estimate the average quality of Lot or Process»; y en la Norma ASTM E141 «Recommended Practice for Acceptance of Evidence on the Results of Probability Sampling».

10.3 SIGNIFICADO DE LA VARIABILIDAD

Un conjunto de muestras pueden ser utilizadas para obtener información acerca de las propiedades promedio y del patrón de variación de dichas propiedades. El conocimiento del promedio de las propiedades y la variabilidad de las mismas puede ser importante en la toma de decisiones.

Si se tiene dos lotes de un material y una muestra de cada lote a la cual se efectúa análisis determinados, obteniéndose resultados iguales en cada caso, ello no significa que el conjunto de todo el lote o de ambos lotes tiene los mismos valores. Es evidente que se tendrá más confianza en las conclusiones si se dispone del resultado de diversas muestras, todas del mismo lote.

En conclusión, los resultados de ensayos sobre muestras deben ser considerados como valores promedio del material, pudiendo indicar la variabilidad en las propiedades. La decisión de aceptar o no un material puede basarse sobre los resultados de los ensayos, pudiendo una decisión razonable ser hecha únicamente si el muestreo ha sido correctamente efectuado y de acuerdo a un programa.

10.4 FRECUENCIA DE LA TOMA DE MUESTRAS

Las especificaciones del Proyecto o la Supervisión determinarán la frecuencia de la toma de muestras.

11. NORMAS

Las Normas indicadas en este Libro corresponden a las NTP, a la B.S., o a la ASTM. Una relación de las mismas se detalla al final del texto. Las recomendaciones del ACI se identifican por su número.

El Contratista deberá tener en obra una copia de las Normas indicadas en los planos y especificaciones de obra.



CAPITULO

02

**NATURALEZA DEL
CONCRETO**

INSTITUTO DE LA CONSTRUCCIÓN Y GERENCIA

1. DEFINICION DEL CONCRETO

El concreto es un producto artificial compuesto que consiste de un medio ligante denominado pasta, dentro del cual se encuentran embebidas partículas de un medio ligado denominado agregado.

La pasta es el resultado de la combinación química del material cementante con el agua. Es la fase continua del concreto dado que siempre está unida con algo de ella misma a través de todo el conjunto de éste.

El agregado es la fase discontinua del concreto dado que sus diversas partículas no se encuentran unidas o en contacto unas con otras, sino que se encuentran separadas por espesores diferentes de pasta endurecida.

Las propiedades del concreto están determinadas fundamentalmente por las características físicas y químicas de sus materiales componentes, pudiendo ser mejor comprendidas si se analiza la naturaleza del concreto.

2. IMPORTANCIA DEL CONCRETO

Actualmente el concreto es el material de construcción de mayor uso en nuestro país. Si bien la calidad final del concreto depende en forma muy importante del conocimiento del material y de la calidad profesional del ingeniero, el concreto es, en general, desconocido en muchos de sus siete grandes aspectos: naturaleza, materiales, propiedades, selección de las proporciones, proceso de puesta en obra, control de calidad e inspección, y mantenimiento de los elementos estructurales.

La principal limitación a las múltiples aplicaciones que se pueden dar al concreto es el desconocimiento de alguno de los aspectos ya indicados; así como de la mayor o menor importancia de los mismos de acuerdo al empleo que se pretende dar al material. Ello obliga al estudio y actualización permanentes para obtener del concreto las máximas posibilidades que como material puede ofrecer al Ingeniero.

3. REQUISITOS DE LAS MEZCLAS

Las mezclas de concreto deberán cumplir con los siguientes requisitos básicos:

- a. La mezcla recién preparada deberá tener la trabajabilidad, consistencia y cohesividad que permitan su adecuada colocación en los encofrados. Esta mezcla deberá estar libre de segregación y tener una exudación mínima.
- b. La mezcla endurecida deberá tener las propiedades especificadas en función del empleo que se va a dar a la estructura.

- c. El costo de la unidad cúbica de concreto endurecido deberá ser el mínimo compatible con la calidad deseada.

4. COMPOSICION DEL CONCRETO

El concreto endurecido se compone de:

- a. Pasta
- b. Agregado

5. LA PASTA

5.1 ELEMENTOS FUNDAMENTALES

Aquella parte del concreto endurecido conocida como pasta comprende a cuatro elementos fundamentales:

- a. El gel, nombre con el que se denomina al producto resultante de la reacción química e hidratación del cemento;
- b. Los poros incluidos en ella;
- c. El cemento no hidratado, si lo hay;
- d. Los cristales de hidróxido de calcio, o cal libre, que puedan haberse formado durante la hidratación del cemento.

Estos cuatro elementos tienen un papel fundamental en el comportamiento del concreto.

5.2 FUNCIONES DE LA PASTA

La pasta tiene cuatro grandes funciones en el concreto:

- a. Contribuir a dar las propiedades requeridas al producto endurecido.
- b. Separar las partículas de agregado.
- c. Llenar los vacíos entre las partículas de agregado y adherirse fuertemente a ellas.
- d. Proporcionar lubricación a la masa cuando ésta aún no ha endurecido.

5.3 PROPIEDADES DE LA PASTA

Las propiedades de la pasta dependen de:

- a. Las propiedades físicas y químicas del cemento.
- b. Las proporciones relativas de cemento y agua en la mezcla.

- c. El grado de hidratación del cemento, dado por la efectividad de la combinación química entre éste y el agua.

5.4 INFLUENCIA DE LA PASTA EN EL CONCRETO

Sin desconocer el papel fundamental que tiene el agregado en las características finales del concreto, el comportamiento de éste como material de construcción está directamente influenciado por las características de la pasta y propiedades finales de ella.

Para un cemento dado, las características y porosidad de la pasta dependen fundamentalmente de la relación agua-material cementante y del grado de hidratación de éste; siendo mejores las propiedades del concreto y menor su porosidad cuanto más baja es la relación agua-material cementante de una mezcla trabajable y cuanto mayor es el grado de hidratación del cemento.

Dependiendo el grado de hidratación del cemento de la reacción química entre éste y el agua, todas aquellas condiciones que favorezcan la hidratación tienen importancia en la influencia de la pasta en el concreto.

6. EL GEL

6.1 CONCEPTO

Se define como gel a la parte sólida de la pasta, la cual es el resultado de la reacción química del cemento con el agua durante el proceso de hidratación.

6.2 PROCESO DE FORMACION

En 1882 el investigador francés Le Chatelier sostuvo que los productos de hidratación del cemento tenían una solubilidad menor que los compuestos originales, lo que daba lugar a que los hidratos se precipitasen formando una solución sobresaturada que presentaba cristales elongados y entrelazados, los cuales poseían alta cohesividad y propiedades adhesivas.

En 1893 el investigador francés Michaelis enuncia la teoría coloidal, sosteniendo el que aluminato tricálcico, el sulfoaluminato de calcio y el hidróxido de calcio dan la resistencia inicial de la pasta y que, a continuación, el agua saturada de cal ataca a los silicatos formando silicato de calcio hidratado el cual, por ser casi insoluble, forma una masa gelatinosa. Debido a la pérdida gradual de agua de la mezcla, ya sea por secado o por hidratación, esta masa endurece gradualmente obteniéndose cohesión.

A partir de 1960 se acepta que ambas teorías contienen algo de verdad y no

son irreconciliables. En primer lugar no existe dudas en cuanto a que los coloides, en su condición de partículas cristalinas de gran área superficial, gozan de propiedades diferentes a los sólidos usuales. Ello implica que el comportamiento coloidal de la pasta sería esencialmente función del área superficial de la misma y no de la irregularidad de la estructura interna de las partículas involucradas.

Como consecuencia, en la actualidad se piensa que cuando el cemento se combina con el agua se produce muy rápidamente una solución sobresaturada de hidróxido de calcio, con concentración de silicato cálcico hidratado en condición metastable. De acuerdo a Le Chatelier este hidrato se precipita rápidamente, correspondiendo el endurecimiento posterior a la pérdida de agua del material hidratado, tal como lo enuncia Michaelius. Presentándose el silicato de calcio hidratado en forma de cristales interconectados extremadamente pequeños, los cuales de acuerdo a sus dimensiones pueden ser definidos como gel, la aparente divergencia Le Chatelier-Michaelius se reduciría finalmente a terminología en la medida que el producto final es un gel consistente de cristales.

6.3 COMPOSICION

En su estructura el gel es una aglomeración porosa de partículas sólidamente entrelazadas, en su mayoría escamosas o fibrosas, el conjunto de las cuales forma una red eslabonada que contiene material más o menos amorfo.

En su composición el gel comprende:

- a. La masa cohesiva de cemento hidratado en su estado de pasta más densa.
- b. Hidróxido de calcio cristalino.
- c. Poros Gel.

6.4 COMPORTAMIENTO

El gel desempeña el papel más importante en el comportamiento del concreto, especialmente en su resistencia y comportamiento elástico. Las razones de su resistencia aún no están claramente comprendidas, pero se acepta que intervienen dos clases de adherencias cohesivas: atracción física y adherencia química.

La atracción física es del tipo Van der Waal entre superficies de sólidos separados únicamente por los microscópicos poros gel. Esta adherencia es debida a la gran energía disponible en la superficie de las partículas de gel. Es una característica distintiva de éste el que sus fuerzas internas son pequeñas en comparación con sus fuerzas superficiales.

La adherencia química es igualmente una causa importante de cohesión. Dado que el gel tiene capacidad de esponjamiento limitada, debido a que sus partículas no pueden dispersarse por adición de agua, es evidente que ellas están unidas por fuerzas químicas, siendo la ligazón de los tipos iónico y covalente.

Si bien la fuerzas químicas son más importantes que las Van der Waal, la adherencia química actúa únicamente sobre la pequeña fracción que corresponde a la zona de contacto de las partículas de gel. En cambio, la adherencia física actúa sobre un área mayor, dado que la superficie específica del gel cemento es de cerca de dos millones de centímetros cuadrados por gramo. Así, aunque la pasta es un gel del tipo de expansión limitada, la adherencia entre las fibras es lo bastante fuerte para resistir expansiones tixotrópicas ilimitadas.

Por lo expuesto, aunque en la actualidad se sigue investigando sobre la importancia de la influencia relativa de las adherencias física y química, no existe dudas sobre la importancia de la contribución de ambas a las propiedades finales de la pasta endurecida.

7. HIDRATACION Y CURADO DEL CONCRETO

Se define como hidratación al proceso de reacción química del cemento en presencia del agua. La hidratación requiere de presencia de humedad, condiciones de curado favorables, y tiempo.

Se define como tiempo de curado al período durante el cual el concreto es mantenido en condiciones de humedad y temperatura tales como para lograr la hidratación del cemento en la magnitud que se desea para alcanzar la resistencia seleccionada.

8. POROSIDAD DE LA PASTA

8.1 CONCEPTO

Existen en la pasta cantidades variables de espacios vacíos, denominados poros, los cuales no contienen materia sólida aunque, bajo determinadas circunstancias, algunos de ellos podrían estar parcial o totalmente llenos de agua.

8.2 CLASIFICACION

Los poros presentes en la pasta se clasifican en cuatro categorías definidas por el origen, tamaño promedio, o ubicación de ellos. No existe una línea clara de demarcación que separe un rango de otro. Los poros de estas cuatro categorías son:

- a. Poros por aire atrapado.
- b. Poros por aire incorporado.
- c. Poros capilares.
- d. Poros gel.

8.3 POROS POR AIRE ATRAPADO

Durante el proceso de mezclado una pequeña cantidad de aire, del orden del 1%, es aportada por los materiales y queda atrapada en la masa de concreto, no siendo eliminada por los procesos de mezclado, colocación o compactación. Los espacios que este aire forma en la masa de concreto se conocen como poros por aire atrapado. Son parte inevitable de toda pasta.

Los poros por aire atrapado varían en tamaño desde aquellos que no son perceptibles a simple vista hasta aquellos de un centímetro o más de diámetro. Su perfil puede ser irregular y no necesariamente están interconectados.

La presencia de los poros de aire atrapado es inevitable pero inconveniente dado que contribuyen a la disminución de la resistencia y durabilidad del concreto, pudiendo adicionalmente incrementar la permeabilidad.

En la misma categoría general de poros por aire atrapado, aunque estrictamente no lo son, algunos especialistas incluyen las fisuras u oquedades que en algunas oportunidades se observan debajo del agregado grueso. Ellas han sido formadas por el agua que se ha almacenado debajo de éste y posteriormente se ha secado.

8.4 POROS POR AIRE INCORPORADO

Fundamentalmente por razones de incremento en la durabilidad del concreto, por incremento en la protección de la pasta contra los procesos de congelación del agua en el interior de la misma, se puede incorporar en forma intencional, mediante el empleo de aditivos químicos, minúsculas burbujas de aire las cuales se conocen como poros por aire incorporado.

Las burbujas de aire incorporado son generalmente de perfil esférico, con diámetros variables que corresponden a un valor promedio de 0,08 a 0,10 mm. Su volumen en la unidad cúbica de concreto puede ocupar hasta más del 5% de la misma, pudiendo encontrarse en un concreto con 5% de aire incorporado valores del orden de 330 mil burbujas de aire por centímetro cúbico de pasta.

La razón principal del empleo de las burbujas de aire incorporado es que este sistema de poros el cual está muy estrechamente espaciado permite un incremento significativo de la durabilidad del concreto al crear un gran número de cámaras en las que se puede congelar el agua presente en los poros capilares,

evitando que la tensión generada por la conversión de agua a hielo contribuya a agrietar el concreto.

Ventajas adicionales incluyen el que los poros de aire incorporado tienden a incrementar la trabajabilidad, plasticidad y fluidez de las mezclas; disminuyen la consistencia permitiendo la reducción de agua sin pérdida de la consistencia original; reducen la segregación del agregado; y disminuyen la exudación de las mezclas.

El principal inconveniente de la presencia de burbujas de aire en la mezcla de concreto es que éstas, al incrementar la porosidad, tienden a disminuir las resistencias mecánicas en un 5% por cada 1% de aire incorporado. Esta disminución es más significativa en las mezclas ricas y tiende a disminuir conforme la mezcla es más pobre, ello principalmente debido a que al mejorar las propiedades al estado fresco permiten una reducción en el contenido de agua con la consiguiente reducción en la relación agua-cemento.

8.5 POROS CAPILARES

Se define como poros capilares a los espacios originalmente ocupados por el agua en el concreto fresco, los cuales en el proceso de hidratación del cemento no han sido ocupados por el gel.

El gel sólo puede desarrollarse en los espacios originalmente llenos de agua. Por tanto, si la relación agua-cemento es alta o el curado es pobre, la cantidad de espacios ocupables por el gel será alta y sólo una parte de ellos será ocupada por el gel durante el proceso de hidratación, quedando los espacios residuales en la condición de poros capilares.

Los poros capilares no pueden ser apreciados a simple vista, varían en perfil y forman un sistema, en muchos casos interconectado, distribuido al azar a través de la pasta. En la pasta en proceso de formación los espacios llenos de agua son continuos. Conforme progresa la hidratación los capilares son separados por el gel al comenzar a ocupar éste los espacios originalmente llenos de agua, pudiéndose llegar a un sistema parcialmente discontinuo, el cual definitivamente se presenta en relaciones agua-cemento bajas. En la práctica nunca se llega a un sistema totalmente discontinuo aún en relaciones agua-cemento tan bajas como 0.45

La importancia de los poros capilares radica en que, conforme aumenta su número:

- a. Disminuyen las resistencias mecánicas de la pasta endurecida.
- b. Aumentan la porosidad, permeabilidad y capacidad de absorción de la pasta.

- c. Aumenta la vulnerabilidad de la pasta al ataque por acción de las bajas temperaturas sobre el concreto.

Este último punto es de gran importancia dado que los poros capilares son los principales responsables de la vulnerabilidad de la pasta al ataque de las heladas debido a que están en capacidad de contener agua que puede congelarse. Esta agua al pasar al estado sólido debido a las bajas temperaturas incrementa su volumen en un 9%, originando esfuerzos de tensión que el concreto no está en capacidad de soportar, aumentando con ello la capacidad de deterioro del mismo.

8.6 POROS GEL

Durante el proceso de formación del gel quedan atrapados dentro de éste, totalmente aislados unos de otros, así como del exterior, un conjunto de vacíos a los cuales se les conoce con el nombre de poros gel.

Estos poros se presentan en el gel en forma independiente de la relación agua-cemento y el grado de hidratación de la pasta, ocupando aproximadamente el 28% de la misma.

Los poros gel tienen un diámetro muy pequeño, del orden de aproximadamente 0.0000010 mm, equivalente al de las moléculas de agua. Debido a su muy pequeño diámetro el agua no congela en ellos. Estos poros no están interconectados.

La imposibilidad que tiene el agua para congelar en los poros gel es debida, fundamentalmente, a que no hay espacio suficiente para que se pueda producir la nuclearización del hielo. Las partículas que conforman el gel son cuatro o cinco veces mayores que los poros gel.

8.7 IMPORTANCIA DE LA POROSIDAD

El agua presente en los poros gel está tan firmemente unida que no se evaporará bajo condiciones de secado que eliminarían casi toda el agua de los poros mayores. Esta agua puede ser considerada para efectos prácticos como agua químicamente combinada.

En el caso de los poros por aire atrapado, estos tienen tan baja propensión a retener agua que pueden considerarse virtualmente vacíos.

Los poros de aire incorporado, cuyo rango de diámetros está entre el de los poros capilares y el de los poros gel, no retienen agua ni están interconectados, pudiéndoseles considerar como virtualmente vacíos.

El contenido de agua de los poros capilares se incrementa o disminuye por

humedecimiento o secado del concreto, siendo el agua más fácilmente removible por secado conforme el capilar aumenta de diámetro. La porosidad característica del gel, nominalmente no inferior al 28%, es el límite inferior de la porosidad total que puede ser alcanzada por la pasta en aquellos casos en que, gracias a una adecuada combinación de una relación agua-cemento inicial muy baja y un curado prolongado, la porosidad capilar podría ser reducida a un mínimo. En la práctica la porosidad de la pasta es siempre mayor al 28%, variando en un buen concreto entre 30% y 40%, con lo que la permeabilidad de tales pastas generalmente será la del gel en si mismo.

Adicionalmente deberá tenerse en consideración que en el proceso de secado del concreto endurecido, los poros mayores que contienen agua tenderán a vaciarse más rápidamente que los menores. En cambio, en el proceso de humedecimiento de un concreto seco, la alta capilaridad de los poros muy pequeños produce una gran fuerza de impulso para el movimiento de agua, el mismo que trata de ser impedido por la baja permeabilidad del sistema adyacente compuesto de poros muy pequeños, dando como resultado que los poros menores tiendan a llenarse muy lentamente.

Los macroporos tienen muy pequeña capilaridad y, por tanto, dan origen a una fuerza de impulso para el movimiento del agua. Adicionalmente, como suelen estar rodeados de un sistema poroso de permeabilidad restringida, ello se une a lo anterior para reducir la velocidad de movimiento del agua en los macroporos, excepto aquellos que se encuentran muy cerca de la superficie.

Finalmente, es importante indicar que los macroporos de un elemento de concreto, incluyendo los poros por aire incorporado, permanecen sin llenarse aún en los concretos sumergidos en agua. Los poros de tamaño intermedio tienden a llenarse más fácilmente que los poros de diámetro muy pequeño.

9. EL AGREGADO

9.1 CONCEPTO

Se define como agregado al conjunto de partículas inorgánicas, de origen natural o artificial, cuyas dimensiones están comprendidas entre los límites fijados en la Norma NTP 400.011. Los agregados son la fase discontinua del concreto. Ellos son materiales que están embebidos en la pasta y ocupan entre el 62% y el 78% de la unidad cúbica del concreto.

Un adecuado conocimiento de la naturaleza física y química del concreto, así como del comportamiento de éste, implica necesariamente el de los materiales que conforman la corteza terrestre, estudiados a la luz de la geología y, específicamente, de la petrología.

9.2 CLASIFICACION

El agregado empleado en la preparación del concreto se clasifica en agregado fino, agregado grueso y hormigón, conocido este último como agregado integral.

Se define como agregado fino a aquel, proveniente de la desintegración natural o artificial de las rocas, que pasa el Tamiz de 3/8" y queda retenido en el tamiz N° 200. El más usual de los agregados finos es la arena, definida como el producto resultante de la desintegración natural de las rocas.

Se define como agregado grueso a aquel que queda retenido en el Tamiz N° 4 y es proveniente de la desintegración natural o artificial de las rocas. El agregado grueso suele clasificarse en grava y piedra triturada o chancada. La grava es el agregado grueso proveniente de la disgregación y abrasión natural de materiales petreos. Se le encuentra generalmente en canteras y lechos de ríos depositado en forma natural. La piedra chancada, o piedra triturada, es el agregado grueso obtenido por trituración artificial de rocas y gravas.

Se define como hormigón, o agregado integral, al material conformado por una mezcla de arena y grava. Este material, mezclado en proporciones arbitrarias se da en forma natural en la corteza terrestre y se le emplea tal como se le extrae de la cantera.

9.3 FUNCIONES DEL AGREGADO

Las tres principales funciones del agregado en el concreto son:

- a. Proporcionar un relleno adecuado a la pasta, reduciendo el contenido de ésta por unidad de volumen y, por lo tanto, reduciendo el costo de la unidad cúbica de concreto.
- b. Proporcionar una masa de partículas capaz de resistir las acciones mecánicas, de desgaste, o de intemperismo, que puedan actuar sobre el concreto.
- c. Reducir los cambios de volumen resultantes de los procesos de fraguado y endurecimiento; de humedecimiento y secado; o de calentamiento de la pasta.

9.4 INTERRELACION AGREGADO-CONCRETO

Las propiedades del concreto resultantes del empleo de un agregado determinado dependen de:

- a. La composición mineral de las partículas de agregado, la cual influye fundamentalmente sobre la resistencia, durabilidad y elasticidad del concreto.

- b. Las características superficiales de las partículas, las cuales influyen especialmente sobre la trabajabilidad, fluidez y consistencia del concreto; así como sobre la adherencia entre la pasta y el agregado.
- c. La granulometría de los agregados fino y grueso, definida por si misma, así como por la superficie específica, módulo de fineza, y tamaño máximo del agregado grueso. Estas propiedades influyen fundamentalmente sobre las propiedades del concreto al estado no endurecido, sobre su densidad y sobre la economía de la mezcla.
- d. El volumen de agregado por unidad de volumen del concreto, el cual influye especialmente en los cambios de volumen debidos a los procesos de humedecimiento y secado; a los procesos de calentamiento y enfriamiento; así como en el costo de la unidad cúbica de concreto.
- e. La porosidad y absorción del agregado, las cuales influyen sobre la relación agua-cemento efectiva, así como sobre las propiedades del concreto al estado no endurecido.

9.5 IMPORTANCIA DE LA POROSIDAD DEL AGREGADO

Las cuatro clases de poros que pueden estar presentes en la pasta corresponden a espacios que están en el concreto fuera de los límites del agregado. Sin embargo, normalmente éste es poroso y permeable, pudiendo variar el total de poros, de acuerdo a los diferentes tipos de rocas, entre el 0.3% y el 20%.

Algunas rocas presentan macroporos, los cuales se definen como poros lo suficientemente grandes como para que los efectos de la capilaridad en ellos sean muy pequeños o despreciables. Los macroporos presentes en la superficie de la roca, o en el cuerpo de la roca pero conectados a la superficie por otros macroporos, pueden ser llenados fácilmente por inmersión de la roca en agua. Sin embargo, si tales macroporos están dentro del cuerpo de la roca y se encuentran separados de la superficie por una fina estructura porosa que no es fácilmente permeable, no deberán llenarse rápidamente por un proceso ordinario tal como una prolongada inmersión en agua.

La dimensión promedio de los poros en las diversas rocas comprende un amplio rango de tamaños. Usualmente las rocas que presentan una alta porosidad y poros relativamente grandes, tienen una alta permeabilidad al agua. Sin embargo, esta regla presenta excepciones encontrándose rocas, por el ejemplo el horsteno, las cuales tienen una porosidad moderada a alta pero baja permeabilidad, lo que indica poros de tamaño promedio pequeño. En este tipo de rocas el tamaño promedio de los poros podría estar en el rango del diámetro de los poros capilares presentes en la pasta.

La porosidad de los agregados naturales generalmente empleados en la

preparación de concretos de peso normal, se encuentra usualmente por debajo del 10% y casi siempre por debajo del 3%, en contraste con el 30% ó más de la porosidad total de las pastas. Es lógico esperar, a partir de estos valores, que la permeabilidad de los agregados usualmente empleados sea mucho menor que la de la pasta.

Sin embargo, a nivel de laboratorio se ha podido comprobar que ello no siempre es así, habiéndose encontrado que muchas rocas empleadas como agregado en el concreto pueden tener valores de permeabilidad en el orden de, o más altos que, aquellos que se encuentran en pastas preparadas con relaciones agua-cemento en los rangos de 0.4 á 0.7

La explicación de esta aparente anomalía se encuentra en el hecho que los capilares o espacios porosos en el agregado a través de los cuales el agua puede fluir, son en promedio considerablemente mayores que los existentes en la pasta aún cuando ellos se presentan en mucho menor proporción.

Los pequeños vacíos presentes en el agregado, en forma similar a los poros capilares de la pasta, pueden bajo determinadas circunstancias ser parcial o totalmente llenados de agua. Esta puede congelarse a las temperaturas que usualmente se dan en climas fríos.

10. CAPACIDAD DE RETENCION DEL AGUA EN LOS POROS

La capacidad con la que diversas clases de poros, presentes en la pasta y/o el agregado, pueden retener agua está inversamente relacionada a su tamaño. En relación con esto se pueden hacer las siguientes distinciones:

- a. El agua presente en los poros gel está firmemente adherida, de manera tal que ella no puede evaporarse bajo condiciones de secado que harían eliminarse casi toda el agua presente en los poros mayores. Para los propósitos de un estudio sobre la naturaleza del concreto, el agua de los poros gel deberá considerarse como agua químicamente combinada, aunque desde el punto de vista de la físico-química podrían establecerse algunas diferencias.
- b. Los grandes poros tienen muy pequeña propensión a retener agua, por lo que en circunstancias totalmente inusuales ellos están llenos.
- c. En los poros de aire incorporado, los cuales normalmente no suelen apreciarse visualmente, puede afirmarse lo mismo que en el caso de los grandes poros.
- d. Ocupando un rango de tamaños intermedios entre aquellos que son visibles por el ojo y los poros gel, los poros capilares tienen una afinidad intermedia con el agua. Pudiendo su contenido incrementarse o disminuir con el humedecimiento o secado del concreto, y siendo el agua presente en los capilares mayores más fácilmente removible por secado que aquella

- presente en los capilares de diámetro menor.
- e. Los poros presentes en el agregado son generalmente mayores que los poros capilares presentes en la pasta, con la excepciones previamente ya indicadas, y por ello tienen una menor habilidad para tomar y retener agua. Sin embargo, los pequeños poros presentes en algunos agregados se comportan, en relación con el agua, en forma muy similar a los poros capilares presentes en la pasta.

Una consecuencia de las propiedades de los diversos tamaños de poros presentes en el concreto, es que puede considerarse que existe una competencia entre ellos en relación con el agua disponible. En efecto, en el proceso de secado del agua contenida en el concreto, los grandes poros que contienen agua tenderán a secarse más fácilmente en tanto que los más pequeños lo harán con mayor dificultad.

Por otra parte, en el humedecimiento de concretos secos, la entrada del agua en los poros estará determinada por dos tipos de acciones diferentes:

- a. La alta capilaridad de los poros muy pequeños producirá un nivel de fuerzas muy alto para el agua en movimiento, pero éste será impedido por la baja permeabilidad del sistema de poros muy pequeño circundante, con el resultado que estos últimos poros tenderán a llenarse muy lentamente.
- b. La pequeña capilaridad de los grandes poros, o macroporos, crea pequeñas fuerzas de impulso para el movimiento del agua. Adicionalmente estos poros están generalmente rodeados de un sistema de poros de permeabilidad restringida.

Las dos circunstancias mencionadas se combinan para reducir la velocidad de movimiento del agua en los macroporos, excepto aquellos que están muy cerca de la superficie como ya se indicó.

Adicionalmente a las dos consideraciones anteriores, es importante indicar que los grandes poros presentes en la masa de concreto, incluyendo los poros de aire incorporado, permanecen sin llenar aún en concretos sumergidos en agua. Los poros de tamaño intermedio tienden a llenarse más fácilmente que los poros muy grandes o muy finos.

11. NATURALEZA QUIMICA DE LA PASTA

El proceso químico mediante el cual los silicatos y aluminatos cálcicos, así como el sulfato de calcio, que componen el cemento reaccionan con el agua, y parcialmente unos con otros, para formar la pasta se denomina genéricamente proceso de hidratación. Este proceso es muy complejo y puede continuar por meses o años. En este estudio sólo se analizará algunos aspectos del mismo.

Los productos sólidos presentes en el gel son todos de naturaleza básica, pudiendo ser todos ellos atacados y descompuestos por los ácidos, aunque la velocidad de ataque puede ser significativamente baja para ácidos débiles o diluídos.

Igualmente, los productos de la hidratación pueden ser atacados por el bióxido de carbono el cual, en presencia del agua, forma ácido carbónico cuyo ataque puede ser severo o leve de acuerdo a las circunstancias en que actúa.

En general, los productos de la hidratación del cemento son estables frente a aguas ordinarias y a muchas soluciones. De no ser así el concreto no hubiese llegado a ser el importante material de construcción que es. Igualmente, con algunas excepciones, son estables frente a la acción de bases y soluciones.

El aluminato tricálcico, un compuesto indeseable pero inevitable de la pasta, es fácilmente atacado por soluciones de sulfato, en presencia del hidróxido de calcio y la humedad, para formar sulfoaluminato de calcio. Los agentes más enérgicos son las soluciones de sulfatos de sodio y magnesio.

El proceso de hidratación, teniendo lugar mediante y por medio del agua, da por resultado la liberación de hidróxido de calcio el cual rápidamente forma una solución saturada de esta sustancia en el agua contenida en los poros capilares y poros gel. Esta solución permanece en los poros capilares aún después de considerable secado del concreto endurecido y tiene una basicidad no menor a un pH de 12, siendo generalmente más alta debido a la presencia de hidróxidos alcalinos, tales como los hidróxidos de sodio o potasio, o ambos, formados a partir de los pequeños porcentajes de álcalis presentes en el cemento. Estos valores altos del pH son de vital importancia en la prevención de la corrosión del acero de refuerzo

12. NATURALEZA QUIMICA DEL AGREGADO

Aunque para propósitos prácticos el agregado es considerado usualmente químicamente inocuo, ello no siempre es cierto. En efecto, se ha encontrado que:

- a. Algunos agregados, naturales o artificiales, pueden entrar en reacción química con los constituyentes del cemento, especialmente con los álcalis, dando origen a múltiples problemas originados por la reacción y expansión álcali-agregado.
- b. Aunque la mayoría de los agregados ricos en sílice son en si mismos resistentes a los ataques ligeramente ácidos; los agregados calcareos, especialmente la calcita y la dolomita, pueden ser atacados por los ácidos.
- c. Aunque las motivaciones no están aún muy claras, se ha encontrado que

los agregados carbonatados pueden, en algunas ocasiones, tener aplicación útil como agregados de sacrificio en concretos expuestos a ataques por ácidos débiles a medios, a fin de reducir el ataque a la pasta en si misma y así prolongar la vida del concreto en el cual tales concretos son empleados.

13. PROPIEDADES DEL CONCRETO

13.1 CONCEPTO

Para cada caso particular de empleo se requieren en el concreto determinadas propiedades. Es por ello que el conocimiento de todas y cada una de las propiedades del concreto, así como de la interrelación entre ellas, es de importancia para el ingeniero el cual debe decidir, para cada caso particular de empleo del concreto, la mayor o menor importancia de cada una de ellas.

Al analizar las propiedades del concreto, el ingeniero debe recordar las limitaciones de las mismas en función de las múltiples variables que pueden actuar sobre el concreto modificándolo. En este análisis es importante que el ingeniero recuerde que el concreto, como cualquier otro material, puede sufrir adicionalmente modificaciones en el tiempo y que puede claudicar por fallas atribuibles a problemas de durabilidad, aún cuando su resistencia haya sido la adecuada.

En el análisis de las propiedades del concreto es importante recordar que ellas están íntimamente asociadas con las características y proporciones relativas de los materiales integrantes; que la calidad, cantidad y densidad de la pasta es determinante en las propiedades del concreto; y que la relación agua-cemento lo es sobre las características de la pasta.

13.2 PROPIEDADES FUNDAMENTALES

Las propiedades más importantes del concreto al estado no endurecido incluyen la trabajabilidad, consistencia, fluidez, cohesividad, contenido de aire, segregación, exudación, tiempo de fraguado, calor de hidratación, y peso unitario.

Las propiedades más importantes del concreto al estado endurecido incluyen las resistencias mecánicas, durabilidad, propiedades elásticas, cambios de volumen, impermeabilidad, resistencia al desgaste, resistencia a la cavitación, propiedades térmicas y acústicas, y apariencia.

14. IMPORTANCIA DE LA SELECCION DE LOS MATERIALES

En la selección del cemento debe considerarse, para los portland normales, la

composición química y el tipo de cemento empleado, así como la influencia que estas características pueden tener sobre las propiedades del concreto. Si se trata de cemento combinados, debe tenerse en consideración las características de la puzolana, ceniza, escoria de altos hornos, o microsílice empleada. Igualmente la fineza y tiempo de fraguado del cemento y la influencia de todos éstos factores sobre las propiedades del concreto.

De acuerdo a las propiedades que se desea alcanzar, se deberá tener en consideración para el agregado su perfil, textura superficial, granulometría, tamaño máximo, módulo de fineza, superficie específica, dureza, resistencia, composición mineralógica, limpieza, y presencia de materia orgánica o materias extrañas.

El agua debe ser potable. En caso de no serlo se deberá tener en consideración la influencia de sus componentes sobre las propiedades del concreto.

El empleo de aditivos modifica significativamente las propiedades del concreto. Su uso deberá ser cuidadosamente estudiado a fin de alcanzar las propiedades deseadas en el concreto sin modificar otras.

15. IMPORTANCIA DE LA DOSIFICACION DE LAS MEZCLAS

15.1 CONCEPTO

En la selección de las proporciones o dosificación de la mezcla de concreto deberá tenerse cuidado que haya la cantidad de pasta necesaria no sólo para recubrir el agregado y facilitar su movilidad, sino también para ocupar los vacíos existentes entre partículas.

Igualmente, la trabajabilidad y consistencia del concreto deberán ser las adecuadas para que la mezcla ocupe totalmente los encofrados y recubra el acero de refuerzo y elementos embebidos.

En el concreto endurecido, las proporciones seleccionadas deberán permitir obtener las propiedades deseadas al menor costo.

15.2 CONTENIDO DE AGUA

El agua que se coloca en la mezcla es, por razones de trabajabilidad, siempre mayor que aquella que se requiere por hidratación del cemento; siendo ésta última conocida como agua de consistencia normal y estando su valor en el orden del 28% en peso del cemento.

Por la razón expuesta, las pastas que tienen alta relación agua-cemento contienen más agua que no interviene en el proceso de hidratación, o agua

libre, que aquellas que tienen baja relación agua-cemento. Desde que el agua libre ocupa espacios que después se transforman en poros capilares, la pasta de las mezclas de alta relación agua-cemento es más porosa que la de las mezclas ricas o de las mezclas con baja relación agua-cemento.

16. IMPORTANCIA DE LA PREPARACION

16.1 CONCEPTO

La preparación del concreto es, fundamentalmente, un proceso de fabricación de un nuevo producto. Es por ello que los productos derivados de la obtención de materiales adecuados; de selección de las proporciones más convenientes de los mismos; de fabricación y puesta en obra de la mezcla; de control de su calidad; y de economía de producción son, en cierta forma, similares a aquellos que pueden presentarse en cualquier otro problema de fabricación.

Adicionalmente debe tenerse en consideración que, debido a que el proceso de fabricar y obtener un concreto de calidad determinada no termina hasta que la estructura es puesta en servicio, cada obra representa problemas particulares, especialmente aquellos referidos a la selección de los materiales y proporciones, proceso de colocación y curado del concreto.

Durante el proceso constructivo el profesional responsable de la obra deberá siempre recordar que, independientemente de la calidad de la mezcla, del nivel de los cálculos de oficina e inclusive de las mezclas de prueba en el laboratorio, las cualidades asumidas para la estructura no podrán ser obtenidas a menos que ellas sean alcanzadas en cada unidad cúbica de concreto en la obra.

17. IMPORTANCIA DEL CONTROL

La preparación de un buen concreto exige de un adecuado control. Ello implica:

- a. Una cuidadosa supervisión en la selección de los materiales y de las proporciones de la unidad cúbica de concreto.
- b. Una cuidadosa supervisión de los procesos de puesta en obra y acabado del concreto.
- c. La realización de ensayos en todas las etapas del proceso de selección de los materiales, dosificación de las mezclas, y colocación del concreto, a fin de garantizar la calidad de los materiales y del producto final.

18. IMPORTANCIA DE LA PREPARACION TECNICA

En la preparación del concreto el problema fundamental es obtener un producto

satisfactorio a un costo razonable. El alcanzar ambas condiciones exige que la fase técnica del proceso de fabricación del concreto esté bajo la responsabilidad de un profesional plenamente familiarizado con los diversos aspectos del concreto como material y de su tecnología.

Conocimientos adecuados en el campo de la tecnología del concreto; un adecuado criterio; buena preparación del concreto; e inspección de su calidad, son todos ellos factores necesarios para lograr un balance adecuado entre todos los aspectos que intervienen en la preparación del concreto. Personal calificado y mano de obra especializada son indispensable si se desea que el producto final, la estructura, sea de buena calidad.

Es imposible preparar un concreto de buena calidad, el cual cumpla con los requisitos exigidos por el proyectista, si no se posee una adecuada preparación en los diversos aspectos de la tecnología del concreto.

Un concreto «malo», un producto de inferior calidad, es preparado con cemento, agua y agregados. Son exactamente estos mismos materiales los ingredientes de un buen concreto. La diferencia radica únicamente en el como hacerlo, en la adecuada preparación profesional del ingeniero y el personal a sus órdenes, así como en la atención que haya sido dada a todos los aspectos de la preparación de un buen concreto.

19. FACTORES EN LA VARIACION DE CALIDAD

Algunos de los principales factores que pueden intervenir en la variación de calidad del concreto se pueden agrupar en los siguientes rubros:

- a. Variables en los materiales, cuya responsabilidad es atribuible al constructor
- b. Variables en el proceso de producción, cuya responsabilidad es atribuible al constructor.
- c. Variables en el control de calidad del concreto, cuya responsabilidad es atribuible a la Supervisión o al Laboratorio encargado del control.
- d. Variables debidas a la preparación del personal que interviene en la obra.

20. VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL CONCRETO

Las principales ventajas del concreto como material de construcción son:

- a. Su versatilidad, la cual permite obtener las formas que el proyectista desee.
- b. La posibilidad de fabricarlo en obra, como unidades vaciadas en sitio; o fuera de ella como unidades prefabricadas.
- c. El empleo de materiales locales, especialmente agregados y agua.
- d. Su bajo costo por unidad cúbica si se lo compara con el de otros materiales.

Entre las principales desventajas del concreto se encuentran:

- a. Su baja resistencia a los esfuerzos de tensión, lo que obliga al empleo de acero de refuerzo.
- b. Su permeabilidad, debida a la presencia de poros capilares en la pasta.
- c. Sus cambios de volumen y longitud debidos a procesos de humedecimiento y secado. El concreto se contrae al secarse y se expande al humedecerse, con la consiguiente posibilidad de agrietamiento.
- d. Sus cambios de longitud debidos a que el concreto se expande con el calor y tiende a contraerse al enfriarse, con la consiguiente posibilidad de agrietamiento.

CAPITULO

03

CEMENTOS



1. INTRODUCCION

El cemento es el componente más activo del concreto y, generalmente, tiene el mayor costo unitario. Por ello, y considerando que las propiedades del concreto dependen tanto de la cantidad como de la calidad de sus componentes, la selección y uso adecuado del cemento son fundamentales para obtener en forma económica las propiedades deseadas para una mezcla dada.

En el mercado peruano existe variedad de cementos para ser empleados por el usuario y la mayoría de ellos proporcionan adecuados niveles de resistencia y durabilidad en las obras usuales.

Algunos de los cementos disponibles proporcionan niveles más altos para determinadas propiedades que aquellos exigidos por las especificaciones de la obra, por lo que siempre debe indicarse en éstas los requisitos exigidos para el cemento. Imponer requisitos que no son necesarios es antieconómico y, además, puede perjudicar características importantes del concreto.

La importancia de elaborar especificaciones adecuadas es obvia, ya que ellas deben garantizar que sólo se ha de emplear la cantidad y tipo de cemento adecuados para alcanzar los requisitos que se desea obtener en el concreto. La totalidad de los cementos empleados en el Perú son cementos portland que cumplen con los requisitos que especifica la Norma ASTM C 150; o cementos combinados, que cumplen con lo indicado en la Norma ASTM C 595.

2. PRELIMINARES HISTORICOS

2.1 LOS INICIOS

Desde los tiempos de Grecia y Roma y hasta mediados del siglo XVIII se empleo la cal como único aglomerante para las construcciones. A los morteros obtenidos se les adicionaba materias de origen volcánico, hoy conocidas como puzolanas, o materiales de alfarería triturados, obteniéndose un mejor resultado de la resistencia frente al agua natural o de mar.

Las materias de origen orgánico adicionadas procedían de las islas de Santorín, o la localidad de Pozzuoli. Los morteros así obtenidos no eran hidráulicos y fueron la base para la construcción hasta 1756 en que se descubrió y empleo el primer aglomerante hidráulico.

La necesidad de construir en zonas marinas creó la necesidad de buscar aglomerantes capaces de endurecer bajo el agua y resistir su efecto de disgregación. Corresponde al ingeniero ingles SMEATON la selección de los materiales entre los aglomerantes disponibles, para llevar a cabo la edificación

del faro de Eddystone ubicado a pocas millas del puerto de Plymouth.

El criterio de selección de las cales fue realizado experimentalmente formando esferas de unos 5 cms con aglomerantes amasados en agua y determinando su endurecimiento de forma cualitativa observando la dureza y comprobando que las de mayor dureza correspondían a los aglomerantes con calizas menos puras. Asociando la cualidad hidráulica al residuo arcilloso que la caliza original calcinada dejaba al ser atacada por ácido nítrico, estimo la formación de compuestos los cuales pudieran ser los responsables del comportamiento adecuado en presencia del agua.

Smeaton, al publicar sus resultados en 1756 indicó que «esperaba poder obtener un cemento con un endurecimiento análogo al de la piedra de portland, tan estimada por su solidez y duración».

Entre 1812 y 1818, el químico francés VICAT confirmó la idea de Smeaton y dió el nombre de hidráulicas a este tipo de calizas que endurecían bajo agua. El llegó a la conclusión que la sílice y la alúmina, procedentes de la arcilla, daban estas propiedades hidráulicas, obteniéndose los mismos resultados con una mezcla de caliza pura con una arcilla que con una marga natural.

En 1819 el holandés John llega a la misma conclusión. El material tiene gran difusión en Europa y en 1874, el inglés ASPDIN obtiene una patente en la que figura por primera vez el nombre de cemento «portland» atribuido al producto obtenido de esta forma.

ASPDIN Y JOHNSON descubren que las fracciones de material calcinadas a alta temperatura dan un producto «escorificado», de color más oscuro, el cual tenía un endurecimiento más lento, con mayor hidráulica y alcanzaba resistencias mucho más elevadas. Este producto, inicialmente desechado, no era sino un clinker muy próximo al actual portland.

En 1838 el inglés BRUNEL, al entregar la obra del túnel bajo el Támesis, hace constar en los documentos el nombre del aglomerante utilizado «cemento portland».

En resumen, de 1793 a 1838 se llega al conocimiento de dos hechos fundamentales: que la impurificación de calizas con arcillas proporciona aglomerantes, y que la calcinación de estas mezclas a mayor temperatura da lugar a más elevadas resistencias y mayor hidráulica. Estos dos hechos señalan el camino para obtener el actual cemento portland.

2.2 PRIMEROS ESTUDIOS SISTEMATICOS

Los primeros estudios sistemáticos se deben a LE CHATELIER y MICHAELIS,

quienes realizan análisis químicos de las materias primas para obtener su composición de óxidos mayoritarios, encontrando SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 y CaO . El CaO es un óxido básico; el SiO_2 un óxido ácido; y el Al_2O_3 y el Fe_2O_3 son óxidos ácidos cuando se hayan en presencia de un exceso de óxido más básico, como lo es el CaO .

Entre los ensayos que realizan se encuentran mezclas de una determinada caliza con proporciones diversas de una misma arcilla; se analizan y obtienen los correspondientes cementos después de su calcinación; se determina resistencias y propiedades fundamentales de comportamiento hidráulico. Al relacionar resultados obtenidos se establecen el llamado «módulo hidráulico» y el «módulo de silicatos».

2.3 ESTADO ACTUAL

A la fecha, los importantes estudios realizados por BOGUE, LEA, DESCH, TAYLOR, etc.; así como las técnicas de análisis químico, métodos colorimétricos, procedimientos espectrofotométricos, procedimientos de absorción atómica, la espectroscopia de emisión, el análisis espectrométrico por fluorescencia de rayos X, la difracción de rayos X, la espectroscopia en el infrarrojo, la resonancia nuclear magnética, la microscopia óptica, la microscopia electrónica, el análisis térmico diferencial, los diagramas de fases, etc. han permitido tener una visión cada vez más completa del comportamiento del clinker y el cemento.

3. DEFINICIONES

3.1 CLINKER PORTLAND

El clinker es fabricado mediante un proceso que comienza por combinar una fuente de cal, tal como las calizas, una fuente de sílice y alúmina, como las arcillas, y una fuente de óxido de hierro, tal como el mineral de hierro. Una mezcla adecuadamente dosificada de los materiales crudos es finamente molida y luego calentada a una temperatura suficientemente alta, alrededor de los 1500 C., a fin que se produzcan las reacciones entre los componentes del cemento. El producto obtenido del horno es conocido como clinker de cemento portland. Después de enfriado, el clinker es molido con una adición de cerca del 6% de sulfato de calcio (yeso) para formar el cemento portland.

3.2 CEMENTOS

Se define como cementos a los materiales pulverizados que poseen la propiedad que, por adición de una cantidad conveniente de agua, forman una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como al aire y formar compuestos estables. Quedan excluidas de esta definición las cales hidráulicas, las cales aéreas y los yesos.

3.3 CEMENTO PORTLAND NORMAL

El cemento portland normal es el producto obtenido por la pulverización del clinker portland con la adición eventual de sulfato de calcio. Se admite la adición de otros productos siempre que no excedan el 1% en peso del total y que la Norma correspondiente determine que su inclusión no afecta las propiedades del cemento resultante. Los productos adicionados deberán ser pulverizados conjuntamente con el clinker.

El cemento portland normal deberá cumplir con los requisitos indicados en la Norma ASTM C 150 para los Tipos I, II, y V, los cuales se fabrican en el Perú. Alternativamente podrán emplearse los requisitos de las Normas NTP para cementos.

El cemento portland normal Tipo I se empleará en todos aquellos casos en que no se requieren en el concreto las propiedades especiales especificadas para los otros Tipos. Debe cumplir con los requisitos de las Normas ASTM C 150 ó NTP 334.039.

El cemento portland normal Tipo II se recomienda para construcciones de concreto expuestas a moderado ataque por sulfatos, o en aquellos casos en que se requiere un moderado calor de hidratación. Este cemento tendrá un contenido de aluminato tricálcico (C3A) menor del 8%; menores cambios de volumen; menor tendencia a la exudación; mayor resistencia al ataque por sulfatos; y menor generación de calor; así como adecuadas resistencias tanto en las edades iniciales como en las finales. Este cemento debe cumplir con los requisitos de la Norma ASTM C 150 ó de la Norma NTP 334.038.

El cemento portland normal Tipo V se recomienda cuando se requiere en el concreto alta resistencia a la acción de los sulfatos; alta resistencia en compresión; o baja generación de calor. Este cemento tendrá un contenido de aluminato tricalcico (C3A) menor del 5%. Deberá cumplir con los requisitos de las Normas ASTM C 150 ó NTP 334.044.

3.4 CEMENTOS HIDRAULICOS COMBINADOS

Los cementos hidráulicos combinados son el producto obtenido de la pulverización conjunta del clinker de cemento portland y un material reactivo que posee propiedades puzolánicas, con la adición eventual de sulfato de calcio. Estos cementos pueden igualmente ser preparados por mezcla de los ingredientes finamente molidos. En ambos casos deben cumplir con los requisitos de la Norma ASTM C 595.

En el campo de los cementos hidráulicos combinados, en el Perú se fabrican los cementos puzolánicos Tipos IP, IPM, y IS. El cemento puzolánico Tipo IP es

un cemento portland con un porcentaje adicionado de puzolana entre 15% y 45%, que debe cumplir con los requisitos de las Normas ASTM C 595 ó NTP 334.044

El cemento puzolánico Tipo IPM es un cemento portland con un porcentaje adicionado de puzolana menor del 15%, que debe cumplir con los requisitos de las Normas ASTM C 595 ó NTP 334.044. Del cemento puzolánico IS no se tiene mayor información.

3.5 MATERIAL CEMENTANTE

En el caso de los cementos combinados se entiende por puzolana a cualquier material que, pulverizado, fija hidróxido de calcio a la temperatura ambiente formando, en presencia del agua, compuestos que poseen propiedades hidráulicas.

El material que posee propiedades puzolánicas puede ser natural, caso de la tierra de diatomeas, rocas opalinas, esquistos, cenizas volcánicas, pumitas, etc; material calcinado, como los anteriormente nombrados y algunas arcillas y esquistos; o un material artificial obtenido como subproducto, tal como las cenizas, escoria de altos hornos y microsílices.

- a. Las puzolanas naturales se incorporan al cemento principalmente debido a su capacidad de reaccionar en presencia del hidroxido de calcio y el agua, permitiendo un incremento en la resistencia en edades posteriores, disminución del contenido de cemento, modificación del color, incremento en la durabilidad en presencia de sulfatos, e inhibición de la reacción álcali-agregados. Las desventajas incluyen una menor resistencia inicial, un tiempo de curado más largo, incremento en los requerimientos de agua, y problemas derivados del manejo de un material adicional.
- b. Las escorias de alto horno finamente molidas pueden ser empleadas como un material cementante separado, añadido a la tanda, o como un ingrediente de los cementos combinados. Sus principales constituyentes son compuestos de calcio, magnesio, sílice, alúmina y oxígeno. Son compatibles con el cemento portland en un amplio rango de proporciones. El comportamiento de una escoria determinada depende fundamentalmente de las características del cemento con el cual es empleada. Generalmente se obtienen incrementos en la resistencia con cementos que tienen alto contenido de C3A y alta fineza.
- c. Las cenizas son el residuo finamente dividido de la combustión del carbón. Contienen partículas esféricas muy pequeñas de material vitreo con propiedades puzolánicas. Son materiales puzolánicos, tendiendo a ser más reactivas aquellas con alto contenido de calcio. Son compatibles con los cementos portland. La cantidad de ceniza empleada puede variar de

menos del 5% a más del 40%. La cantidad mínima de cenizas por resistencia a los sulfatos es variable pero se acepta que no debe ser menor del 20%. Pueden ser útiles para controlar los efectos de la reacción álcali-agregado. Sus principales problemas son menores resistencias iniciales, irregularidad en la incorporación de aire, tiempos de fraguado mayores, y necesidad de prolongar el tiempo de curado.

- d. Las microsilices tienen un diámetro de un centésimo del correspondiente al cemento y su superficie específica Blaine es 50 veces mayor. Tienen alta reactividad puzolánica y combinadas con el cemento y un superplastificante incrementan la resistencia y durabilidad y disminuyen la permeabilidad.

4. FABRICACION DEL CEMENTO

4.1 SINTESIS

Para la fabricación del cemento portland se procede, esquemáticamente, de la siguiente manera:

La materia prima, material calizo y material arcilloso, se tritura, mezcla y muele hasta reducirla a un polvo fino. Los procedimientos de mezcla y molido pueden efectuarse en seco o húmedo. La dosificación de los materiales debe ser la adecuada a fin de evitar perjuicio en la calidad.

El polvo fino pasa a un horno rotatorio donde es calentado lentamente hasta el punto de clinkerización. En la etapa inicial del proceso de calentamiento el agua y el anhídrido carbónico son expulsados. Al acercarse la mezcla a las regiones más calientes del horno se producen las reacciones químicas entre los constituyentes de la mezcla cruda. Durante estas reacciones se forman nuevos compuestos, algunos de los cuales alcanzan el punto de fusión.

El producto resultante, clinker, cae a uno de los diversos tipos de enfriadores, o se deja enfriar al aire. Posteriormente se combina con un porcentaje determinado de yeso y el conjunto se muele hasta convertirlo en un polvo muy fino al que se conoce como cemento portland.

4.2 MATERIAS PRIMAS

Al definir el clinker se indicó que el crudo del cual procede está constituido por mezclas de materias primas de naturaleza caliza y arcillosa. Las calizas, esencialmente silicatos cálcicos, y las arcillas, principales aportadoras de sílice junto con sus intermedias las margas, aportadoras de alúmina y hierro, constituyen de las que pudiera llamarse materias primas principales para la fabricación del cemento portland.

Al lado de este grupo se sitúa el de las materias primas auxiliares o de corrección, que pueden ser naturales o artificiales. Ellas aportan uno o varios de los componentes en que las materias primas pueden escasear. Estos componentes son, en general, los de tipo ácido, también llamados factores hidráulicos e incluyen el anhídrido silíceo, el óxido de alúmina y el óxido férrico.

Cuantitativamente el componente más importante del cemento es la cal, siguiéndola a gran distancia la sílice, a ésta la alúmina y finalmente el óxido de hierro.

Como ya se ha indicado el grupo de los componentes principales incluye:

Sílice (anhídrido silíceo) SiO_2

Cal (óxido cálcico)..... CaO

Alúmina (óxido alúmino) Al_2O_3

Oxido Férrico Fe_2O_3

De estos componentes, la alúmina y el óxido férrico en conjunto, como aportadores de fase líquida, reciben el nombre de sesquióxidos y su suma se suele representar con la fórmula convencional R_2O_3 .

La sílice y la cal constituyen, en conjunto, aproximadamente del 70% al 75% del total del clinker, en forma de silicatos cálcicos de distinta basicidad.

La alúmina y el óxido férrico reciben el nombre de fundentes porque, conjuntamente con la magnesia y los álcalis, constituyen la fase líquida del clinker y facilitan por ello las reacciones entre la sílice y la cal. Forman con esta última los aluminatos.

El siguiente cuadro da una idea de la composición de óxidos del cemento:

CaO 60% al 67%

SiO_2 17% al 25%

Al_2O_3 3% al 8%

Fe_2O_3 0.5% al 6%

4.2.1 LA CAL

Cuantitativamente es el componente más importante del cemento. La roca caliza es la que proporciona principalmente el CaCO_3 , el cual a su vez

proporciona la cal que interviene en la formación de los cuatro compuestos principales del cemento.

La roca caliza al recalentarse se disocia en cal viva (CaO) y en anhídrido carbónico (CO_2). Este proceso se efectúa rápidamente a 1000°C , cuando el material adquiere un color rojo vivo. La cal viva remanente no difiere mucho en su aspecto inicial pero ha experimentado una pérdida de peso del 44% debido al desprendimiento del anhídrido carbónico. Por este motivo su porosidad es mayor que la de la caliza original.

Los pequeños poros absorben rápidamente el agua de apagado, reaccionando el óxido de calcio con el agua para transformarse en hidrato cálcico. Esta reacción química se produce con expansión de volumen aproximadamente en un 20%.

Las partículas de hidrato cálcico son muy pequeñas y esta masa de granulometría muy fina produce fuerza aglomerante al secarse paulatinamente. Sin embargo, el verdadero endurecimiento del mortero de cales producido por el anhídrido carbónico presente en el aire el cual, al secarse el mortero, penetra gradualmente a través de los poros transformándose el hidróxido de calcio en carbonato de calcio petrificado.

El mortero de cal endurecida tiene resistencias bajas pero presenta un grado considerable de elasticidad y constancia de volumen bajo condiciones variables de humedad.

En el análisis de las combinaciones cal-sílice se presentan condiciones distintas ya que se entra en el campo de las dimensiones coloidales a las cuales se debe en parte la alta resistencia de los cementos.

4.2.2 LA SILICE

La sílice se presenta en forma más o menos pura como cuarzita, arenisca, o arena de cuarzo. La sílice es un material muy resistente, completamente insoluble en agua, resistente al ataque de los ácidos excepto el fluorhídrico. Por acción del calor puede sufrir transformaciones en su forma cristalina, acompañadas de notables variaciones en volumen. Químicamente no sufre variación alguna. Al alcanzar los 1900°C se funde y al enfriarse se endurece constituyendo una masa vitrea, conocida como vidrio de cuarzo.

Siendo los compuestos de cal y sílice difícilmente solubles, se produce un precipitado cuando se mezcla una solución que contiene sílice con otra que contiene cal, produciéndose un cuerpo sólido, fundamentalmente una masa gelatinosa de baja resistencia y alguna adherencia.

El anterior se describe como un proceso llamado de formación de gel, entendiéndose como tal a una masa que es compacta e integrada por partículas

coloidales. Estas tienen un diámetro que va del molecular y aquel que es sólo visible al microscopio y una superficie específica muy alta.

4.2.3 ALUMINA

La alumina u óxido de alumina (Al_2O_3) se relaciona con la arcilla que contiene dicho óxido en cantidad considerable. Se considera en la composición normal de la arcilla que el porcentaje de sílice es aproximadamente el doble del correspondiente a la suma de la alumina y el óxido férrico, y el de la alumina es el doble del de óxido ferrico.

En la química de los cementos la alumina tiene importancia ya que al igual que la sílice puede unirse en combinación geliforme con la cal y el agua.

4.2.4 OXIDO DE FIERRO

El óxido ferrico es el integrante más importante de los minerales férricos y la mayor parte de los minerales lo contienen. Todos los cementos poseen, aún en muy pequeñas cantidades, óxido férrico. excepto el cemento blanco que debe estar libre de este óxido.

En la fabricación del cemento es necesaria la presencia del óxido férrico, en muy pequeña cantidad, para evitar dificultades en la fabricación del cemento dado que el Fe_2O_3 actúa como fundente permitiendo que las combinaciones químicas indispensables para la elaboración del cemento se efectúen a temperaturas muy inferiores a aquellas que de otro modo serían necesarias.

4.2.5 CONSIDERACION FINAL

Estos óxidos, aportados por la materia prima caliza y arcillosa, reaccionan entre sí en el horno formando una serie de productos más complejos - los compuestos principales - y, aparte de un pequeño residuo de cal no combinada, la cual no ha tenido el tiempo suficiente para reaccionar, se alcanza un estado de equilibrio químico.

Este equilibrio no se mantiene durante el proceso de enfriamiento y la velocidad del mismo afectará el grado de cristalización y el volumen de vidrio presente en el clinker enfriado. Si bien las propiedades del vidrio difieren considerablemente de las de los otros compuestos cristalinos, se puede considerar al cemento como que ésta en equilibrio congelado, esto es que se asume que el producto enfriado reproduce el equilibrio existente a la temperatura de clinkerización. Este criterio es el que se aplica en el cálculo de la composición de los compuestos principales.

4.3 MODULOS

Las relaciones entre los componentes del cemento portland han constituido la base para las condiciones químicas que habían de cumplir los crudos y, por consiguiente, fijar la dosificación o proporciones en que habían de mezclarse, en cada circunstancia las materias primas integrantes de los mismos.

En relación con proceso de dosificación de crudos, conviene hacer mención de tres relaciones principales, las cuales han recibido los nombres de Módulo Hidráulico; Módulo de Silicatos; y Módulo Aluminico, más conocido como Módulo de Fundentes.

El Módulo Hidráulico (MH) relaciona la cal con los componentes ácidos, y se expresa en tantos por ciento ponderales. Se ha establecido para el mismo un valor óptimo de 2 o ligeramente superior. Generalmente la limitación de valores del Módulo Hidráulico se establece así:

$$1.7 < MH < 2.2$$

La ecuación que permite determinar el módulo hidráulico es la siguiente:

$$MH = \text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

Se considera que cuando el valor del MH es inferior a 1.8 el aglomerante ha de tener resistencias muy bajas y cuando es mayor de 2.2, el cemento, una vez puesto en obra, sufrirá a los pocos días o semanas un fenómeno de agrietamiento por expansión.

Las tensiones internas que produce esta expansión son debidas a un contenido «excesivo» de CaO en la mezcla cruda en relación a las cantidades presentes de óxidos ácidos, quedando en la calcinación un porcentaje demasiado elevado de CaO libre sin combinar.

Este exceso de CaO se hidroliza con adición de una molécula de agua y pasa a $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Esta reacción se produce con suficiente retardo en las sales estabilizadas por reacción a alta temperatura, como son las contenidas en los cementos, y se hidratan después que el aglomerante haya fraguado e incluso esté en período de endurecimiento.

El aumento de volumen de esta reacción hace crecer las tensiones de expansión internas y cuando rebasan el módulo de elasticidad de la masa de cemento fraguado, del mortero o del concreto, se manifiestan en forma de grietas centrífugas.

A Kuhl se debe la introducción de otros dos módulos igualmente empíricos: El Módulo de Silicatos (MS) y el Módulo Aluminico (MF), llamado también Férreo o de Fundentes. Ambos están expresados en tantos por ciento ponderales y sus ecuaciones los definen así:

$$MS = \text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$$

$$MF = \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Ambos módulos surgieron para corregir el hecho que, por estar expresado el módulo hidráulico en tantos por ciento y no en moles, y ser mucho mayor la capacidad de combinación de la sílice con la cal, que la de la alúmina, y la de ésta mayor que la del óxido ferrico, los cementos ricos en sílice, y los altos en óxido férreo, tenían a su vez un Módulo Hidráulico menor que los bajos en este componente.

La limitación de valores de estos módulos, generalmente aceptadas para el cemento portland, son las siguientes:

$$1.2 < MS < 4.0 \quad \text{promedio: } 2.4 \text{ a } 2.7$$

$$1.0 < MF < 4.0 \quad \text{promedio: } 1.5 \text{ a } 2.5$$

Cuanto más alto es el valor del Módulo de Silicatos, dentro de los límites indicados, mayor contenido total de C3S + C2S se tendrá en el clinker, así como un mayor potencial de resistencia a cualquier plazo. Cuando MS es mayor de 3.5 se pueden producir eventualmente características expansivas; si es menor de 2.0 las resistencias del cemento son bajas.

El Módulo aluminico o de fundentes expresa la relación entre la alúmina y el óxido férreo. Este valor no tiene relación con las resistencias obtenibles, pero está relacionado con una menor o mayor facilidad de calcinación de las mezclas crudas. En casos extremos se considera al cemento blanco, rico en alúmina sin óxido férreo y el cemento mineral, rico en óxido férreo y sin alúmina.

Cuando el MF está comprendido entre 1.5 y 2.0 la combinación de los óxidos a alta temperatura es más rápida, acentuándose la dificultad de calcinación cuando es mayor de 2. La adición de Fe₂O₃ a los crudos tiene entre otras importantes razones su papel como contribución al proceso de fusión de crudos en el horno de clinkerización.

Los tres módulos anteriormente mencionados tienen importancia por estar relacionados con aspectos de fabricación y utilización del cemento portland y, en particular, con los problemas de dosificación que más adelante se van a presentar.

Adicionalmente a los tres módulos principales se han desarrollado otros módulos e índices, los cuales se presentan a continuación:

El Módulo Silíceo (Ms) el cual relaciona el porcentaje de sílice con el de alúmina, considerándose adecuada la relación cuando el módulo es mayor de 3. El Índice de Cementación está expresado en tantos por ciento y se considera que su valor teórico ideal es de 1.0

$$I.C = 2.8 \text{ SiO}_2 + 1.1 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.7 \text{ Fe}_2\text{O}_3/\text{CaO} + 1.4 \text{ MgO}$$

El Índice de Acidez ha sido propuesto para reemplazar al Módulo de Silicatos:

$$I.A. = 2.8 \text{ SiO}_2/1.1 \text{ Al}_2\text{O}_3 * 0.7 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

El Módulo de Agresividad es el cociente de la suma de los componentes del cemento que elevan la resistencia de éste a los agentes agresivos entre la suma de aquellos que lo rebajan. Cuanto más alto el Módulo de agresividad mayor la resistencia del concreto a ataques químicos:

$$M.A. = \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3$$

El Máximo contenido de cal en un clinker está relacionado al Módulo de Fundentes (MF)

Si $MF > 0.64$ el valor CaO debe ser:

$$\text{CaO} = 2.8 \text{ SiO}_2 + 1.65 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.35 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

Si $MF < 0.64$ el valor CaO debe ser:

$$\text{CaO} = 2.8 \text{ SiO}_2 + 1.10 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.70 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

Se ha establecido el Grado Saturación de Cal (GS) sobre la base que lo importante no es el valor absoluto del contenido de cal de un cemento, sino la relación entre el contenido real y el máximo que puede contener de acuerdo a sus factores hidráulicos. Se estima que:

$$GS = 100 \text{ CaO}/2.8 \text{ SiO}_2 + 1.65 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.7 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

Se considera que la Cal Estándar es la máxima cantidad de cal combinable en la práctica, cuando las condiciones de cocción y enfriamiento transcurren normalmente. Está dada por la ecuación:

$$\text{CaEst} = 2.8 \text{ SiO}_2 + 1.1 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.7 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

A partir de la ecuación indicada se ha definido el estándar de cal (SC) como el cociente de la cantidad efectiva de cal de un cemento y la máxima que puede tener combinada en condiciones reales (CaEst), siendo la expresión la siguiente:

$$SC = 100(CaO - 0.7 SO_3) / (2.8 SiO_2 + 1.1 Al_2O_3 + 0.7 Fe_2O_3)$$

Para el numerador no se puede considerar como cal efectivamente presente al total de CaO, sino es necesario restar la cantidad de cal combinada con el yeso, la cual es 0.7 veces el valor de SO₃ determinado en el análisis.

Los valores de SC para cementos portland están comprendidos entre 85% y 100%. Valores menores corresponden a porcentajes elevados de C₂S en tanto que en un cemento «saturado de cal» toda la sílice se encontraría en forma de C₃S.

La cantidad de sulfato de calcio adicionado al cemento viene dada por la ecuación:

$$SO_4Ca = 1.7 SO_3$$

4.4 DOSIFICACION DE CRUDOS

En el proceso de fabricación del cemento portland es necesario y conveniente ejercer gran cuidado en la dosificación de crudos, dado que pequeñas variaciones en las proporciones establecidas para los componentes en la mezcla de crudos pueden ser suficientes para alterar las características de calcinación de la mezcla o las propiedades finales del cemento.

La determinación del óptimo contenido de cal está limitada por el hecho que si el contenido es demasiado bajo la resistencia inicial del cemento será pequeña, y si el contenido de cal es excesivo existirá el peligro de inestabilidad de volumen, dado que la cal que queda sin combinar es fuente potencial de expansión, con el consiguiente agrietamiento de morteros y concretos.

Igualmente, existen limitaciones en cuanto a óptimos contenidos de sílice, alúmina y óxido de hierro. Si el contenido de cal es fijo y existe un alto contenido de sílice, con la consiguiente disminución de la alúmina y el óxido de hierro, la temperatura de calcinación será elevada, perdiéndose la especial influencia del alto contenido de cal.

Por otra parte, si el contenido de cal es excesivamente bajo, con el correspondiente incremento en los contenidos de alúmina y óxido de hierro, el cemento será rico en compuestos de alúmina y tendrá un fraguado rápido, con todas las ventajas e inconvenientes que ello puede significar.

El Módulo Hidráulico es un índice importante. Un crudo dará un clinker tanto mejor cuanto mayor sea su módulo hidráulico. En efecto, valores altos del cociente indican una gran saturación de los factores hidráulicos por parte de la cal. A su vez esto quiere decir que habrá una gran proporción de sílice combinada en forma de silicato de mayor basicidad, el tricálcico, que es el que contribuye a las altas resistencias del cemento.

Por otro lado, un módulo hidráulico elevado supone en el crudo una proporción aún mayor de material calizo frente a materiales margosos o arcillosos y, por consiguiente, una proporción aún menor, de elementos fundentes, formadores de fase líquida. En consecuencia, los crudos de módulo hidráulico muy elevado son difíciles de cocer, exigen una mayor temperatura de cocción y, si no alcanzan la suficiente, queda una parte de su cal sin combinar, lo que da a los cementos fabricados con ellos carácter expansivo. Por esto, la fabricación de cementos ricos en cal, de elevadas resistencias a corto plazo, es más cara en lo que se refiere al aspecto de cocción y exige mayor vigilancia. También supone un mayor quebranto del material refractario de los hornos.

Por el contrario, crudos de módulo hidráulico bajo, dentro de los límites especificados, o con un estándar de cal o grado de saturación de cal bajos, dan cementos de bajo calor de fraguado, de endurecimiento lento, aunque con buenas resistencias a largo plazo, los cuales son aptos para obras de concreto en grandes masas. Estos crudos son de cocción más fácil y barata, puesto que no se precisa forzar la temperatura ni, por lo tanto, el refractario.

En cuanto al Módulo de Silicatos, también sus valores tienen significación en la fabricación y utilización del cemento. Los valores bajos del módulo de silicatos corresponden a crudos relativamente escasos en sílice, o relativamente abundantes en fundentes. Son, por lo tanto, crudos que proporcionan una mayor cantidad de fase líquida en el horno. Esto facilita la cocción, no siendo preciso alcanzar temperaturas muy elevadas para conseguir la total combinación de los componentes.

Los crudos con módulo de silicatos bajo, dan clinkerés ricos en aluminatos y ferritos que, si se enfrían rápidamente, son abundantes en fase vítrea, pero que si experimentan un enfriamiento lento contienen una gran cantidad de aluminatos cristalizados que pueden ser expansivos y, en todo caso, dar cementos cuyo fraguado puede ser demasiado rápido y difícil de regular. También el enfriamiento lento puede dar lugar a la cristalización de la magnesia en forma de periclasa, la cual es la causa principal de la expansión en el autoclave.

Un caso de crudos con módulo de silicatos elevado, por su escaso contenido de óxido férrico, lo ofrecen los crudos para cemento blanco. En tales condiciones se facilita a veces la cocción mediante adición de fundentes que no comunican color al cemento.

Con objeto de elevar, cuando es necesario, el módulo de silicatos de un crudo, se utilizan adiciones de arena.

Para rebajar dicho módulo se adicionan piritas o bauxitas como materiales aportadores de fundentes.

El Módulo de Fundentes tiene importancia en la fabricación y utilización del cemento. La relación alúmina/hierro determina la cantidad de la primera que queda disponible para formar aluminatos, ya que el resto se combina con el hierro en forma de aluminoferritos.

Las consideraciones anteriores hacen comprender los múltiples problemas que significa la dosificación de crudos, la cual es necesario plantear siempre en forma de ecuaciones en cuyo cálculo intervienen como datos los de composición de las materias primas principales y auxiliares que se dispone.

Es muy raro el caso en que la composición de una sola materia prima es tal que, una vez calcinada, el producto resultante responda a la composición del clinker de cemento portland. Queda, por ello, descartada la posibilidad de disponer de crudos constituidos por un sólo material que disponga de todos los elementos.

4.5 MEZCLADO Y MOLIENDA DEL CRUDO

El mezclado y molienda de los materiales integrantes de la materia prima puede efectuarse con los materiales secos, en cuyo caso recibe el nombre de proceso seco, o añadiendo agua a los mismos para producir una pasta, en cuyo caso recibe el nombre de proceso húmedo.

4.5.1 PROCESO SECO

En los procesos seco y semiseco, los materiales crudos son triturados y mezclados en las proporciones correctas dentro de un molino, en el que son reducidos a un polvo fino. Este polvo, conocido como polvo de harina, es bombeado a un silo de mezclado en el que se realiza un ajuste final en las proporciones requeridas para la fabricación del cemento.

A fin de obtener una mezcla íntima y uniforme, el polvo es mezclado, generalmente por medio de aire comprimido, induciendo un movimiento ascendente del polvo con disminución de su densidad aparente. De esta manera se obtiene una mezcla uniforme, la cual puede también lograrse por mezclado continuo.

El polvo ya mezclado se tamiza y se coloca en un disco rotatorio granulador, al mismo tiempo que se añade agua, en la proporción de aproximadamente 12%

en peso del polvo. De esta manera se forman bola duras de aproximadamente 1/2" de diámetro. Este procedimiento es necesario ya que si se colocase el polvo directamente en el horno no permitiría el flujo de aire y el intercambio de calor necesario para las reacciones químicas de formación del clinker de cemento.

Los granulos son desecados por un proceso de precalentamiento empleando los gases calientes del horno.

Luego los gránulos ingresan al horno, siendo las operaciones posteriores similares ya sea que el crudo haya sido preparado por vía seca o húmeda.

La ventaja relativa del proceso seco es que, desde que el contenido de humedad es sólo del 12%, si se lo compara con el 40% de humedad de la lechada empleada en el proceso húmedo, los hornos de cocción son considerablemente menores. El volumen de calor requerido es también mucho menor, aunque hay que considerar el contenido de humedad de los materiales crudos, generalmente 6% a 10%. El proceso, por tanto, es más económico, pero sólo cuando los materiales crudos están comparativamente secos.

4.5.2 PROCESO HUMEDO

Cuando se emplea greda o creta como materia prima, se muele este material finamente y luego se dispersa en agua, empleando un molino de lavado. Igualmente, la arcilla es pulverizada y mezclada con agua, generalmente en un molino similar. Las dos mixturas se bombean para obtener una mezcla de proporciones predeterminadas, la cual se pasa a través de una serie de tamices. La lechada resultante fluye hacia tanques de almacenamiento.

Cuando se emplea caliza como materia prima, luego de extraída es triturada, generalmente empleando dos trituradores de tamaño progresivamente más pequeño, y luego el material resultante pasa a un molino de bolas donde se junta con la arcilla que previamente ha sido dispersada en agua. En este molino se completa la conversión de la caliza a polvo, bombeándose la lechada resultante a tanques de almacenamiento. A partir de este momento el proceso es el mismo, independientemente de la naturaleza de los materiales crudos.

La lechada es un líquido de consistencia cremosa, con un contenido de agua que varía entre 35% y 50%. Posee solamente una pequeña porción del material, aproximadamente el 2%, mayor que el Tamiz N° 170.

Generalmente existen en la fábrica varios tanques de almacenamiento en los que se mantiene la lechada, evitándose la sedimentación de los sólidos en suspensión por agitado mecánico o por inyección de aire comprimido. El contenido de cal de la lechada es controlado a través de la dosificación de los materiales calcareos y arcillosos. Puede efectuarse, a fin de alcanzar la

composición química requerida, un ajuste final mezclando lechadas de diferentes tanques de almacenamiento.

Normalmente la lechada pasa del tanque de almacenamiento a un filtro, donde el agua es reducida, y luego al horno para el proceso de secado y cocción.

4.6 COCCION DEL CRUDO

Las operaciones de dosificación, molturación, corrección y homogeneización, previas a la calcinación, tienen notable influencia en los resultados de ésta, tanto en cuando a la marcha del proceso en el horno como en lo relativo a la calidad y características del clinker.

Como ya se ha indicado, la molturación del crudo debe ejecutarse de manera que se obtenga alta finura, dado que la falta de ésta puede ser causa de una defectuosa combinación de los factores hidráulicos con la cal, con la consiguiente presencia de cal libre en el clinker y la escasez de silicato tricálcico en relación con el que debería tener según la composición de las materias primas y la dosificación, aún cuando la cocción de dicho crudo se efectúe en las condiciones óptimas.

La homogeneización es indispensable y tanto más cuanto más diferentes sean en sus características físicas las materias primas.

Una gran diferencia de dureza hace que las materias se refinen en distinto grado, creandose una heterogeneidad en cuanto a la finura alcanzada en cada una de ellas. Las diferencias de peso específico, unidas a veces a esta falta de homogeneidad en la finura, hacen que tiendan a segregarse los materiales de los crudos. A veces, cuando las diferencias de dureza y peso específico son notorias y sus efectos se suman, la operación de homogeneización, si no se realiza de un modo adecuado o no se vigila de manera eficaz, da resultados contrarios a los esperados.

La homogeneización es necesaria en el proceso de vía seca, ya que en vía húmeda la propia naturaleza del proceso proporciona un grado mayor de homogeneidad del crudo y se elige este proceso en lugar del seco, por la mayor necesidad y facilidad de homogeneización.

La heterogeneidad de los crudos, lo mismo que la falta de finura, da lugar a una combinación defectuosa o incompleta de los elementos ácidos de la cal, aún cuando la dosificación sea correcta y la clinkerización se efectúe en las debidas condiciones. El resultado es la obtención de un clinker con peor calidad dado su mayor contenido de cal libre y su menor proporción de silicato tricálcico, que puede dar lugar a la vez a un cemento frío y expansivo.

Otro factor que influye en la clinkerización es la cantidad de fase líquida. Cuanto más fusible es el crudo, mayor cantidad de fase líquida produce a una temperatura dada, o menor temperatura exige para formar una cantidad determinada de ella. En consecuencia, las reacciones de formación del clinker pueden transcurrir en menor tiempo, de manera más completa y a menor temperatura puesto que la fase líquida es el vehículo o intermediario a través del cual se produce una parte de dichas reacciones.

Otra parte no despreciable se produce en fase sólida. Los crudos ricos en elementos fundentes se cuecen mejor y consumen menos calorías. La cantidad de fase líquida depende de la composición del crudo, particularmente de la alúmina y del óxido ferrico, y en menor proporción de la magnesia y de los álcalis. Se refleja en el módulo de silicatos. Pese a lo indicado, no se puede forzar la composición del crudo para obtener una gran cantidad de fase líquida porque eso tiene también sus inconvenientes.

4.7 ENFRIAMIENTO DEL CLINKER

Durante la clinkerización del material crudo existen una fase sólida y una líquida. Ambas llegan a alcanzar un equilibrio estable de composición para una temperatura dada, por ejemplo la máxima alcanzada en el proceso, con tal que el material sometido a ella lo esté el tiempo suficiente para lograr su transformación total a las condiciones finales de dicho equilibrio.

Si la temperatura se eleva por encima o desciende por debajo de la dada, las condiciones de equilibrio han de variar, puesto que dependen de la temperatura y han de ser, por lo tanto, distintas en el estado inicial que en el final. Es decir, el equilibrio se desplaza. Pero para que éste se desplace de una forma completa y el sistema alcance plenamente las condiciones correspondientes al estado final, es preciso que la variación de temperatura tenga lugar de un modo gradual y lento, de manera que las modificaciones del sistema puedan seguir a la par las modificaciones de temperatura. O, lo que es lo mismo, entre el estado inicial de partida y el estado final ha de haber equilibrio en todos y cada uno de los estados intermedios.

Si la variación de temperatura es brusca y no se ve acompañada en la misma medida por la variación de composición del sistema para alcanzar las condiciones de equilibrio correspondientes al estado final, éstas no se dan. Entonces, si se trata de un enfriamiento, pueden ocurrir dos casos: uno, que el descenso de temperatura sea tan rápido que no permita moverse al sistema, y el equilibrio quede congelado en su estado inicial correspondiente a la temperatura elevada; y otro, que el enfriamiento sea de tipo intermedio entre el lento o de equilibrio móvil continuo y el rápido o de equilibrio congelado a la temperatura inicial. Lo que sucede en este último caso, que es el que se da con mayor frecuencia en la técnica de fabricación del clinker, es también algo

intermedio entre lo que ocurre con el enfriamiento lento y con el enfriamiento rápido.

Si el enfriamiento es muy lento, las fases sólidas y líquidas del clinker formadas a la alta temperatura de clinkerización tienen tiempo de reaccionar entre sí para buscar en cada caso las condiciones de nuevos equilibrios a temperatura cada vez más baja. Por otra parte, a medida que ésta desciende, van cristalizando sucesivamente los distintos constituyentes que se han formado y, al final, a la temperatura ordinaria se tiene un clinker constituido por especies totalmente cristalizadas.

Entre otras reacciones que tienen lugar durante el enfriamiento se verifica con gran frecuencia, y a veces en gran medida, la descomposición del silicato tricálcico previamente formado, en silicato bicálcico y cal libre.

Si el enfriamiento es muy rápido, no hay tiempo para que tengan lugar dichas reacciones, ni tampoco para que se verifiquen las sucesivas cristalizaciones, sino que se llega a la temperatura ambiente con la composición y las fases correspondientes al equilibrio que existía en las condiciones iniciales de alta temperatura (equilibrio congelado). Todo lo que entonces era fase líquida ahora actúa como fase vítrea, obteniéndose un clinker con mucho vidrio y relativamente escasas especies cristalizadas. En tales condiciones apenas tiene lugar la descomposición de silicato tricálcico en silicato bicálcico y cal libre.

Puesto que con un enfriamiento lento cristalizan todas las fases, también lo hacen la magnesia libre del clinker en forma de periclase y los aluminatos. Así pues, un clinker enfriado muy lentamente, a igualdad de otras condiciones, será más abundante en cal libre, magnesia libre cristalizada (periclase) y aluminatos cristalizados, que otro enfriado muy rápidamente. Así el clinker comercial, por sus condiciones de enfriamiento, tendrá características intermedias.

Por consiguiente, en general, es conveniente y recomendable enfriar muy rápidamente el clinker industrial, con objeto de tener en todo caso cemento del máximo contenido de silicato tricálcico y fase vítrea, es decir de altas resistencias iniciales y gran estabilidad de volumen.

El «templado» del clinker provocado por medio de riegos acuosos a la salida del horno, causa efectos favorables tanto más acusados cuanto mayor es la relación alúmina/óxido férrico.

4.8 LA COMPOSICION DEL CLINKER

Las experiencias de BOGUE han aclarado la aportación específica a la calidad de cada componente del clinker. De ellas se deduce que los silicatos de calcio C3S y C2S, tal como lo indico LE CHATELIER, son los que aportan mayores

resistencias al aglomerante cuya composición integra, En cambio, los C3A y C4AF aportan muy escasas resistencias, en comparación, a largo plazo, aunque el C3A contribuye notablemente a las resistencia iniciales.

El C3S es el compuesto que da mayores resistencias iniciales; por tanto un cemento que contenga una elevada proporción de C3S tendrá una curva de endurecimiento de mayor pendiente y permitirá, en igual de condiciones, un desencofrado más rápido en su puesta en obra. Los cementos de altas resistencias iniciales requieren un contenido de C3S de alrededor del 60%.

Los clinker que tienen un elevado contenido de C3S presentan una alta proporción de CaO en su composición y están clinkerizados a una temperatura suficientemente alta, de modo que el contenido residual de CaO libre sea menor del 1%.

4.9 LA MOLIENDA DEL CLINKER

La molienda del clinker, conjuntamente con una adición de sulfato de calcio, da lugar al cemento acabado. Los molinos empleados son cilindros de acero con tres compartimentos separados por rejillas de paso, llenados aproximadamente a 1/3 de su volumen con bolas de acero al carbono y tres tamaños granulométricos. Cuanto menor es el diámetro y proporción de las bolas en el último compartimento, mayor grado de finura se obtiene en el cemento.

Las composiciones de clinker en las que predomina el C3S son más fácilmente molturables y, en consecuencia, facilitan la reducción de la cantidad de energía que se consume en la molienda.

Para un mayor grado de finura corresponde una mayor superficie de exposición a las reacciones de hidrólisis y, por tanto, a un mayor desarrollo de resistencias y poder hidráulico. El grado de finura de un cemento decide su calidad y el tipo de cemento. La influencia que el tamaño del grano de las partículas del clinker tiene sobre el valor de las resistencias es de gran interés y ha sido materia de muchos estudios que las relacionan con el grado de hidratación conseguido.

La forma más usual de medir la finura del cemento mediante el porcentaje de residuo a diferentes tamices, o mediante la determinación de la superficie específica Blaine, que se obtiene a partir de la permeabilidad al aire que pasa a través de cilindros de cemento compactados en condiciones estándar. Se expresa en cm²/gr. Este método esta normalizado por la Norma ASTM C 204.

Cualquiera de las formas de medir el grado de fineza no permite establecer relaciones válidas con las resistencias de los aglomerantes, porque son medidas que no dan un valor de la verdadera distribución de tamaños granulométricos dentro del aglomerante que depende del tipo y condiciones de la molienda,

según sea un circuito cerrado o abierto, de los índices de molturabilidad, de las cargas en t/hora de estos circuitos, de la eventual presencia de fracciones minoritarias de materiales de adición blandos, según el tipo de cemento, etc. No obstante son una guía para situar la calidad aproximada del cemento.

Al introducir yeso en el cemento para conseguir un intervalo adecuado en los tiempos de fraguado, se modifican los valores de su composición analítica de óxidos. Este es el cemento acabado cuya distribución se efectuará en la forma conveniente en cada caso.

4.9 LA METEORIZACION DEL CEMENTO

La conservación del cemento acabado requiere su preservación de la humedad ambiental para evitar una anticipada reacción con el agua en el momento de su puesta en obra, lo que supondría una pérdida de calidad gradual, con grave peligro si no es detectada previamente.

Este fenómeno, llamado de meteorización, da como consecuencia un aumento del valor de la pérdida al fuego en sus dos componentes; H₂O de la hidratación de los silicatos y CO₂ procedente de la carbonatación del hidróxido cálcico formado por la hidrólisis de los silicatos. Estas son las razones que limitan el valor de la pérdida al fuego.

En líneas generales se puede decir que un cemento es tanto más fácilmente alterable cuanto más grado de fineza y mayor contenido de óxidos alcalinos solubles Na₂O y K₂O posee. Estos óxidos se hallan en forma de sulfatos que absorben preferentemente la humedad de la atmósfera por higroscopicidad.

4.10 PRESENCIA DEL YESO

En tanto que el C₃S molturado a una fineza análoga a la del cemento tarda en fraguar, sin ninguna sustancia retardante, unas tres horas y el C₂S una cuatro horas, el clinker portland molturado a finura análoga lo hace en pocos segundos. Esta diferencia se debe a la presencia en él de C₃A y C₄AF que poseen una velocidad de hidrólisis mucho mayor. Mediante la adición de yeso se consigue retrasar este tiempo.

La cantidad de yeso necesaria para regular el fraguado del cemento portland oscila, según su pureza, entre un 6% y un 12% sobre el clinker. Estas cifras dan un contenido de SO₃ de entre 2% y 3.5% y consiguen retrasar el fraguado unos 45 minutos, tiempo que se considera adecuado para situar el concreto plástico en su posición en obra y darle la forma requerida antes de su definitivo endurecimiento.

Los criterios sobre las causas de este retardo del fraguado son complicados y se resumen en los siguientes puntos:

- a. Aportación de iones Ca^{++} que dan el SO_4Ca frenando el desplazamiento del equilibrio de la hidrólisis de los compuestos cálcicos por efecto del ion común.
- b. Inmediata precipitación de los iones Al^{+++} en forma de trisulfoaluminato cálcico hidratado (etringita), antes que estos iones actúen como coagulantes del sistema coloidal antes indicado.
- c. Esta precipitación del trisulfoaluminato actúa además «físicamente» bloqueando por su insolubilidad en agua la superficie del C3A retrasando su hidrólisis.

5. LOS COMPUESTOS PRINCIPALES DEL CEMENTO

5.1 COMPOSICION MINERALOGICA DEL CLINKER

El clinker, tal como él sale de los hornos, puede asimilarse a una roca artificial cuya génesis es comparable a la de las ricas igneas de origen eruptivo.

Petrográficamente se le considera como un conglomerado de elementos cristalinos y fase vítrea, formado por consolidación de un crudo el cual ha sido parcialmente fundido al ser sometido a temperaturas del orden de 1200 a 1500°C.

Visto al microscopio, el clinker se presenta con la apariencia de una roca hipocristalina, de estructura granular muy fina y poco vidrio. Se aprecian constituyentes, algunos de los cuales se han homologado como minerales resultantes de la consolidación de sistemas en equilibrio, formados a partir de los óxidos que figuran en la composición química del cemento.

Entre estos constituyentes se distinguen tres grupos:

- El de los silicatos
- El del material intersticial. En este grupo se incluye el vidrio, cuando lo hay.
- El de los óxidos, que en pequeña cantidad forman inclusiones en los constituyentes de los grupos anteriores.

5.2 LOS COMPUESTOS PRINCIPALES

Durante el proceso de fusión de la materia prima que ha de dar origen al clinker se forman silicatos cálcicos, aluminatos cálcicos y ferritos de composición compleja. De ellos los componentes básicos del cemento son los silicatos cálcicos. La fórmula de composición de los cuatro compuestos principales, así como la forma abreviada de los mismos es:

Silicato Tricálcico $3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$

Silicato Bicálcico $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$

Aluminato Tricálcico $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$

Ferroaluminato tetracálcico $4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$

El porcentaje relativo de los cuatro compuestos principales norma las propiedades del cemento portland. Dicho porcentaje depende de la proporción relativa entre la cal y los componentes ácidos - sílice, alúmina y óxido férrico - también conocidos como factores hidráulicos.

Normalmente se acepta que los porcentajes límites de los compuestos principales están dentro de los siguientes valores:

C_3S 30% a 60%

C_2S 15% a 37%

C_3A 7% a 15%

C_4AF 8% a 10%

5.3 MECANISMO DE FORMACION DE LOS COMPUESTOS

Esquemáticamente, el mecanismo de formación de los compuestos sería el siguiente:

Al calentar el crudo en el horno de clinkerización, una parte del óxido de cal se combina con el óxido de hierro y el óxido de alúmina para dar lugar a la formación de una fase líquida esencialmente formada de celita.

La presencia de esta fase líquida contribuye a facilitar y acelerar las reacciones de clinkerización entre partículas sólidas. El óxido de sílice se combina con el óxido de cal para formar silicato bicálcico, que se transforma en silicato tricálcico en presencia del óxido de cal remanente.

Siempre se encontrará en la composición del clinker al silicato bicálcico ya que no es posible transformarlo todo en silicato tricálcico. Debido a ello quedará un exceso de óxido de cal no combinado, al cual se le conoce como «cal libre»

El óxido de magnesia queda, generalmente, en solución sólida en la pequeña cantidad de fase vítrea que se forma durante el enfriamiento muy rápido del clinker. Bajo esta forma el óxido de magnesia no ofrece peligro de expansión posterior, más si cuando es el resultado de una cristalización por enfriamiento muy lento del clinker.

5.4 FORMULAS DE CALCULO

5.4.1 EL CRITERIO BOGUE

Las primeras formulas usadas para la determinación del porcentaje de compuestos principales en un cemento portland, fueron desarrolladas por Bogue partiendo de los siguientes supuestos:

- El porcentaje de óxidos presentes en el cemento, determinados a partir de un análisis químico del mismo.
- La consideración que los compuestos del clinker ya enfriado se hallaban en equilibrio químico a la temperatura ordinaria.
- El total de la masa del clinker ha sido procesado por el quemado en el horno y que una completa cristalización, junto con un proceso de reabsorción, dan como resultado una condición balanceada.

Las fórmulas originales desarrolladas por Bogue han experimentado ligeras modificaciones en sus coeficientes, introducidas por el Comité de Cementos del ASTM. Las actualmente utilizadas son:

En el silicato tricálcico, si la relación del óxido de alumina al óxido de hierro es de 0.64 ó mayor, se aplicará la siguiente ecuación:

$$C3S = 4.071 \text{ CaO} - 7.600 \text{ SiO}_2 - 6.718 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1.430 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 2.852 \text{ SO}_3$$

En el silicato tricálcico, si la relación del óxido de alumina al óxido de hierro es menor de 0.64, se aplicará la siguiente ecuación:

$$C3S = 4.071 \text{ CaO} - 7.600 \text{ SiO}_2 - 4.479 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 2.859 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 2.852 \text{ SO}_3$$

De acuerdo a Bogue, el silicato bicálcico puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$C2S = 2.867 \text{ SiO}_2 - 0.7544 \text{ C3S}$$

De acuerdo a Bogue, el porcentaje de aluminato tricálcico presente en un cemento portland puede ser calculado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$C3A = 2.65 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1.692 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

De acuerdo a Bogue, el porcentaje de ferroaluminato tetracálcico puede ser calculado por la siguiente ecuación:

$$C4AF = 3.043 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

5.4.2 LIMITACIONES DE LAS FORMULAS DE BOGUE

La presencia de material vitreo en el clinker hace que, en general, los porcentajes calculados sean inexactos. Dado que no representan exactamente la verdadera condición los porcentajes obtenidos deben ser tomados como valores de referencia.

Las fórmulas parten del supuesto que los compuestos del clinker enfriado se encuentran en equilibrio químico, siendo así que ya se reconoce que se hayan en «equilibrio bloqueado» correspondiente a una temperatura mucho mayor que la ambiente.

Nunca la materia prima o el clinker en si mismo son homogéneos, siendo más pronunciada la sinterización del clinker en su superficie. En consecuencia tiene lugar una fusión parcial que da lugar a un producto más o menos vitreo durante el enfriamiento.

Debido a la rapidez del enfriamiento, esta corteza vitrea no tiene oportunidad de cristalizar, presentándose diferencias entre los minerales del exterior e interior del clinker. Cuanto más rápida es la velocidad de enfriamiento más alto será el contenido de sustancia vitrea del clinker.

Debido a la presencia de la fase vitrea las cantidades de elementos minerales calculadas son inseguras. Ello se acentúa al no considerar las fórmulas al óxido de magnesio, los álcalis, los compuestos menores, la cal libre, así como la combinada con el anhídrido sulfúrico en forma de yeso.

Ya se acepta que los aluminatos están distribuidos en una gran proporción en los silicatos cálcicos, en la fase ferrita y en el fundente residual, de tal manera que el clinker de cemento portland puede no contener aluminato tricálcico como un todo, o contenerlo sólo en pequeñas cantidades.

En el caso del aluminato tricálcico, al poder estar el ion aluminio distribuido a diversos compuestos, la fórmula de Bogue daría el valor potencial más no el real, presentando el caso más desfavorable y, en consecuencia, podría ser incorrecto certificar la resistencia a la corrosión de un cemento sólo sobre la base de un contenido de aluminato tricálcico.

A pesar de las limitaciones anteriores, las fórmulas desarrolladas por Bogue mantienen su vigencia, principalmente porque permiten calcular muy rápidamente el porcentaje aproximado de los compuestos principales.

5.4.3 EL CRITERIO DAHL

El francés Dahl ha propuesto ecuaciones las cuales permiten calcular el porcentaje de óxidos conocido el de los compuestos principales. Dichas fórmulas son:

$$\text{CaO} = 0.7369 \text{ C3S} + 0.6512 \text{ C2S} + 0.6227 \text{ C3A} + 0.4616 \text{ C4AF}$$

$$\text{SiO}_2 = 0.2631 \text{ C3S} + 0.3488 \text{ C2S}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.3773 \text{ C3A} + 0.2098 \text{ C4AF}$$

Si estas ecuaciones se resuelven en relación a los compuestos se obtienen valores muy similares a los de Bogue.

5.5 SILICATO TRICALCICO

5.5.1 COMPOSICION MINERALOGICA

El silicato tricálcico, el más rico en cal que es posible obtener, se compone de 73.7 de cal y 26.3% de ácido silícico.

El más importante de los compuestos minerales del clinker presenta cristales poligonales bien formados, con secciones prismáticas de contorno rectangular o hexagonal.

La dimensión media de los cristales varía con el grado de cristalización, presentándose bien desarrollados cuando la cocción ha tenido lugar a temperatura suficientemente elevada y durante bastante tiempo, así como en presencia de una cantidad adecuada de fase líquida.

Cuando la fase vítrea que los rodea es más ácida que los cristales de silicato tricálcico ellos pueden presentar sus bordes atacados por la misma. Ello es debido a un desequilibrio químico entre ambos, el cual puede provocar la transformación del tricálcico a silicato bicálcico.

Esta transformación, la cual indica un proceso de enfriamiento lento, continúa hasta que el enfriamiento del clinker la detiene. Se manifiesta por el ataque de los bordes, por penetraciones profundas del bicálcico en el silicato tricálcico, o por la aparición de cristales de silicato bicálcico que conservan la forma inicial de los de silicato tricálcico.

La corrosión de los bordes de los cristales de silicato tricálcico, así como la presencia alrededor de ellos de pequeñísimos cristales de silicato bicálcico, se da también cuando abundan los álcalis y cuando la relación de óxido de alúmina al óxido de hierro es elevada.

5.5.2 ESTABILIDAD

La enérgica reacción del silicato tricálcico con el agua indica que se trata de un compuesto muy inestable.

A 1250C la combinación cal-sílice sólo da silicato bicálcico y cal viva. Si se continua elevando la temperatura se produce gradualmente la formación del silicato tricálcico, en un proceso que se desarrolla como «reacción de fase sólida», lenta y parcialmente.

Al sobrepasar los 1900C de temperatura, el silicato se disocia en silicato bicálcico y cal libre; y siendo el punto de fusión de la mezcla del orden de 2240C, no es fácil obtener el silicato tricálcico mediante este procedimiento.

El fenómeno de disociación de silicato bicálcico y óxido de cal también puede presentarse a 1100C al enfriarse el clinker, si se le mantiene demasiado tiempo a dicha temperatura. La cal así formada se conoce como «cal secundaria» por oposición a la cal libre llamada también «cal primaria»

Siendo necesario que la cal y la sílice puedan reunirse dentro de los límites de temperatura indicados, se agrega al crudo alúmina y óxido férrico, los cuales constituyen la fase líquida que permite la combinación cal-sílice y la cristalización del silicato tricálcico.

5.5.3 ACCION EN EL CEMENTO

El silicato tricálcico produce una gran velocidad de hidratación, lo que favorece un rápido endurecimiento del cemento. Sus características hidráulicas son excelentes.

El silicato tricálcico desarrolla un alto calor de hidratación. Se estima su calor de hidratación completa en 120 cal/gr. El silicato tricálcico, al endurecer a gran velocidad, contribuye en forma importante a las resistencias mecánicas iniciales. Si bien su contribución a las resistencias finales no es tan importante como la del silicato bicálcico es, sin embargo, importante.

La resistencia del concreto a los ciclos de congelación y deshielo tiende a mejorar conforme aumenta el porcentaje de los silicatos cálcicos del cemento.

Los cementos ricos en silicato tricálcico, por la facilidad de este compuesto para liberar cal, tienen una estabilidad química menor que la de los ricos en silicato bicálcico.

Los cementos ricos en silicato tricálcico presentan retracciones menores que aquellos cementos más pobres en cal.

5.5.4 CONDICIONES DE EMPLEO

Por su gran velocidad de hidratación y rápido endurecimiento, los cementos ricos en silicato tricálcico permiten obtener morteros y concretos con altas resistencias mecánicas iniciales lo que los hace especialmente recomendables en elementos prefabricados y cuando se desea desencofrados rápidos.

Debido a su capacidad de generación de calor, así como a su velocidad de endurecimiento rápida, los cementos ricos en silicato tricálcico son muy recomendables para operaciones de concretado en zonas de baja temperatura.

Debido a su rápida velocidad de hidratación y a la cantidad de calor que desarrollan, los cementos ricos en silicato tricálcico no son recomendables en construcciones masivas - presas por ejemplo - por el peligro de fisuraciones y cambios diferenciales de volumen, fenómenos ambos que son consecuencia de la gran acumulación de calor y de los cambios térmicos bruscos.

En climas cálidos, en los que existe el peligro de la suma del calor generado con el calor ambiente, deben tomarse precauciones especiales si se emplea cementos ricos en silicato tricálcico.

5.6 SILICATO BICALCICO

5.6.1 COMPOSICION MINERALOGICA

El silicato bicálcico se compone de 65.1% de cal y de 34.9% de ácido silícico. Existen por lo menos cuatro formas del ortho-silicato de calcio, cuya estabilidad se encuentra dentro de las siguientes temperaturas:

Alfa	= 1470 a 2130 C.
Alfa Prima	= 675 a 1470 C.
Beta	= 675 C.
Gamma	= 820 C.

Los cristales de silicato bicálcico son relativamente anchos, de contornos redondeados y tamaño variable, aunque generalmente menor que el del silicato tricálcico. Se presentan uniformemente dispersos y agrupados por zonas. Generalmente presentan una doble serie de estrías que se manifiestan en una o dos direcciones por finas bandas geninadas polisintéticas.

Desde el punto de vista de endurecimiento hidráulico la forma más importante es la Beta y también la que se encuentra con más frecuencia en el clinker. Las formas alfa y beta son estables a alta temperatura y son de endurecimiento lento, pero gradualmente desarrollan una resistencia casi igual a la del silicato tricálcico.

La forma gamma tiene un mayor volumen específico que la beta y corresponde a una variedad hidráulicamente inactiva. Se presenta de preferencia en clinkerres procedentes de crudos pobres en cal y también cuando el proceso de enfriamiento es lento. La forma gamma es estable en agua y no posee propiedades cementantes.

Durante un proceso de enfriamiento lento, la forma beta puede pasar a la forma gamma. La transformación se realiza con un aumento de volumen del 10%, lo que provoca pulverización: ello corresponde al fenómeno de disgregación que se observa en los clinkerres ricos en silicato bicálcico beta y mal templados.

Si el porcentaje de silicato bicálcico formado durante el quemado de la mezcla no es demasiado alto, un rápido enfriamiento del clinker deberá inhibir la transformación de las formas alfa y beta a la forma gamma.

5.6.2 COMPORTAMIENTO

El silicato bicálcico tiene una lenta velocidad de hidratación, lo que lo caracteriza como principal constituyente de los cementos de endurecimiento lento.

El calor desarrollado por el silicato bicálcico durante el proceso de hidratación es bajo. Se estima su calor de hidratación completa en 62 cal/gr.

Debido a su lenta velocidad de endurecimiento, la contribución del silicato bicálcico a la resistencia en las primeras edades es muy pequeña. Posteriormente es la fuente principal de desarrollo de resistencia.

La resistencia del concreto a los ciclos de congelación y deshielo tiende a mejorar conforme aumenta el porcentaje de los silicatos cálcicos del cemento.

La estabilidad química de los silicatos cálcicos es buena, siendo mucho mejor que la del silicato tricálcico. Como al hidratarse dejan en libertad una cantidad mucho menor de cal, los cementos ricos en silicato bicálcico son químicamente más estables y más resistentes al ataque por sulfatos.

5.6.3 CONDICIONES DE EMPLEO

Los cementos ricos en silicato bicálcico son muy adecuados en construcciones masivas; en climas cálidos; y en todos aquellos casos en que no sea de interés primordial el conseguir grandes resistencias a corto plazo.

5.7 ALUMINATO TRICALCICO

5.7.1 COMPOSICION

El aluminato tricálcico se compone de 62.3% de cal y 37.7% de alúmina. El componente intersticial oscuro que se observa en el examen microscópico del clinker, principalmente aquel que se observa como intersticial rectangular está, en su mayor parte, homologado como aluminato tricálcico.

El vidrio o elemento amorfo, que se presenta conjuntamente con el material intersticial oscuro, proviene del enfriamiento como sustancia amorfa del líquido residual del sistema, debido a un enfriamiento final insuficientemente lento.

5.7.2 EL ALUMINATO EN EL CLINKER

Los clinkerres ricos en aluminato tricálcico proceden de crudos de alto contenido de alúmina - módulo silíceo y de silicatos bajos - los cuales, a igualdad de otras condiciones, proporcionan mayor cantidad de fase líquida a la temperatura de clinkerización con lo cual favorecen la cocción así como la formación de los constituyentes del clinker.

Los grandes cristales rectangulares de aluminato tricálcico se forman en el curso de un enfriamiento lento; en cambio, si aparecen en forma acicular indican un enfriamiento lentísimo y en presencia de álcalis. Cristales pequeños y mal formados indican un enfriamiento rápido.

La mayor parte del óxido de alúmina que no pasa a ferroaluminato tetracálcico está presente como solución sólida en la fase vítrea. Por esta razón el contenido de aluminato tricálcico de los cementos enfriados rápidamente es considerablemente más bajo que el de los clinkerres de la misma composición enfriados lentamente.

Debe tenerse en consideración que, como resultado de un proceso de humedecimiento, los aluminatos de la fase vítrea pueden tornarse en aluminato tricálcico, de manera tal que un contenido originalmente bajo de este producto puede eventualmente incrementarse y aproximadamente al valor obtenido a partir de la fórmula de Bogue.

5.7.3 COMPORTAMIENTO

Después de los álcalis, los aluminatos son los compuestos del cemento que primero reaccionan con el agua. Su fraguado ocurre a una velocidad de hidratación muy grande, hasta el punto de ser casi instantáneo. La necesidad de controlar esta velocidad de hidratación casi instantánea obliga a la adición de sulfato de calcio al clinker durante el proceso de molienda de éste último.

El calor de hidratación desarrollado por el aluminato tricálcico es muy elevado, siendo mayor que el de un portland similar de cualquiera de los otros compuestos. Se estima su calor de hidratación completa en 207 cal/gr.

El aluminato tricálcico contribuye al desarrollo de resistencia durante las primeras 24 horas. Posteriormente su aporte a la resistencia es prácticamente nulo.

La resistencia del concreto a los ciclos de congelación y deshielo tiende a disminuir con aumentos en el contenido de aluminato tricálcico.

El aluminato tricálcico es muy sensible a la acción química de aguas sulfatadas, así como de aquellas que contienen cloruros, debido a la formación de sales del tipo de sulfoaluminatos y cloroaluminatos. La formación de estas sales tiene lugar con carácter expansivo, pudiendo originar agrietamiento y desintegración de las estructuras.

La resistencia del concreto al ataque de sulfatos está íntimamente relacionada con el contenido de aluminato tricálcico, disminuyendo proporcionalmente conforme el contenido de éste se incrementa. Se considera que para porcentajes mayores del 8% el cemento portland no resiste como un todo.

Cementos con contenidos menores del 7% de aluminato tricálcico pueden ser considerados buenos desde el punto de vista de resistencia a los sulfatos. Contenidos del 10% al 12% se consideran insatisfactorios y valores mayores como francamente malos. En altos contenidos de sulfatos se recomienda valores de aluminato tricálcico máximos del 5%.

La forma de ataque es por reacción del sulfato de calcio con el hidroaluminato tricálcico resultante de la hidratación del aluminato tricálcico, favoreciendo la formación del sulfoaluminato de calcio hidratado, el cual tiene alto contenido de cristales de agua. Este compuesto - conocido como bacilo del cemento - es la causa de las formas más peligrosas de corrosión del concreto.

Una de las formas de mejorar la resistencia a este tipo de ataques consiste en modificar la composición del cemento reemplazando la porción aluminato tricálcico por ferroaluminato tetracálcico.

5.7.4 CONDICIONES DE EMPLEO

Los cementos simultáneamente ricos en el aluminato tricálcico y silicato tricálcico dan resistencias elevadas a corto plazo pero tienen el inconveniente, en general, de una menor resistencia a los agentes agresivos que aquella que presentan los cementos ricos en silicato bicálcico.

5.8 FERROALUMINATO TETRACÁLCICO

5.8.1 COMPOSICION

El ferroaluminato tetracálcico se compone de 46.1% de cal, de 21% de alúmina, y de 32.9% de óxido de hierro.

En la materia intersticial, la cual forma el grupo de los aluminatos, se distingue la denominada «celita b» ó «celita clara», un componente homologado como ferroaluminato tetracálcico.

Los cristales de este compuesto se presentan en formas variables de acuerdo al proceso de enfriamiento, normalmente son prismáticos, bien formados, pardos de tono variable, de gran poder reflector. Se presentan rodeando a los cristales de los silicatos cálcicos o agregados entre el intersticial oscuro.

5.8.2 COMPORTAMIENTO

Después de los álcalis, los aluminatos son los primeros componentes del cemento que entran en reacción con el agua.

El calor de hidratación desarrollado por el ferroaluminato tetracálcico es muy bajo. Se estima su calor de hidratación completa en 100 cal/gr.

Su papel en las resistencias mecánicas no está definido aunque se estima que tiene efecto muy pequeño en cualquier período. Parecería que la resistencia tiende a disminuir con aumentos en el porcentaje de ferroaluminato tetracálcico, aunque su papel no está claramente definido.

La estabilidad química de este compuesto frente al agua de mar y aguas selenitosas es muy grande.

Se puede observar una ligera tendencia a la contracción, no siempre acompañada de la formación de grietas capilares, durante los procesos de fraguado y endurecimiento.

5.8.3 CONDICIONES DE EMPLEO

Los cementos ricos en ferroaluminato tetracálcico tienen condiciones de empleo específicas en todos aquellos casos en que importe más la durabilidad frente a los agresivos químicos que las resistencias mecánicas.

5.9 INFLUENCIA DE LOS ÓXIDOS SOBRE LOS COMPUESTOS

Es conveniente indicar que cambios relativamente pequeños en la composición

de óxidos de un cemento pueden modificar en forma apreciable la composición de compuestos del mismo. Analizemos la composición química de tres cementos y sus porcentajes de compuestos:

Oxidos	cemento		
	(1)	(2)	(3)
CaO	66.0	63.0	66.0
SiO ₂	20.0	22.0	20.0
Al ₂ O ₃	7.0	7.7	5.5
Fe ₂ O ₃	3.0	3.3	4.5
Otros	4.0	4.0	4.0

COMPUESTOS

C ₃ S	65.0	33.0	73.0
C ₂ S	8.0	38.0	2.0
C ₃ A	14.0	15.0	7.0
C ₄ AF	9.0	10.0	14.0

Los valores de la primera columna corresponden a un cemento de composición media, tanto por los valores obtenidos del análisis de los óxidos principales como también por su constitución mineralógica calculada a partir de dicho análisis.

En la segunda columna la composición de los óxidos del cemento ha variado, disminuyendo en 3% el contenido de cal, modificándose proporcionalmente los porcentajes de los otros óxidos. Puede apreciarse como una aparente reducción mínima en el porcentaje de cal ha dado lugar a una disminución considerable en el porcentaje de silicatos.

Finalmente, en la tercera columna se han considerado los mismos valores para los contenidos de cal y sílice presentados en la primera columna, en tanto que parte de la alúmina ha sido sustituida por óxido férrico. Al comparar los resultados con los de la primera columna se observa una variación considerable, la cual afecta no sólo al contenido de silicato tricálcico sino que también produce una diferencia muy importante en la relación silicato tricálcico-silicato bicálcico.

6. LOS COMPUESTOS SECUNDARIOS DEL CEMENTO

Los cuatro compuestos principales del clinker suponen del 90% al 95% del total. El porcentaje restante corresponde a los llamados compuestos secundarios, los cuales pueden agruparse en:

Oxido de Cal libre
Oxido de magnesia
Oxidos de sodio y potasio
Cantidades pequeñas de otros óxidos.

6.1 CAL LIBRE

6.1.1 CAUSAS

La cal libre, o cal no combinada, del clinker y/o cemento portland es un componente accidental, el cual puede deberse a:

- a. Una combinación imperfecta de la cal con otros materiales por inadecuada cocción del clinker.
- b. Defectos de dosificación, homogenización o cocción del crudo; o inadecuada finura del mismo.
- c. Deficiencias de enfriamiento del clinker a la salida del horno.

6.1.2 FORMAS DE PRESENTACION

La cal libre se presenta como cal libre primaria y cal libre secundaria.

La cal libre primaria es aquella que en todo momento queda sin combinar y es debida a deficiencias de dosificación u homogeneización. Aparece en forma de pequeños gránulos redondeados, pudiendo deberse a un contenido excesivo de carbonato cálcico en el crudo; un defecto de dosificación aún cuando la clinkerización haya sido correcta; o un defecto de clinkerización aunque la dosificación de crudos sea correcta. En tales casos suele presentarse en forma de granos diseminados. Si los granos se presentan agrupados de manera geométrica, ello indica falta de fineza en el crudo.

La cal libre secundaria es aquella que habiendo estado fijada en forma de silicato tricálcico, queda libre por descomposición del mismo en la citada cal y silicato bicálcico. Esta descomposición o resorción se produce durante el enfriamiento del clinker, a partir del momento en que alcanza la máxima temperatura en el horno, siendo su cuantía y velocidad funciones de las condiciones de dicho enfriamiento así como de la composición del material. La cal libre secundaria presenta el aspecto de inclusiones diseminadas en la superficie de los cristales de silicato tricálcico.

6.1.3 INCONVENIENTES

La cal libre, en presencia de agua o de sustancias ácidas, forma sales de calcio las cuales dan origen a expansiones, agrietamientos y desmoronamiento del concreto.

Los investigadores alemanes sitúan dentro del grupo de la cal libre al hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento. Al igual que la cal libre, en presencia de agua o sustancias ácidas puede formar sales de calcio si es que no se combina con la alúmina, sílice u óxido de hierro.

6.1.4 CONTROL

La cal libre es una cal calcinada a muy alta temperatura y, en consecuencia, su hidratación transcurre lentamente. La meteorización, debida a la sensibilidad del cemento a la humedad y al anhídrido carbónico de la atmósfera, favorece la hidratación y carbonatación de la cal libre y tiende a evitar la expansión del cemento debido a la presencia de la misma. La carbonatación de la cal exige la transformación previa de ésta en hidróxido de calcio por la acción de la humedad.

6.1.5 ENSAYO DE DETERMINACION

Mediante el ensayo de Estabilidad de Volumen por Expansión en el Autoclave, realizado de acuerdo a la Norma ASTM C-151, es posible determinar en 24 horas el efecto de expansión que se puede esperar debido a la presencia de cal libre en el cemento.

El contenido de cal libre debe ser inferior al 2%, dada la expansión de volumen que produce su hidrólisis, que provocaría un efecto destructivo. A partir de valores superiores al 2.5% pueden obtenerse ensayos en el autoclave con una expansión superior al 1%. De acuerdo a la Norma mencionada una pasta de cemento, de características determinadas, no deberá tener una expansión mayor de 0.8% cuando es ensayada en el Autoclave.

6.2 OXIDO DE MAGNESIO

6.2.1 ORIGEN

El óxido de magnesio, o magnesia, presente en el clinker, es una sustancia que frecuentemente acompaña al óxido de calcio. Puede provenir tanto de las materias primas calizas como de las arcillosas.

El óxido de magnesio es un factor determinante de la calidad del cemento portland. Cuando la cantidad de MgO en forma de periclase es superior al 5% en el clinker, el cemento puede ser expansivo.

6.2.2 COMPOSICION MINERALOGICA

La magnesia puede presentarse en forma de periclase, en cristales de bordes angulosos, color rosado y en relieve, tanto mejor formados cuanto más lento ha sido el enfriamiento del clinker. En este caso aparece en cubos u octaedros con

exfoliación cúbica. Su dureza es de 6; su peso específico para el material natural varía entre 3.64 y 3.9; y para el óxido fundido entre 3.47 y 3.64. Su punto de fusión es de 2800 C., es isotérmica y tiene un índice de refracción de 1.737.

En algunos casos aparece en el clinker fundida, pudiendo tratarse de una celita muy magnesada. Finalmente puede quedar completamente disuelta en el componente intersticial y, en estos casos, no se observa al microscopio.

6.2.3 PROCESO DE FORMACION

El óxido de magnesia se disuelve en el líquido del clinker hasta aproximadamente un 5%. En los clinkerers enfriados rápidamente el líquido se solidifica en forma de vidrio, siendo insuficientes los exámenes microscópicos para revelar la presencia de periclase, óxido de magnesia libre que, si está presente, lo hace en cristales pequeños y escasos.

En los clinkerers enfriados lentamente el líquido cristaliza, revelando el examen microscópico la presencia de periclase en granos bastante grandes. Las cantidades así observadas se corresponden con el óxido de magnesia total del clinker.

6.2.4 FORMA DE ATAQUE

Cuando el contenido de óxido de magnesia del cemento está por debajo del 2.5%, las expansiones que pueden producirse son bajas. Para contenidos mayores hay una gran diferencia en la expansión según el método de enfriamiento empleado para el clinker.

Los cementos preparados a base de un clinker que se haya enfriado rápidamente y con un contenido vitrificado relativamente alto, tienen expansiones bajas dado que la magnesia disuelta en el vidrio no contribuye a la expansión excesiva.

En cambio, los cementos preparados a base de un clinker enfriado lentamente o calcinado a bajas temperaturas y, por tanto, conteniendo poco o ningún material vitrificado, muestran expansiones altas debido a que la magnesia, presente en forma de periclase, es la causante de las grandes expansiones.

6.2.5 TIEMPO DE ATAQUE

El proceso de hidratación de la magnesia es lento, posiblemente a que ésta, durante el proceso de cocción, alcanza una elevada temperatura y, como todos los óxidos oxidados «a muerte», su velocidad de hidratación es muy pequeña.

Los ensayos de laboratorio indican que los cementos de contenido de óxido de magnesio elevado alcanzan sus máximas expansiones en un período de uno a

diez años. Aún después de cinco años en agua el óxido de magnesio de algunos cementos no ha llegado a hidratarse totalmente.

6.2.6 VENTAJAS E INCONVENIENTES

Las dos principales ventajas de la presencia de la magnesio en el cemento son:

- a. La magnesio tiene papel apreciable como fundente en la formación del clinker, siendo además elemento aportador de fase líquida.
- b. El color verde grisáceo del cemento se debe a la presencia de magnesio. Los cementos libres de este óxido presentan una tonalidad que tiende al color café.

Los tres principales inconvenientes de la presencia de óxido de magnesio son:

- a. En contacto con el agua se hidrata y aumenta de volumen. Esta expansión es más peligrosa por cuando se manifiesta con gran lentitud en concretos ya fraguados y endurecidos.
- b. La hidratación, aumento de volumen y expansión de la magnesio da como resultado fenómenos de dilatación y agrietamiento del concreto, en una acción a largo plazo.
- c. El óxido de magnesio reacciona con el agua con un importante retraso con respecto al fraguado y endurecimiento. Como esta reacción es semejante a la de la hidrólisis del CaO , es exotérmica, da lugar a un importante aumento de volumen y produce la expansión o rotura del aglomerante fraguado.

6.2.7 LIMITACION DE LA NORMA

Teniendo en consideración los factores enunciados, la Norma ASTM C 150 para cementos portland ha fijado en 5% el contenido máximo de óxido de magnesio en los cementos Tipos I, II, III, y IV; y en 4% en el cemento Tipo V.

6.3 ÓXIDOS DE SODIO Y POTASIO

6.3.1 CONCEPTO

Los óxidos de sodio y potasio, conocidos también como álcalis, son acompañantes inevitables de la materia prima del cemento, especialmente de la arcillosa.

Si bien parte de los álcalis se volatilizan en el horno, pudiendo el fabricante disminuir el tanto por ciento por aumento de la temperatura del horno o la duración de la cochura, parte permanecen incorporados al clinker.

6.3.2 INCONVENIENTES

Si bien se consideran inocuos en pequeñas concentraciones, cuando sobrepasan de determinados porcentajes los óxidos de sodio y potasio pueden ser nocivos por su capacidad de reaccionar con determinados compuestos presentes en algunos agregados. Esta reacción da origen a expansión con destrucción del concreto.

El deterioro mencionado es causado por un fenómeno de hinchazón osmótica del gel álcali-sílice, reacción producida por interacción química de determinadas formas de sílice (tridimita, cristobalita, heulandita, ópalo, calcedonia) y los álcalis presentes en el cemento.

Se consideran también como inconvenientes las manchas que se presentan en las piedras calizas unidas con mortero de cemento; así como la posibilidad de aumentos en la contracción.

6.3.3 LIMITES PERMISIBLES

Aunque tanto el óxido de sodio como el de potasio son elementos indeseables en el cemento, se ha establecido ya que un porcentaje dado del primero es más activo que el mismo porcentaje del segundo. El grado de actividad es tal que cada uno por ciento de óxido de potasio es equivalente a 0.658 de óxido de sodio.

Las Norma ASTM C 150 indica que el cemento portland normal no deberá contener más del 0.6% de álcalis en peso del cemento y que dicho porcentaje se calculará como el porcentaje de óxido de sodio más 0.658 veces el porcentaje de óxido de potasio.

6.4 OTROS COMPUESTOS SECUNDARIOS

Además de los mencionados, pueden presentarse en el análisis químico de un cemento otros compuestos secundarios los cuales carecen, en general, de importancia tanto cualitativa como cuantitativamente. Entre dichos compuestos secundarios pueden encontrarse:

Oxido ferroso	FeO
Bióxido de titanio	TiO ₂
Anhidrido Fosfórico	P ₂ O ₅
Azufre Libre	S
Oxido Mangánico	Mn ₂ O ₃
Oxido de Estroncio	SrO

El óxido ferroso se encuentra rara vez en el clinker, salvo que una cocción

defectuosa de lugar a la presencia de una atmósfera reductora en el horno. No se suele determinar como tal y, en forma de óxido férrico queda incluido en este componente principal.

El bióxido de titanio y el anhídrido fosfórico, salvo en el caso de determinación analítica especial de estos componentes, en el análisis ordinario quedan incluidos en la alúmina y expresados como tal.

El óxido mangánico queda incluido y expresado como óxido férrico. El óxido de estroncio queda incluido en la determinación de la cal total y expresado en tal forma.

El azufre libre del clinker, aunque raro, puede provenir de los combustibles empleados en la cocción y aparece cuando en el horno existe una atmósfera fuertemente reductora.

7. PRODUCTOS SECUNDARIOS COMPLEMENTARIOS

7.1 CONCEPTO

El grupo de los componentes secundarios complementarios incluye:

Pérdida por calcinación..... PC
Residuo Insoluble RI
Anhídrido Sulfúrico SO₃

7.2 PERDIDA POR CALCINACION

7.2.1 CONCEPTO

Por pérdida por calcinación se entiende la disminución en el peso experimentada por una muestra de cemento la cual ha sido calentada a una temperatura de 1000C.

La pérdida de peso se debe a que durante este calentamiento se liberan vapor de agua y anhídrido carbónico. A la temperatura indicada se consigue la descarbonatación del CO₃Ca que eventualmente pueda estar presente en el cemento y, por tanto, mide la cantidad de CO₂ de los carbonatos presentes o la absorbida por meteorización, así como la cantidad de agua de hidratación incorporada al aglorante por la misma causa.

7.2.2 CAUSAS

Teóricamente un clinker adecuadamente cocido no debería experimentar pérdidas por calcinación; por lo que la de un cemento debería corresponder exclusivamente al agua de constitución del sulfato de calcio adicionado como regulador del fraguado.

Sin embargo, las pérdidas observadas son mayores debido a algunos de los siguientes factores:

- a. Cierta absorción de agua por parte del cemento resulta inevitable durante el proceso de fabricación dado que frecuentemente el clinker, a la salida del horno, se rocía a fin de acelerar su enfriamiento y mejorar su facilidad de molienda. Si bien esta agua se evapora inmediatamente, produce una hidratación mínima sobre la superficie del clinker.
- b. Durante el proceso de almacenamiento el clinker puede absorber humedad del medio ambiente.
- c. El yeso añadido, además de su humedad de cantera, contiene cerca del 21% de agua químicamente combinada.
- d. La presencia de anhídrido carbónico proveniente de la atmósfera, de donde se absorbe en cantidades pequeñas por los materiales hidratados que se han formado por efecto de la absorción de agua.

7.2.3 INCONVENIENTES

Una ligera meteorización, que puede producirse en las operaciones de transporte y durante un tiempo prudencial de ensilado, puede ser beneficiosa en la medida que contribuya al apagado y carbonatación de la posible cal libre, dado que ésta ya hidratada y carbonatada no produce expansión.

Sin embargo, las meteorizaciones más fuertes, debidas a la acción de abundante humedad, tienden a hidratar los constituyentes activos del cemento, haciéndolo perder parte de su eficiencia.

El valor de la pérdida por calcinación da idea del estado de meteorización de un cemento, el agua adicionada ha hidrolizado previamente los silicatos y por ello es necesario comprobar este valor en los cementos almacenados antes de su puesta en obra.

7.2.4 LIMITACIONES DE LA NORMA

Según la Norma ASTM C 150, el cemento debe tener una pérdida por calcinación máxima del orden del 3% para todos los tipos de cemento portland, exceptuando el Tipo V cuya pérdida por calcinación máxima es de 2.3%.

Se estima que pérdidas por calcinación mayores que las indicadas son un índice del desarrollo de un proceso de hidratación que hace perder al cemento sus cualidades hidráulicas y perjudican sustancialmente el desarrollo de resistencia en relación con la edad.

7.3 RESIDUO INSOLUBLE

7.3.1 CONCEPTO

La porción arcillosa del crudo del clinker es insoluble en ácido clorhídrico, pero al producirse la reacción con la cal en el horno, se produce la transformación del material insoluble a minerales del clinker, todos ellos solubles en ácidos.

Se define como residuo insoluble a aquella porción del cemento que no puede ser disuelta mediante un ataque por ácido clorhídrico (CIH) al 10% en ebullición durante unos minutos.

Todos los componentes del clinker son completamente solubles en ácido clorhídrico al 10%, por lo que un cemento, sin adiciones de otros materiales distintos a la caliza, como son las rocas básicas, puzolanas, cuarzos, feldespatos, etc., da un valor de residuo insoluble de alrededor de un 0.5%.

7.3.2 CAUSAS

El residuo insoluble puede corresponder a pequeñas porciones de las materias primas del crudo que por su naturaleza no han podido reaccionar durante la clinkerización. Así, el residuo insoluble constituiría un punto de referencia en relación con el grado de perfección obtenido en las relaciones que se efectúan en el horno de cocción.

El residuo insoluble puede deberse a que en el proceso de clinkerización no se ha logrado la temperatura adecuada, dejando las reacciones parcialmente incompletas. El residuo es menor cuanto mayor es la temperatura de calcinación o el tiempo de calcinación para una temperatura dada.

A igualdad de las restantes variables, a mayor finura del crudo menor residuo insoluble. A mayor porcentaje de carbonatos del crudo aumenta también el residuo insoluble.

La presencia de altos porcentajes de residuo insoluble es un índice de la presencia de material puzolánico como material de reemplazo en el cemento.

Al aumentar el residuo insoluble disminuyen las resistencias, a no ser que esta disminución sea simultáneamente contrarrestada por mejora de otras de las variables, por ejemplo aumentando la fineza. Los tipos de cementos especiales en los que se ha incorporado elementos con actividad puzolánica, poseen elevados residuos insolubles.

7.3.3 LIMITACIONES DE LA NORMA

La Norma ASTM C 150 establece para los cementos portland normales un porcentaje máximo de residuo insoluble de 0.75%

La Norma ASTM C 175, que corresponde a cementos portland con incorporador de aire, establece un porcentaje similar.

La Norma ASTM C 205, que corresponde a cementos portland con escoria de alto horno, eleva este porcentaje al 1%.

La Norma ASTM C 340, que corresponde a cementos portland puzolánicos, no establece limitación alguna ya que el residuo insoluble siempre presenta altos valores en este tipo de cementos.

7.4 ANHIDRIDO SULFURICO

7.4.1 CONCEPTO

Un componente del cemento que es muy importante, aún cuando se presenta sólo en pequeños porcentajes, es el denominado anhídrido sulfúrico, también conocido como SO₃.

Este elemento proviene del yeso añadido al clinker para retardar la fragua del cemento. La expresión SO₃ que aparentemente es poco clara, proviene de la consideración analítica del yeso. Este es sulfato de calcio con fórmula CaSO₄, un compuesto de CaO y SO₃. En el análisis químico, el óxido de cal ya está incluido en el contenido total de cal del cemento.

El contenido de anhídrido sulfúrico decide la calidad del cemento cuando su valor está fuera de un estrecho margen, entre 2% y 4%, afecta al tiempo de fraguado. Cuando es menor el fraguado puede ser muy rápido, como consecuencia del escaso efecto retardador. Cuando su valor es de 6% a 10%, inhibe el fraguado, no existiendo entonces endurecimiento ni efecto aglomerante.

Existe otro serio inconveniente cuando la cantidad de SO₃ sobrepasa el valor del 4%; puede haber, según el contenido de C₃A del clinker, un exceso de SO₄Ca₂.H₂O libre en el concreto, que será objeto de reacción con el C₃A excedente o con el eventualmente quede libre en otras zonas del concreto, produciéndose el efecto destructivo ya citado. Además, este exceso de sulfatos aumenta el contenido de iones libres en el concreto y hace más intenso el efecto corrosivo a las armaduras.

7.4.2 FUNCION DEL YESO

Es sabido que el aluminato tricálcico, en contacto con el agua, fragua en forma prácticamente instantánea. No obstante que el contenido de aluminato tricálcico de los cementos portland es, en general, de magnitud limitada, induce al fraguado rápido de la masa aglomerante integral.

Una pequeña adición de yeso elimina el inconveniente citado. La molienda conjunta del clinker y el yeso, con el resultado final del cemento, permite una regulación del tiempo de fraguado, posibilitando un retardo que permite la elaboración y compactado de las mezclas de concreto.

Aparentemente el yeso se combina con el aluminato tricálcico formando una sal doble que cristaliza rápidamente en formas aciculares las cuales, a diferencia del yeso, son prácticamente insolubles en agua. Este compuesto, el sulfoaluminato cálcico tiene densidad bastante baja y gran volumen.

Las pequeñas cantidades de yeso adicionadas para regular el tiempo de fraguado se transforman dentro de las primeras 24 horas del proceso de endurecimiento e integran el compuesto precipitado, sin que en esta primera etapa se verifiquen efectos expansivos. Si la cantidad de yeso añadida es alta, puede ocurrir expansión por yeso a edades posteriores.

7.4.4 FORMAS DEL SULFATO DE CALCIO

En cuanto a la acción reguladora del tiempo de fraguado, no son equivalentes las distintas formas de sulfato cálcico ni sus mezclas, dado que la acción reguladora se basa en lograr una determinada concentración de iones SO_4 en el agua de amasado a fin de impedir la rápida disolución de los aluminatos.

Dicha concentración depende de la solubilidad propia de cada una de las formas de sulfato de calcio (yeso natural, yeso cocido o hemihidratado, anhidrita natural o artificial) así como de la velocidad de disolución la cual es variable con la temperatura y otras circunstancias.

La anhidrita, en general, es poco soluble. La natural es la menos insoluble. La artificial se disuelve e hidrata con mucha dificultad y lentitud.

La adición al clinker de yeso hemihidratado da lugar al fraguado falso, al que ya nos hemos referido, fenómeno consistente en un atesamiento de la pasta durante el amasado acompañado de desprendimiento de calor.

7.4.6 PROPORCION DE SULFATO DE CALCIO

La cantidad de yeso a ser añadida en la molienda depende fundamentalmente

del porcentaje de aluminato tricálcico y de la finura de molido.

Sin embargo, el sulfato de calcio no presenta mismo peso que el yeso crudo que se añade al clinker dado que el yeso contiene cerca del 21% de agua de cristalización y además presenta porcentajes variables de humedad de cantera e impurezas de carácter arcilloso. Por estas razones se añade al clinker una cantidad de yeso mayor que el porcentaje de sulfato de calcio que realmente interviene en la reacción.

Es el contenido de anhídrido sulfúrico, obtenido del análisis químico del SO₃, el que permite calcular el valor del sulfato de calcio presente en el cemento:

$$\text{Sulfato de Calcio} = 1.7 \text{ SO}_3$$

Igualmente, utilizando el porcentaje de anhídrido sulfúrico para la determinación de la cal combinada (cal contenida en el yeso)

$$\text{Cal Combinada} = 0.7 \text{ SO}_3$$

7.4.5 LIMITACIONES DE LA NORMA

La adición de yeso al clinker de cemento portland se hace con la finalidad de regular el tiempo de fraguado, pero si se añade demasiado se corre el peligro que se presenten expansiones por acción del yeso.

Teniendo ello en consideración, la Norma ASTM C 150 limita el contenido de anhídrido sulfúrico de los cementos portland normales a un máximo el cual está en relación con el contenido de aluminato tricálcico:

- a. Si el contenido de aluminato tricálcico es de 8% ó menor, la Norma admite un contenido máximo de SO₃ de:
2.5% para los cementos portland Tipo I y II
3.0% para los cementos portland Tipo III
2.3% para los cementos portland Tipo IV y V
- b. Si el contenido de aluminato tricálcico es más del 8%, la Norma señala un contenido máximo de SO₃ de:
3% para el cemento portland Tipo I
4% para el cemento portland Tipo III

Para los cementos portland con incorporador de aire, la Norma ASTM C 175 indica:

- a. Si el contenido de aluminato tricálcico es de 8% ó menor, la Norma admite un contenido de SO₃ de:
2.5% para los cementos portland IA y IIA
3.0% para los cementos portland IIIA
- b. Si el contenido de aluminato tricálcico es de más del 8%, la Norma señala un contenido máximo de SO₃ de:
3% para el cemento portland Tipo IA
4% para el cemento portland Tipo IIIA

Para los cementos portland con escoria de altos hornos, la Norma ASTM C 205 señala un valor máximo de 2.5% para el contenido de SO₃.

Para los cementos portland puzolánicos, la Norma ASTM C 340 señala un valor máximo de 2.5% para el contenido de SO₃.

8. REACCION QUIMICA

8.1 SILICATOS CALCICOS

Los silicatos cálcicos forman disilicato tricálcico hidratado, conocido también como Tobermorita, con formula de composición $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

El silicato tricálcico totalmente hidratado contiene, en peso, un 40% de hidrato cálcico, mientras que el silicato bicálcico en la misma condición sólo produce un 18% de hidrato cálcico.

Los dos silicatos cálcicos se diferencian poco en su aptitud para combinarse con el agua, por lo que desde el punto de vista de la hidratación no tiene mucha importancia que exista un porcentaje más alto de uno de ellos.

8.2 ALUMINATOS CALCICOS

El aluminato tricálcico, al hidratarse, toma más cal y se combina con mayor cantidad de agua, constituyendo un compuesto inestable el cual con el tiempo se transforma en aluminato tricálcico hidratado estable.

No existe un criterio claro respecto al mecanismo de reacción del ferroaluminato tetracálcico, aunque se considera que el óxido férrico puede dar con la cal y el agua combinaciones similares a la alumina.

Los productos de hidratación del ferroaluminato tetracálcico reaccionan con la sílice de los silicatos cálcicos hidratados formando combinaciones conocidas como «hidrogranates» las cuales no reaccionan con el yeso o lo hacen muy debilmente.

8.3 SULFATO DE CALCIO

En la pasta de cemento y agua, el yeso se disuelve y transforma en un compuesto aluminoso, la etringita, un sulfoaluminato insoluble y rico en cal. Dado que el cemento contiene un reducido porcentaje de yeso, después de las 24 horas de iniciado el endurecimiento, la reserva de sulfato de calcio queda agotada y la etringita se transforma en una sal doble con menor contenido de sulfato.

El aparentemente alto contenido de agua que se combina químicamente con el yeso no representa un porcentaje importante en relación al porcentaje total de agua de hidratación debido a la pequeña cantidad, generalmente menor del 4%, de yeso que se añade.

8.4 EL GEL

8.4.1 CONCEPTO

El gel es el material rígido, de resistencia elevada, homogéneo, con un porcentaje de vacíos, conocidos como poros gel, del orden del 25% en volumen. Se presenta al microscopio rodeado de una pequeña cantidad de clinker inalterado y de cristales de hidrato cálcico.

8.4.2 FORMACION

El proceso de formación del gel comienza aproximadamente una hora después del mezclado. Se inicia al brotar en toda la superficie de los granos de cemento una formación vermicular o de bastoncillos, la cual no está constituida por cristales simples sino por una sustancia de constitución homogénea compuesta de microcristales no reconocibles, la cual se conoce como gel.

Este gel forma un filtro coloidal que parece presentar una tendencia a formar hojas enrolladas. La formación de cristales de tobermorita se desarrolla no sólo en la superficie de los granos sino también en el espacio capilar repleto de agua comprendido entre ellos.

Después de 24 horas del inicio de la hidratación, los espacios capilares se muestran ya considerablemente llenos de partículas de gel y, finalmente, después de 28 días, el gel ha rellenado el espacio capilar formando un ligamento entre los granos originales del cemento a los cuales ha unido estrechamente en su superficie de contacto.

8.4.3 SUPERFICIE ESPECIFICA

La magnitud de la superficie específica del gel es de aproximadamente 2 000 000 cm²/gr., lo cual significa que durante el proceso de hidratación la superficie específica del cemento se hace unas mil veces mayor.

9. FRAGUADO

9.1 CONCEPTO GENERAL

Cuando el cemento se mezcla con el agua, las reacciones químicas que se producen originan cambios en la estructura de la pasta, conservando la mezcla su plasticidad durante un cierto tiempo, desde pocos minutos hasta varias horas, para luego ocurrir varios fenómenos sucesivos:

- a. Un aumento relativamente brusco de la viscosidad acompañado de una elevación de temperatura de la pasta. A este proceso se le conoce como principio del fraguado o fraguado inicial.
- b. Después de un período de algunas horas, la pasta se vuelve indeformable y se transforma en un bloque rígido. A este momento se le conoce como el fin del fraguado o fraguado final. No corresponde a un fenómeno particular como el principio del fraguado, su determinación es tan sólo teórica o convencional.
- c. La resistencia aumenta con regularidad a medida que transcurre el tiempo. Es el proceso de endurecimiento, del cual nos ocuparemos en el acápite siguiente.

Por lo tanto, el término «fraguado», ó «tiempo de fraguado», es un concepto convencional que se emplea para designar el período que necesita una mezcla de cemento y agua para adquirir una dureza previamente fijada.

Es esencial que el fraguado no sea ni demasiado rápido ni demasiado lento. Si es muy rápido el tiempo será insuficiente para colocar el concreto antes que adquiriera rigidez. Si es muy lento se pueden originar retrasos en el avance y utilización de la estructura.

Los tiempos de fraguado pueden estar influídos principalmente por cuatro variables: el contenido en SO₃; el contenido en C₃A; el grado de finura; y la temperatura alcanzada en la molienda.

9.2 ESQUEMA DEL PROCESO

Al mezclar el cemento con el agua la reacción principia inmediatamente y en toda su magnitud. Pocos minutos después del mezclado el agua se satura de hidrato cálcico y se produce una sobresaturación elevada.

El silicato tricálcico va pasando a solución dentro de la cual se disgrega rápidamente. La tobermorita se separa del gel y el hidrato cálcico que permanece libre cristaliza gradualmente en la propia solución.

El agua absorbe del cemento cantidades importantes de álcalis, especialmente en forma de sulfatos, mientras que los aluminatos que habían pasado en solución son precipitados por la porción de yeso que se ha solubilizado, formando el sulfoaluminato de calcio insoluble o etringita.

Este proceso inicial motiva un endurecimiento pero no disminuye la trabajabilidad de la masa. Por esta razón, durante los primeros momentos del fraguado el endurecimiento inicial de la masa puede ser eliminado mediante un remezclado mecánico. Este fenómeno de tixotropía puede ocurrir mientras la aguja Vicat es capaz de penetrar completamente la pasta.

9.3 REGULACION DEL FRAGUADO

La formación de aluminato tricálcico hidratado o silicato tricálcico hidratado parece ser la causa del inicio del fraguado. El tiempo necesario para llegar a este principio de fraguado dependería de cual de los hidratos se forma primero.

Si no hay presentes en el cemento reguladores de fragua o si el contenido de aluminato tricálcico es muy elevado, éste entra en solución rápidamente y se forma aluminato tricálcico hidratado. Esta formación puede ser lo suficientemente importante como para producir un fraguado instantáneo de la pasta acompañado de marcada elevación de calor.

En el caso mencionado, el hidrato determinaría la estructura de la pasta. Pero si el contenido de este compuesto fuese bajo o se incorporara un material retardador el cual actuase reduciendo la solubilidad del aluminato tricálcico o retardando la precipitación del hidrato, se daría tiempo al reactivo más lento, el silicato tricálcico, para que entrara en solución y se precipitara en forma de silicato tricálcico hidratado. En este segundo caso sería el silicato tricálcico hidratado el que determinaría el fraguado y la estructura de la pasta. El tiempo de fraguado sería normal y no se producirían temperaturas elevadas.

Es justamente la anterior la función que cumple en el cemento el sulfato de calcio, el cual en forma de yeso se muele conjuntamente con el clinker.

La presencia de sulfato de calcio produce una reacción con el aluminato tricálcico y el hidróxido de calcio, formando sulfoaluminato de calcio, muy difícilmente soluble, y reduciendo la concentración del aluminato tricálcico en solución por debajo del punto en que este compuesto hidratado se puede precipitar.

El proceso anterior continua hasta que se agota el sulfato cálcico o el aluminato

tricálcico, permitiendo la hidratación del silicato tricálcico durante este período.

Como resumen puede decirse que el fraguado normal es debido a la hidratación del silicato tricálcico, el cual necesita sólo unas cuantas horas para llegar a un punto determinado de rigidez. La reacción muy rápida del aluminato tricálcico con el agua podría producir un fraguado instantáneo si no retrasara la misma la incorporación del sulfato de calcio el cual actúa como regulador del fraguado.

9.4 FACTORES EN LA DURACION DEL FRAGUADO

9.4.1 CEMENTO

Los cementos ricos en C3A tienen un fraguado rápido que puede regularse por adición de yeso en la molienda.

Dentro de los valores usuales de fineza cuanto más fino es el cemento más rápida es la fragua, tendiendo los cementos demasiado finos a desarrollar una fragua casi instantánea.

La meteorización aumenta la duración del fraguado en relación a la fineza del cemento y al contenido de agua.

9.4.2 AGUA

A menor cantidad de agua corresponde un tiempo de fraguado más corto.

El agua que contiene materia orgánica puede retardar la fragua.

El agua de mar, empleada como agua de amasado, puede modificar en algo los tiempos de fraguado.

9.4.3 AGREGADO

La presencia de humus o sustancias químicas en el agregado puede retardar el fraguado.

9.4.4 CLIMA

El aumento de temperatura ambiente disminuye el tiempo de fraguado y una disminución de temperatura tiende a aumentarlo. El fraguado en el aire húmedo a saturación es más lento que en el aire seco.

9.4.5 COMPUESTOS

Determinados compuestos solubles actúan por reacción química modificando la velocidad de disolución del aluminato tricálcico. Su acción puede ser

retardadora, caso de los lignosulfonatos, o acelerante, como los cloruros de calcio ó de sodio.

9.5 EL FALSO FRAGUADO

Cuando el yeso contenido en el cemento, aún en su cantidad normal u óptima, ha sido objeto de un sobrecalentamiento durante la molienda a temperaturas superiores a los 100 C, una parte de él, o incluso todo, según la intensidad del esfuerzo térmico, se deshidrata parcialmente, formando hemihidrato, o sea yeso aglomerante.

Este yeso hemihidratado (en cantidades de un 7% a un 10%), fragua a los pocos minutos, hidratándose a $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, y produciéndose endurecimiento que, aunque con poca resistencia, llega a frenar o impedir incluso la mezcla del concreto que se prepara, produciéndose el fenómeno conocido como «falso fraguado»

El fenómeno de fraguado falso se manifiesta durante o después del mezclado y se caracteriza por un brusco aumento de la viscosidad de la pasta sin gran desprendimiento de calor.

Un mezclado adicional vuelve a dar a la pasta su plasticidad inicial, sin que las resistencias finales se modifiquen. No debe añadirse agua.

El falso fraguado proviene de la deshidratación del yeso durante la molienda conjunta con el clinker. La deshidratación depende del tiempo de molido, del tanto por ciento de humedad y de la temperatura. Durante el mezclado, el semihidrato, muy ávido de agua, forma cristales de yeso los cuales dan rigidez a la pasta.

El falso fraguado está supeditado a:

- a. La cantidad de yeso deshidratado; no existiendo la posibilidad de fraguado falso cuando la cantidad de semihidratos producida se combine enteramente en el momento del mezclado con el aluminato tricálcico y el ferroaluminato tetracálcico.
- b. Su velocidad de precipitación, variable según la temperatura en el momento del amasado. El falso fraguado puede pasar inadvertido si tiene lugar durante el mezclado.

Otra causa de fraguado falso puede estar asociada a la presencia de álcalis en el cemento. Los carbonatos alcalinos pueden reaccionar con el hidróxido de calcio producido por la hidrólisis rápida del silicato tricálcico, precipitando carbonato de calcio en cantidad suficiente para producir la rigidez de un fraguado.

9.6 TIEMPO DE FRAGUADO

Una calidad normal de cemento fragua inicialmente a los 40-50 minutos o a los 30 minutos para los cementos de mayor grado de finura, considerándose normal un tiempo de fraguado final entre 4 y 7 horas.

10. ENDURECIMIENTO DE LAS PASTAS

10.1 CONCEPTO GENERAL

Producido el proceso de fraguado e iniciado el de endurecimiento es necesario tener en consideración tres aspectos fundamentales:

- a. Es la constitución de la pasta y, en primer lugar, su porosidad, la que determina la resistencia del conglomerado cementicio.
- b. Al tratar el proceso de endurecimiento es necesario distinguir si lo que debe considerarse principalmente es la resistencia que se obtiene después del desarrollo del proceso de hidratación (resistencia final) o sí, por el contrario, lo más importante es el problema de la velocidad de endurecimiento.
- c. La resistencia final de la pasta de cemento depende casi exclusivamente de la cantidad de agua empleada en el mezclado. Por el contrario, el ritmo o desarrollo del endurecimiento, o sea el tiempo necesario para que el concreto alcance la resistencia final, depende por una parte de la composición química y de la finura del cemento y, por la otra, de las condiciones de humedad y de temperatura que se tiene durante el proceso de endurecimiento.

10.2 POROSIDAD

10.2.1 CONCEPTO GENERAL

La pasta de cemento fresca es una suspensión de partículas de cemento en agua, permaneciendo constante su volumen bruto cuando la pasta ha fraguado. En cualquier etapa del proceso de hidratación, la pasta endurecida consiste de hidratos de los diferentes compuestos, referidos cualitativamente como gel; de hidróxido de calcio; algo de componentes secundarios; cemento no hidratado; y el remanente de los espacios originalmente llenos de agua en la pasta fresca.

Este remanente de los espacios originalmente llenos de agua se conoce como poros capilares, diferenciándolos de aquellos vacíos intersticiales que existen dentro del gel mismo y a los que se les conoce como poros gel.

A partir de Abrams se considera que la porosidad de la pasta de cemento depende de la cantidad de agua de mezclado, considerándose, en coincidencia con Feret, que la resistencia se reduce conforme aumenta la porosidad.

10.2.2 VALORACION DE CZERNIN

Es aceptado que la presencia de burbujas dentro de la masa del concreto reduce la resistencia de éste, ya sea que estén llenas de agua o de aire. Al respecto Czernin ha establecido la siguiente valoración:

- a. Inmediatamente después del mezclado, una pasta de cemento y agua constituye un conglomerado de granos, entre los cuales se tienen espacios vacíos ligados entre si y llenos de agua. Aquella que se encuentra en este estado de subdivisión (grandes partículas) se designa como agua capilar.
- b. El cemento portland puede alcanzar su hidratación completa al combinarse químicamente con el agua en proporción de una cuarta parte de su peso.
- c. Al combinarse químicamente, el agua pierde cerca de una cuarta parte de su volumen.
- d. Además del agua químicamente combinada, el cemento se combina en forma más debil, como hidrogel, con agua adicional, a razón de un 15% de su peso aproximadamente.
- e. Los productos de hidratación del cemento están integrados principalmente por una masa muy compacta de constitución homogénea, el gel de cemento. Debido a la facilidad de evaporación del agua del gel, después de una desecación fuerte, el gel de cemento aloja espacios huecos, finamente subdivididos, denominados «poros del gel» ó «poros gel», cuyo espacio corresponde a cerca de una cuarta parte de su volumen.
- f. La porosidad total (poros capilares y poros gel) de la pasta de cemento determina su resistencia.

10.2.3 POROS CAPILARES

En cualquier etapa del proceso de hidratación, los poros capilares representan la parte del volumen bruto que no ha sido ocupada por los productos de la hidratación del cemento. Dado que los productos de hidratación tienden a ocupar más del doble del volumen de la fase original sólida, el volumen del sistema capilar se reduce con el progreso de la hidratación.

La porosidad capilar de la pasta depende tanto de la relación agua-cemento de la mezcla como del grado de hidratación de la misma. La velocidad de endurecimiento no es importante más sí el tipo de cemento en la medida en que influye en el grado de hidratación alcanzado a una edad dada.

Para relaciones agua-cemento mayores de 0.38, el volumen de gel no es suficiente para llenar todos los espacios disponibles, de manera tal que siempre habrá poros capilares aún después que el proceso de hidratación ha terminado. Los poros capilares tienen las siguientes características:

- No pueden ser vistos sin microscopio.
- Su diámetro se estima en 0.0013 mm.
- Varían en perfil.
- Forman un sistema interconectado distribuido al azar a través de la pasta de cemento. Este sistema es el principal responsable de la permeabilidad de la pasta de cemento endurecida y de la vulnerabilidad a la acción de las heladas.
- En pastas densas y antiguas los poros capilares pueden llegar a ser bloqueados y segmentados.

De acuerdo a la relación agua-cemento empleada, el tiempo requerido para alcanzar segmentación de los poros capilares es el siguiente en una relación agua-cemento/tiempo:

0.40	.....	3	días
0.45	.....	7	días
0.50	.....	14	días
0.60	.....	6	meses
0.70	.....	12	meses
+0.70	.....		imposible

10.2.4 POROS GEL

El gel es poroso desde que él puede retener agua evaporable. Los poros gel no son sino espacios intersticiales interconectados entre el gel.

Las principales características de los poros gel son:

- Su diámetro es muy pequeño, de un orden de magnitud equivalente al de las moléculas de agua.
- Ocupan aproximadamente el 25% a 28% del volumen total de gel.
- La magnitud de los poros gel es independiente de la relación agua-cemento de la mezcla y del progreso de la hidratación. Dentro de los límites indicados, el volumen total de poros gel se incrementa con el de gel conforme progresa la hidratación.

10.3 COMPOSICION QUIMICA

Es notable la influencia de la composición química del cemento portland sobre su velocidad de hidratación y el desarrollo de su endurecimiento a través del tiempo. En cambio, dicha composición influye en forma secundaria sobre el valor de la resistencia final.

En general la resistencia final será un poco más elevada en los cementos más pobres en cal y por lo tanto más ricos en silicato bicálcico. Ello es debido a que

la resistencia depende de la superficie específica de la pasta de cemento hidratada y se sabe que el silicato bicálcico produce más tobermorita coloidal y menos hidrato cálcico macrocristalino que el silicato tricálcico.

Es importante tener siempre presente la elevada aportación a la resistencia que en todas las edades proporcionan ambos silicatos cálcicos, así como también la diferencia entre sus velocidades de endurecimiento. En cambio, la aportación de los compuestos aluminosos es muy limitada.

Una comparación entre los compuestos puros del clinker con los correspondientes a los cementos portland industriales resulta difícil dado que estos últimos, a través de su formación, asimilan durante la fusión o sinterización pequeñas cantidades de otros compuestos. Por otra parte se debe considerar que los minerales del clinker industrial se obtienen básicamente por fusión, seguida de enfriamiento brusco, que tiende a congelarlos en forma vitrea y que, a pesar de la fina molienda del clinker, los granos de cemento no constituyen minerales individuales, sino que siempre contienen entremezclados minerales de distinta naturaleza, de textura muy fina o gruesa, sumergidos parcialmente en la matriz vitrea originada en el proceso de sinterizado.

Por lo tanto, del análisis de la composición química y su influencia sobre el proceso de endurecimiento se pueden establecer como pautas generales:

- a. Un cemento rico en aluminatos o en silicato tricálcico se hidratará más rápidamente que otro en el cual predomine el silicato bicálcico. Esto se debe, probablemente, a que la porción que se hidrata rápidamente, debido a su transformación acelerada, presenta al ataque del agua superficies nuevas, constituidas por componentes menos activos.
- b. Para muestras conservadas bajo agua, se tiene que el aluminato tricálcico contribuye notablemente al endurecimiento; pero después su aportación se abate fuertemente y llega a convertirse en un factor negativo. La creciente influencia del silicato tricálcico es evidente hasta la edad de un mes, en tanto que en el silicato bicálcico la tendencia al aumento se extiende hasta la edad de un año, cuando su aportación es aproximadamente del mismo orden de magnitud que la del silicato tricálcico. Aparentemente el ferroaluminato tetracálcico actúa en forma ligeramente negativa.
- c. Para muestras conservadas al aire el aluminato tricálcico aumenta su aportación continuamente y el silicato tricálcico resulta superior al silicato bicálcico aún después de largos años.
- d. Los criterios de los puntos (c) y (d) deben considerarse con reserva pues incluyen fuentes de error aún no controladas. Entre ellas pueden mencionarse:
 - El cálculo de la composición mineralógica se aparta fuerte y sensiblemente de la realidad.

- A la influencia de los óxidos secundarios se le ha concedido muy poca importancia.
- Las variaciones por los conceptos de cocción y enfriamiento, así como aquellas motivadas por la diversidad de composición química de las materias primas, introducen nuevas incógnitas.

10.4 FINURA DE MOLIENDA

Es evidente la influencia de la finura de molienda sobre la velocidad de endurecimiento del cemento, dado que cuanto mayor es la superficie que queda expuesta al ataque del agua contenida en la pasta de cemento, tanto mayor será la cantidad de gel que se forma y tanto mayor resultará la resistencia inicial.

A causa de la alta superficie específica del cemento se origina rápidamente una gran cantidad de gel e, inversamente, mientras mayor es la cantidad de gel producida, más notable será el efecto inhibitor que motiva. La eficacia de una elevada finura de molienda es más notable durante los primeros 7 días, y es perceptible aún después de los 28 días; pero posteriormente se pierde este efecto acelerante y, en la práctica, las resistencias finales de los cementos de molienda gruesa o de molienda fina difieren entre sí en un grado muy reducido.

Existen razones para creer que aquellos granos de cemento cuyo diámetro sea mayor de 60 micras no pueden hidratarse por completo, ni siquiera en el hipotético caso que se les conservará durante años en contacto con el agua, dado que en este caso el mayor espesor de los estratos de gel no permite ya una difusión apreciable. Se puede hablar de «una porción inútil en el cemento» y especificar la eliminación de estas partículas gruesas mediante una correspondiente molienda fina.

La finura de molienda se determina usualmente por el método del permeabilímetro Blaine, que proporciona un índice de la superficie específica. Los valores Blaine se calculan a partir de la permeabilidad al aire de una capa de cemento, compactada en condiciones precisas. El estrato de polvo de cemento con determinado volumen de poros, opone al paso del aire una resistencia que es tanto mayor cuanto más elevada es la superficie del propio polvo. Los valores Blaine no son idénticos a la verdadera superficie específica del material que se investiga; pero sí proporcionan valores relativos útiles y suficientemente aproximados.

Por otra parte, el valor Blaine puede engañar también, sobre todo si se trata de mezclas de clinker portland y de materiales muy susceptibles al efecto de molienda, o bien si el clinker contiene porciones mal calcinadas, las cuales se muelen con mayor facilidad. En los casos indicados se obtienen erróneamente elevados valores Blaine que hacen creer en una finura de molienda extrema-

damente alta. Por lo tanto, el residuo sobre la Malla y la superficie específica son índices que deben considerarse oportuna y conjuntamente para calificar la finura de molienda de cada cemento.

10.5 HUMEDAD

La conservación de perfectas condiciones de humedad que rodeen la pasta de cemento es de primordial importancia, ya que el fenómeno de desecación del concreto representa el final del proceso de endurecimiento hidráulico. El gel de cemento puede extenderse a través de los espacios capilares llenos de agua; si el aire reemplaza al agua capilar cesa la formación de gel y sólo vuelve a reanudarse cuando nuevamente se suministra o se repone el agua evaporada.

En el fenómeno de desecación debe tenerse en consideración la influencia de la temperatura ambiente en relación a la temperatura del concreto. Igualmente debe considerarse la influencia de la humedad ambiente y de las corrientes de aire.

La magnitud del daño que la desecación produzca depende de las dimensiones del elemento de concreto que se está considerando. Principalmente sólo se afecta un espesor de algunos centímetros inmediatos a la superficie expuesta, debido a que el desalojamiento de agua en el interior del concreto se efectúa muy lentamente. Por este motivo la caída de resistencia es mucho más notable en la superficie.

10.6 TEMPERATURA

La influencia de la temperatura sobre la velocidad de endurecimiento es importante. Las temperaturas mayores aceleran el desarrollo del endurecimiento, y las más bajas lo hacen más lento.

De acuerdo a Saul, la siguiente fórmula establece una relación entre la temperatura y el desarrollo del endurecimiento:

$$R = A(t + 10)$$

R = Estado de madurez o grado de hidratación

A = Tiempo de almacenamiento en días u horas

t = Temperatura de curado o del medio que rodea al concreto.

La fórmula anterior permite, si se conoce la extensión del período necesario para que determinado concreto almacenado a la temperatura normal alcance cierta resistencia, calcular el tiempo que será necesario para obtener la resistencia indicada en distintas condiciones de temperatura.

Por ejemplo, si el estado de madurez después de 28 días, a la temperatura de 20°C es de:

$$R = 28(20 + 10) = 840$$

Para obtener el mismo grado de madurez, bajo una temperatura de almacenamiento de 5C, se ha de requerir:

$$840 = x(5 + 10)$$

$$x = 56 \text{ días}$$

Para cementos portland normales y un rango de temperaturas de 0C á 40C, la fórmula de Saul proporciona datos dignos de consideración. Las temperaturas más altas producen una aceleración ulterior del endurecimiento a expensas de la resistencia final.

La sensibilidad del cemento a las temperaturas elevadas es tanto mayor cuanto más grande es su energía de endurecimiento. Por el contrario, frecuentemente, las mezclas que endurecen a bajas temperaturas alcanzan resistencias finales más elevadas que aquellas que se curan a temperatura normal. Parece ser que a baja temperatura es mayor la cantidad final de agua combinada.

11. PROPIEDADES FISICAS

11.1 PESO ESPECIFICO

El peso específico del cemento corresponde al material al estado compacto. Su valor suele variar, para los cementos portland normales, entre 3.0 y 3.2. Las Normas Norteamericanas consideran un valor promedio de 3.15 y las Normas Alemanas e Inglesas un valor promedio de 3.12. En el caso de los cementos combinados el valor es menor de 3.0 y depende de la fineza del material adicionado.

Cuando el cemento contiene adiciones minerales que lo convierten en un cemento combinado, con una densidad menor a la del clinker puro, los valores indicados descienden notablemente, al igual que en el caso de los cementos meteorizados. Usualmente en el Perú se considera un valor del orden de 2.97 para los cemento Tipo IP y IPM.

Su determinación es particularmente necesaria en relación con el control y diseño de las mezclas de concreto. Se sigue las recomendaciones de la Norma ASTM C 188.

11.2 FINEZA

11.2.1 CONCEPTO

La fineza de un cemento es función del grado de molienda del mismo y se expresa por su superficie específica, la cual es definida como el área superficial total, expresada en centímetros cuadrados, de todas las partículas contenidas en un gramo de cemento. Se asume que todas las partículas tienen un perfil esférico.

11.2.2 IMPORTANCIA

La importancia de la fineza de un cemento radica en la influencia que puede tener sobre la velocidad de hidratación, la resistencia inicial y el calor generado.

El valor de la fineza decide la calidad en el sentido más amplio, de modo que cuanto más elevado sea el grado de fineza del aglomerante acabado, mayor extensión tendrán las reacciones de hidrólisis, dando lugar a un mayor desarrollo en la formación de hidrosilicatos, hidroaluminatos y geles por unidad de volumen, aumentando los gradientes de resistencia a la compresión y a la flexotracción, sobre todo a corto plazo.

11.2.3 EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES

Si bien el calor total generado y la resistencia en edades posteriores son algo mayores para los cementos más finos, el efecto de las mayores finezas se manifiesta principalmente durante el período inicial de hidratación.

La fragua de los cementos es más rápida y el agrietamiento más temprano conforme son más finos. Igualmente, a igualdad de relación agua-cemento, el flujo es menor para los cementos más finos; la exudación disminuye conforme la fineza se incrementa; y la absorción se incrementa con el grosor del grano.

La resistencia a la compresión se incrementa más que la resistencia a la tensión conforme aumenta la fineza del cemento. La resistencia a la compresión está relacionada a la resistencia a la flexión como la raíz cuadrada de la superficie específica.

La contracción parece ser una función lineal de la superficie específica. Los cementos más gruesos dan concretos menos durables debido a su mayor permeabilidad.

Troxell señala que, independientemente de la composición de un cemento, la fineza de las partículas influye en forma importante en la velocidad de reacción del cemento con el agua, siendo la velocidad de reacción mayor y el proceso de endurecimiento más rápido conforme aumenta la fineza de las partículas.

Orchard ha indicado que un incremento en la fineza del cemento aumenta la cohesión de la mezcla de concreto, permitiendo reducir la cantidad de agua

que exuda dicha mezcla, especialmente cuando el proceso de compactación de la misma es hecho por vibración.

11.2.4 LIMITACIONES

El empleo de cementos de baja superficie específica puede dar como resultado concretos de pobre trabajabilidad y exudación excesiva, los cuales pueden presentar fuertes pérdidas de agua antes de la iniciación del fraguado.

Cuando un cemento es molido demasiado finamente, las partículas extremadamente finas pueden ser prehidratadas por la humedad presente en los molinos, o en la atmósfera durante el período de almacenamiento, perdiendo su valor cementante.

El agrietamiento por contracción puede relacionarse con el grado de desarrollo de resistencia del concreto y, en general, los cementos que ganan rápidamente su resistencia son los más propensos a agrietarse. Al aumentar la fineza de cualquier cemento aumenta su velocidad para desarrollar resistencia y así, indirectamente, el riesgo de grietas por contracción.

11.2.5 DIAMETROS ADECUADOS

Troxell ha señalado que la parte más activa de un cemento es el material de diámetro menor de 10 a 15 micrones. Y desde que el área superficial varía con el cuadrado del diámetro de una partícula, un incremento de material en esta amplitud de tamaños es mucho más efectiva en el incremento de la superficie específica, y por tanto de la actividad de un cemento, que una correspondiente reducción en algunas de las fracciones más gruesas.

11.2.6 DETERMINACION DE LA FINEZA

Debido a su pequeño tamaño, las finas partículas de cemento son difícilmente separables por fracciones empleando tamices, habiendo sido necesario desarrollar métodos de ensayo especiales para medir la aproximación cuantitativa de su distribución por tamaños.

Los dos aparatos especialmente desarrollados para medir la fineza de los cementos, de acuerdo a la Norma ASTM, son el Turbidímetro Wagner y el Aparato Blaine de Permeabilidad al Aire. Este último es el de uso común, reservándose los ensayos en el primero para casos de dirimencia.

11.2.6.1 APARATO BLAINE

Los valores Blaine se calculan a partir de la permeabilidad al aire de una capa de cemento, compactada en condiciones dadas. El estrato de polvo de cemento

con determinado volumen opone al paso del aire una resistencia que es tanto mayor cuanto más elevada es la superficie del polvo. Los valores Blaine no son idénticos a la verdadera superficie específica del material que se investiga, pero si proporcionan valores relativos útiles y suficientemente aproximados en la práctica.

Para la determinación del valor Blaine, se mide el tiempo «t» en que tiene lugar el paso del aire y, para un aparato dado y una porosidad estándar de 500, la superficie específica se calcula multiplicando la raíz cuadrada del tiempo «t» por una constante que es propia de cada aparato.

Debe tenerse en consideración que el valor Blaine puede engañar si se trata de mezclas de clinker portland y materiales muy suaves, o bien si el clinker contiene porciones mal calcinadas, las cuales se muelen con mayor facilidad. En los casos indicados se obtienen, erróneamente, elevados valores Blaine que hacen pensar en una finura de molienda extremadamente alta. En estos casos es conveniente completar este ensayo con el de Fineza por la Malla N° 325.

11.2.6.2 TURBIDIMETRO WAGNER

El Turbidímetro Wagner mide la concentración de partículas en suspensión en un nivel determinado de kerosene, empleando para ello un rayo de luz y midiendo el porcentaje de luz transmitido empleando una fotocelda.

El ensayo en el Turbidímetro generalmente da resultados adecuados, pero se introduce un error al asumir una distribución uniforme de tamaños de las partículas menores de 75 μ , cuando justamente es en esta fineza que se produce la mayor contribución a la superficie específica del cemento. Es debido a esta consideración que el Método Blaine da valores más altos.

11.3 CONTENIDO DE AIRE

La presencia de cantidades excesivas de aire en el cemento puede ser un factor que contribuya a reducir la resistencia de los concretos preparados con éste. El ensayo de contenido de aire da un índice indirecto de la fineza y grado de molienda del cemento. El ensayo se realiza de acuerdo a la Norma ASTM C 185.

La Norma ASTM C 150 indica un contenido máximo de aire en morteros de 12% para todos los cementos de esta clasificación.

11.4 FRAGUADO

El término fraguado se refiere al cambio del estado fluído al estado solido. Se dice que la pasta de cemento portland ha fraguado cuando está lo suficiente-

mente rígida como para soportar una presión arbitraria definida.

El tiempo de fraguado se divide en dos partes: el comienzo y el fin de la fragua, conocidos como la «fragua inicial» y la «fragua final». Cuando la pasta de cemento portland ha logrado la fragua final, empieza un nuevo período de incremento de su rigidez y resistencia denominado «endurecimiento»

El porcentaje de agua que se mezcla con el cemento tiene gran importancia sobre el tiempo de fraguado. Esta cantidad de agua se determina para cada tipo de cemento mediante el ensayo de consistencia normal.

El tiempo de fraguado del cemento es afectado en algo por su contenido de C3A, cuya acción es regulada por el SO₄Ca adicionado al clinker en el proceso de molienda. Pero la fineza del cemento, el contenido de agua de la pasta y la temperatura de almacenamiento son, generalmente, los factores más importantes.

Dentro de los valores usuales de fineza, de 3000 á 3300 cm²/gr, cuanto más fino es el cemento más rápida es la fragua, pudiendo los cementos demasiado finos tender a desarrollar fragua instantanea. Los altos contenidos de agua de la pasta demoran la fragua, e igualmente las bajas temperaturas también la retardan.

Es esencial que la fragua del cemento no sea ni demasiado rápida ni demasiado lenta. En el primer caso habría tiempo insuficiente para transportar y colocar el concreto antes que sea demasiado rígido. En el segundo de los casos se originarían retrasos en el trabajo y uso de la estructura.

El tiempo de fragua de las pastas de cemento, a las que se ha dado consistencia normal, se mide por la capacidad que tenga la pasta de soportar el peso de una varilla o aguja determinada. Para determinar el tiempo de fraguado se siguen las siguientes normas:

- Consistencia Normal, de acuerdo a ASTM C 187
- Fraguado Vicat, de acuerdo a ASTM C 191
- Fraguado Gillmore, de acuerdo a ASTM C 266

Para los cementos de la clasificación ASTM C 150, el tiempo de fraguado inicial, medido con la aguja Vicat, es de 45 minutos como mínimo y el tiempo de fraguado final es de 375 minutos como máximo. Si la medición se hace empleando la aguja Gillmore, el tiempo de fraguado inicial no debe ser menor de 60 minutos y el tiempo de fraguado final no debe ser mayor de 600 minutos.

Para los cementos combinados que cumplen con la Norma ASTM C 595, el tiempo de fraguado inicial, medido con la aguja Vicat no debe ser menor de 45 minutos, y el tiempo de fraguado final no debe ser mayor de 7 horas.

11.5 RESISTENCIAS MECANICAS

La resistencia mecánica del cemento endurecido es la propiedad física que define la capacidad del mismo para soportar esfuerzos sin falla y normalmente se emplea como uno de los criterios de aceptación por ser la más requerida desde el punto de vista estructural. No es por tanto sorprendente que los ensayos de resistencia sean prescritos en todas las especificaciones de cementos.

La resistencia de un cemento es función de su fineza, composición química, porcentaje de compuestos, grado de hidratación, así como del contenido de agua de la pasta. La velocidad de desarrollo de la resistencia es mayor durante el período inicial de endurecimiento y tiende a disminuir gradualmente en el tiempo. El valor de la resistencia a los 28 días se considera como la resistencia del cemento.

La resistencia inicial se hace mayor conforme se incrementa el contenido de C3S. Las resistencias después de los 7 días son fundamentalmente debidas al contenido de C2S. Es la suma de los silicatos cálcicos la que define la resistencia final de un cemento.

Ya se ha indicado, al desarrollar las teorías de hidratación, en que forma se desarrolla el proceso de endurecimiento del cemento. Sólo resta indicar que en las etapas iniciales del proceso de hidratación únicamente las capas externas de las partículas de cemento toman parte en la reacción química, pudiéndose apreciar, por examen microscópico, la existencia de partículas de cemento no hidratadas en la pasta endurecida. Estas últimas partículas continúan absorbiendo humedad, manteniendo de esta forma la reacción química y el incremento de resistencia en el tiempo.

La resistencia de un cemento se determina por ensayos de compresión y tracción en morteros preparados con dicho cemento y arena estándar. Los ensayos de compresión se efectúan de acuerdo a la Norma ASTM C 109 y los ensayos de tracción de acuerdo a la Norma ASTM C 190.

Debido a la enorme variación que se obtendría en los resultados de los ensayos, estos no se preparan empleando pasta pura, la cual ocasiona dificultades en el moldeo de las probetas.

Existen diversas formas de determinación de la resistencia: tensión directa, compresión directa y flexión. De ellas, las dos primeras son las utilizadas como medida de la calidad del cemento.

Para el curado de las probetas se utiliza el procedimiento de inmersión en agua que, aunque es distinto del que en la realidad se aplica en construcciones o en la industria, permite obtener condiciones constantes de humedad y temperatura, ambas indispensables cuando se desea obtener resultados reproducibles en el

control de la resistencia. Igualmente, el empleo de arena estándar, agregado de granulometría uniforme, elimina las variaciones que por este concepto suelen presentarse en la práctica de obra.

Los ensayos de resistencia en compresión se efectúan en muestras de sección cúbica, de dos pulgadas de lado, preparadas con morteros que tienen, en peso, una parte de cemento y 2.75 partes de arena estándar de Ottawa graduada entre las mallas N° 30 - 100. Para los cementos portland Normal Tipo I, la Norma ASTM C 150 señala una resistencia a la compresión de 245 kg/cm² a los 28 días.

Los ensayos de tracción son efectuados en briquetas en forma de ocho, las cuales tienen una sección transversal neta de una pulgada cuadrada y han sido preparadas con una mezcla de una parte, en peso, de cemento y tres partes de arena estándar de Ottawa graduada entre las Mallas N° 30 - 20. Para los cementos portland normal Tipo I, la Norma ASTM C 150 señala una resistencia a la tracción de 24.5 kg/cm² a los 28 días.

11.6 RETRACCION Y EXPANSION

La elevada porosidad de la pasta de cemento, que puede alcanzar al 40% del volumen para la hidratación completa, conjuntamente con la subdivisión muy fina de estos espacios porosos, da lugar a que se presenten durante la desecación y humedificación de la masa aglomerada variaciones volumétricas que se designan con los nombres de retracción y expansión.

Estas variaciones volumétricas dependen de factores tales como la humedad relativa ambiente; constitución de la pasta de cemento influenciada a su vez por la relación agua-cemento; el tipo de cemento y su grado de hidratación; naturaleza y proporción de los granos de cemento; e influencia de anhídrido carbónico del aire.

La influencia de la capacidad de expansión o retracción de los cementos reside en que ella condiciona la posibilidad y magnitud de los cambios de volumen que pueden experimentar los elementos estructurales, cambios que cuando son importantes se manifiestan en agrietamiento de los elementos.

El procedimiento de ensayo se efectúa siguiendo las recomendaciones de la Norma ASTM C 157.

11.7 CALOR DE HIDRATACION

11.7.1 CONCEPTO

El fraguado y endurecimiento de la pasta es un proceso químico por lo que, durante las reacciones que tienen lugar entre los compuestos del cemento y el

agua, la hidratación del cemento es acompañada por liberación de una cantidad de calor, la cual depende principalmente de la composición química y de la fineza del cemento.

De lo expuesto puede definirse al calor de hidratación como a la cantidad de calor, expresada en calorías por gramo de cemento no hidratado, desarrollada por hidratación completa a una temperatura determinada.

El calor de hidratación de los cementos normales es de 85 á 100 cal/gr., por lo que en las condiciones normales de construcción el calor se disipa rápidamente por radiación, siendo los cambios de temperatura dentro de la estructura relativamente pequeños y probablemente de pocas consecuencias.

Pero, en estructuras de concreto en grandes masas, la poca conductibilidad térmica de este material, que es un mal disipador del calor, impide la rápida radiación de éste último, pudiendo alcanzar la masa de concreto elevadas temperaturas. Estos aumentos de temperatura pueden ocasionar expansión mientras el concreto se está endureciendo y dar por resultado contracciones y agrietamiento al irse enfriando la masa hasta la temperatura ambiente.

11.7.2 MAGNITUD DEL CALOR

El calor de hidratación completa se puede obtener observando la diferencia entre el calor de disolución del compuesto, o fase anhidra, y el de disolución del mismo material después de haberse hidratado por completo.

En la práctica, es generalmente más importante saber la cantidad de calor liberada en tiempos determinados. Ello puede conocerse midiendo constantemente la intensidad de liberación de calor durante el tiempo dado. Estas medidas, sin embargo, no pueden practicarse durante un período mayor de unos cuantos días. Otro método consiste en observar la diferencia entre el calor de hidratación de un material no hidratado y el de la pasta después de la hidratación, durante el período de tiempo requerido.

Al estudiar la composición del cemento para fines en que el calor liberado es un factor de importancia, es necesario saber la cantidad de calor que produce cada compuesto. Los compuestos del cemento hidratan y liberan calor a diferentes edades. El C3A hidrata en su mayor porcentaje durante el primer día, el C3S durante la primera semana y el C2S después de la primera semana. El calor liberado por el C4Af es relativamente pequeño.

Al respecto, la cantidad de calor liberada en la hidratación completa de los compuestos principales del cemento, fue establecida por Lerch y Bogue.

Dichos valores, expresados en calorías-gramo, son los siguientes:

- Aluminato tricálcico 207 cal/gr.
- Silicato Tricálcico 120 cal/gr.
- Ferroaluminato tetracálcico 100 cal/gr.
- Silicato Bicálcico 62 cal/gr.
- Oxido de calcio 279 cal/gr.
- Oxido de magnesio 203 cal/gr.

En término medio, la hidratación total de un cemento portland produce aproximadamente 120 cal/gr. El desarrollo de calor durante el endurecimiento continúa durante un período aproximado de seis meses, pero la mayor parte del calor se produce en los tres primeros días.

De los resultados presentados se desprende que los cementos de elevado contenido de C3S y C3A son los que tienen mayores calores de hidratación, sin considerar el CaO libre, porque debe ser minoritario. Son a su vez los cementos que poseerán las mayores resistencias mecánicas a todos los plazos. Una variable común es la finura, de modo que a mayor división de partículas corresponde un mayor calor de hidratación en los primeros días, luego su influencia es pequeña.

Si el yeso se ha deshidratado en los molinos, el calor liberado al volverse a hidratar sería de 46 calorías por gramo de SO₃, que, para los porcentajes de sulfato de calcio normalmente empleados, llegaría a ser alrededor de una caloría por gramo de cemento. Lo pequeño

de este valor y la poca certeza del proceso de deshidratación durante el molido, hacen que en las formulas de determinación no se considere este factor.

11.7.3 EFECTOS DE COMPOSICION

Wood, Steinour y Starke han determinado el calor desarrollado durante el fraguado y endurecimiento de diversos cementos, con composición química variable, y en tiempos que comprendían de tres días a un año.

Como resultado de sus estudios encontraron que los cementos portland siguen desarrollando calor durante su endurecimiento, por un período no menor de seis meses por lo menos, pero que la mayoría de dicho calor se produce durante los tres primeros días.

Igualmente determinaron que la velocidad de liberación del calor dependía principalmente de la composición química del cemento, siendo el calor de hidratación del mismo casi equivalente a la suma de los calores individuales de los compuestos, cuando ellos son hidratados separadamente.

De acuerdo a estos estudios se ha establecido que, dada la composición de un cemento, su calor de hidratación puede ser calculado con un buen grado de

seguridad aplicando la siguiente ecuación que corresponde al calor de un gramo de cemento:

$$136 \text{ C3S} + 62 \text{ C2S} + 200 \text{ C3A} + 30 \text{ C4AF}$$

Ecuación en la que los compuestos indican porcentajes en peso de los compuestos individuales determinados a partir del análisis químico.

Los estudios de la Building Research Station han permitido determinar que las cantidades de calor liberadas por los cementos ricos en alumina son las mismas que las de un cemento en endurecimiento rápido, ello a las 48 horas, pero que el primero de los cementos libera su calor más rápidamente. Los cementos normales producen cantidades de calor notablemente menores en todas las edades hasta los tres días.

Los trabajos de Bogue han permitido establecer que un aumento en el contenido de aluminato tricálcico da lugar a aumentos importantes en la velocidad de liberación y cantidad total de calor producido, y que aumentos en el contenido de silicato tricálcico también significan incrementos en la producción de calor. Esto último plantea la posibilidad de obtener modificaciones en el calor de hidratación por variación en los porcentajes de silicato tricálcico y aluminato tricálcico por adecuada dosificación del crudo.

Otros factores que influyen en el desarrollo de calor son un incremento en la pérdida por calcinación con una disminución en el calor de hidratación. La alta temperatura inicial de curado acelera el desarrollo de calor en tanto que una temperatura inicial lo retarda. Modificar la relación agua-cemento no afecta significativamente el desarrollo de calor. El incremento de MgO produce incrementos poco significativos en el calor de hidratación.

11.7.4 CONSIDERACIONES FINALES

La liberación de calor puede disminuirse reduciendo el contenido de C3A del cemento. Si se desea disminuir aún más el desarrollo de calor habría que hacer descender el contenido de C3S. Si bien ello podría disminuir la resistencia inicial, el correspondiente incremento de C2S garantiza que no se afectará la resistencia final.

El calor de hidratación produce en climas fríos un nivel de autoprotección contra la temperatura exterior. Así, la elección del cemento es importante ya sea que se trate de grandes volúmenes de concreto, o de vaciados en climas cálidos o fríos.

El calor de fraguado es definido como la evolución del calor producida hasta cuando se alcanza la fragua final. Esta evolución de calor representa 1/10 a 1/5 del calor total de hidratación.

Para determinar el calor de hidratación de los cementos, los dos métodos más empleados son el indicado en la Norma ASTM C 186 y el método francés de la Botella Aislante.

11.8. ESTABILIDAD DE VOLUMEN

11.8.1 CONCEPTO

Se define como estabilidad de volumen de un cemento a la capacidad de éste para mantener un volumen constante una vez fraguado. Se considera que un cemento es poco estable cuando tiende a sufrir un proceso de expansión lentamente y por un largo período de tiempo. El efecto de un cemento poco estable puede no ser apreciado durante meses, pero a la larga es capaz de originar fuertes agrietamientos en el concreto y aún fallas eventuales.

11.8.2 CAUSAS

La falta de estabilidad de volumen es debida a la presencia de yeso o a un exceso de cal libre o magnesia, los cuales tienden a hidratarse y expandir.

11.8.3 CONTROL

Entre los factores que pueden evitar una expansión excesiva, o falta de estabilidad de volumen, se indica la molienda fina de los crudos que posibilita que estén en más íntimo contacto durante el proceso de quemado, disminuyendo las posibilidades de presencia de cal libre. Igualmente, la molienda fina del clinker tiende a exponer la cal libre y facilitar su hidratación.

11.8.4 DETERMINACION

La estabilidad de volumen de los cementos se determina mediante el ensayo de expansión en el autoclave, considerándose estables a los cementos que no presentan una expansión mayor del 0.8%.

11.9 FISURACION

La fisuración es una propiedad física que es consecuencia de los cambios de volumen que se pueden presentar en pastas puras, morteros y concretos. La fisuración por contracción es función del tipo de cemento, de su composición química y fineza de molienda, y de la relación agua-cemento empleada.

El tiempo de fisuración aumenta con el porcentaje de C2S. El sulfato de calcio provoca aumento de volumen de la pasta y tiende a prolongar el tiempo de fisuración. Esta disminuye con cementos menos finos. Un porcentaje creciente de agua de mezclado aumenta ligeramente la contracción de la pasta pura.

Mientras mayor es la humedad ambiente la fisuración es menor, siendo nula bajo el agua la contracción. La fisuración aumenta significativamente mientras mayor sea la temperatura ambiente.

La fisuración por contracción no sólo es peligrosa por su magnitud final sino también por la rapidez de su aparición, produciéndose inicialmente una microfisuración precursora de un rompimiento por efecto de desgarramiento y por la rapidez de su evolución, ya que una contracción que evoluciona rápidamente es más peligrosa que la que se produce lentamente, debido a que la primera no da tiempo al desarrollo progresivo de las resistencias mecánicas.

En general las fisuras no son peligrosas cuando ellas son pequeñas y uniformemente repartidas; pero deben evitarse si existe la posibilidad que puedan contribuir a la oxidación de las armaduras, a la permeabilidad del concreto, o a deteriorar la apariencia cara vista.

La capacidad de fisuración es importante porque su determinación permite conocer la calidad de los cementos y la sensibilidad de estos a la contracción. No existe una Norma ASTM para el ensayo de fisuración, solíéndose emplear la Norma AFNOR P15-351.

12. TIPOS DE CEMENTOS

La totalidad de los cementos empleados en el Perú son cementos portland tal como los especifica la Norma ASTM C 150; o cementos combinados, de acuerdo a lo indicado en la Norma ASTM C 595

De acuerdo a lo recomendado por la Norma ASTM C 150, los cinco tipos de cementos portland normal que pueden ser clasificados como estándar y cuya fabricación está normada por requisitos específicos son:

- Tipo I .. De uso general, donde no se requiere propiedades especiales.
- Tipo II.. De moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación. Especialmente adecuados para ser empleados en estructuras en ambientes agresivos y/o vaciados masivos.
- Tipo III De desarrollo rápido de resistencia con elevado calor de hidratación. Especiales para uso en los casos en que se necesita adelantar la puesta en servicios de las estructuras, o para uso en climas fríos.
- Tipo IV . De bajo calor de hidratación, recomendables para concretos masivos.
- Tipo V .. Recomendables para ambientes muy agresivos por su alta resistencia a los sulfatos.

De estos cinco tipos en el Perú sólo se fabrican los Tipos I, II, y V.

Si a los cementos se les ha añadido el sufijo A significa que son cementos a los que se ha añadido incorporadores de aire en su composición, manteniendo las propiedades originales. En el Perú no se fabrica este Tipo de cementos.

Los denominados «cementos adicionados» son mezclas de cemento y un material de características puzolánicas molidos en forma conjunta. En el Perú se fabrican los Tipos IP, IPM, IS, y ISM

La justificación de la fabricación de los «cementos adicionados» es la necesidad, por una parte, de diluir la presencia del clinker en el conglomerante, cuyos productos hidrolizados pueden ser atacados según las circunstancias por agentes agresivos diversos, y producir la destrucción del concreto.

Por otra parte, la conveniencia de reducir, con esta dilución, el calor desarrollado en la hidrólisis, que actúa desfavorablemente en la puesta en obra de grandes masas de concreto, elevando su temperatura como consecuencia del bajo grado de conductividad térmica del concreto (entre 0,002 y 0,004 cal/cm/°C) En el enfriamiento se producen contracciones importantes que pueden dar lugar a la formación de fisuras.

El cemento Tipo IP es un cemento al cual se ha añadido puzolana en un porcentaje que oscila entre el 15% y el 40% del peso total.

El cemento Tipo IPM es un cemento al que se le ha añadido puzolana en un porcentaje menor del 15% del peso total.

El cemento Tipo IS es un cemento al cual se le ha añadido entre 25% y 75% de escoria de altos hornos referido al peso total.

El cemento Tipo ISM es un cemento al cual se ha añadido menos del 25% de escoria de altos hornos referida al peso total.

Adicionalmente, en los Estados Unidos, para su empleo en casos especiales, se fabrican los:

- a. Cementos Expansivos y los cementos compensantes de la expansión, son diseñados para expandir un pequeño volumen durante los primeros días de hidratación y compensar los efectos de la contracción por secado. Su propósito es reducir el agrietamiento resultante de la contracción por secado. Su comportamiento radica en la formación de una cantidad de etringita mayor que la usual durante el proceso de hidratación, originándose una expansión. Este tipo de cemento está cubierto por la Norma ASTM C 845.
- b. Cementos de Escorias, los que de acuerdo a la Norma ASTM C 358 son

materiales finamente divididos que consisten esencialmente de escoria de altos hornos granulada, enfriada en agua, y cal hidratada. El porcentaje mínimo de escoria es de 60% en peso.

- c. Cementos Reguladores del Fraguado, los cuales son similares en su composición a los cementos portland, excepto que el clinker del cual son preparados contiene pequeñas cantidades de flúor. Se utilizan para tener un tiempo de fraguado inusualmente corto seguido por el desarrollo de una moderada resistencia inicial.
- c. Cementos Naturales, a los cuales la Norma ASTM C 10 define como al producto obtenido de la calcinación de calizas arcillosas finamente pulverizadas. La temperatura de calcinación no deberá ser mayor que la necesaria para eliminar el dióxido carbónico.
- d. Cementos Sobresulfatados, los cuales son productos que se obtienen de la mezcla y molienda íntima de escoria de altos hornos granulada, enfriada rápidamente, incluida en proporción de un 80% a 85%, y sulfato de calcio dehidratado, u otros tipos de sulfato de calcio hidratado o de anhidrita natural o artificial, incluido en proporción de un 10% a 15%, junto con 1% á 2% de cemento portland.
- e. Cementos Aluminosos, o de alto contenido de alúmina, se caracterizan por su color oscuro, su alta resistencia inicial, su alto calor de hidratación, y su resistencia a los ataques químicos. Se emplean principalmente en la industria de refractarios. Los cementos de baja pureza se utilizan igualmente para concretos que han de estar expuestos a medios ácidos y determinadas industrias de desechos, y para parchado y reparación cuando se necesitan muy altas resistencias iniciales.
- f. Los cementos de Albañilería son compuestos de clinker de cemento portland, caliza, yeso y un agente incorporador de aire. Una mezcla de estos ingredientes es molida a una fineza mayor que la del cemento portland de alta resistencia inicial. Son utilizados en morteros de albañilería y están regulados por la Norma ASTM C 91 y su empleo está cubierto por la Norma ASTM C 270.
- g. Cementos para Inyecciones, son cementos portland complementados con arena fina, bentonitas, bentonita y aditivos retardantes, en forma de partículas finamente molidas, se emplean para inyectar fisuras muy delgadas a alta presión.
- h. Cementos Metalúrgicos, los cuales son mezclas finamente molidas de clinker portland con escoria de altos hornos y yeso para regular el tiempo de fraguado.
- i. Cementos Coloreados, los cuales son fabricados bajo condiciones cuidadosamente controladas dan colores especiales, tales como el blanco o el amarillo ligero, los cuales son principalmente empleados en concretos arquitectónicos.
- j. Los Cementos Plásticos están dosificados para ser empleados en morteros para estucos. Son cementos portland modificados por pequeños porcentajes de aditivos que le dan al mortero fluidez y facilitan la aplicación

- del estuco.
- k. Los Cementos Impermeabilizantes, o repelentes de agua, o cementos hidrófugos, son cementos portland molidos conjuntamente con ácido esteárico, u otro repelente de agua, con el objeto de impartir rechazo hacia el agua al concreto.
 - i. Los cementos Magnesio-Fosfato son cementos no portland que se emplean en el parchado de carreteras. Ellos pueden consistir de un polvo seco y un ácido fosfórico líquido con el cual se mezcla el polvo; o pueden consistir de un solo componente al cual se adiciona agua.

13. REQUISITOS QUIMICOS

El cemento elegido deberá cumplir con los requisitos químicos y limitaciones indicados en las Normas ASTM ó NTP correspondientes.

Si el cemento se emplea con agregados potencialmente reactivos su contenido de álcalis no será mayor del 0.6% calculado como el porcentaje de $\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{ K}_2\text{O}$

Si al emplear cemento Tipo II se requiere moderado calor de hidratación, la suma del silicato tricálcico (C3S) más el aluminato tricálcico (C3A) no deberá exceder del 58%.

Si se emplea cemento Tipo V, la suma del alúmino ferrito tetracálcico (C4AF) más el doble del aluminato tricálcico (C3A) no deberá exceder del 20%.

14. REQUISITOS FISICOS

El cemento elegido deberá cumplir con los requisitos físicos y limitaciones indicados en la Norma correspondiente.

En aquellos casos en que no sea conocida, la superficie específica se considerará de 3200 cm^2/gr para los cementos portland normales y de 4700 cm^2/gr . para los cementos puzolánicos. Para la determinación de la superficie específica se utilizará el Método Blaine.

En aquellos casos en que no sea conocido el valor real, se considerará para el cemento portland normal un peso específico de 3.15 y de 2.97 para los cementos puzolánicos.

Para los ensayos de tiempo de fraguado se utilizará el Método Vicat.

Los requisitos de calor de hidratación se aplicarán únicamente cuando son especificados. En este caso los requisitos de resistencia podrán ser el 80% de los valores indicados en la Norma correspondiente.

15. REQUISITOS DE OBRA

Las especificaciones de obra deberán indicar el Tipo y marca del cemento a ser empleado. A falta de esta indicación se empleará el cemento portland normal Tipo I.

En concretos que han de estar expuestos a la acción de los ataques químicos, la selección del cemento tendrá en consideración las condiciones de durabilidad del concreto.

El cemento empleado en obra será del mismo tipo y marca que el utilizado para la selección de las proporciones de la mezcla de concreto. Esta recomendación es mandatoria en aquellos casos en los que para el cálculo de la desviación estándar y la resistencia promedio se ha empleado resultados de mezclas preparadas con cemento de un tipo y marca determinados.

Si la desviación estándar se ha calculado en base a los resultados de ensayos de concretos preparados con cementos de un mismo tipo pero de diferentes marcas, el criterio empleado en obra podrá ser menos exigente.

Deberá considerarse, tanto en la compra del cemento como en la selección de las proporciones de la mezcla, que un peso dado de un cemento puzolánico tiene un volumen absoluto mayor que el mismo peso de cemento portland normal; así como que, a igualdad de pesos, el cemento puzolánico requiere más agua para obtener la misma consistencia.

16. EFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO

16.1 ASPECTOS GENERALES

El cemento debe ser caracterizado en función de sus efectos sobre las propiedades del concreto y en forma secundaria en función de su composición química. Para propiedades tales como la resistencia y estabilidad de volumen, existen ensayos rápidos y aceptables. Para otras que implican ensayos en el largo plazo, el tiempo requerido por estos y la dificultad de duplicar las condiciones de trabajo obligan a aceptar predicciones de comportamiento en el largo plazo a partir de resultados conocidos.

Por lo tanto, una adecuada selección del cemento a fin de cumplir con propiedades específicas o condiciones especiales de servicio, puede únicamente realizarse si se entiende la influencia del cemento sobre las propiedades individuales del concreto.

16.2 AGRIETAMIENTO TERMICO

Desde que la hidratación del cemento es una reacción exotérmica, se libera calor conforme el cemento hidrata. El volumen y la velocidad de liberación son funciones de la composición y fineza del cemento siendo, en general, la velocidad de liberación de calor paralela a la velocidad de incremento de la resistencia.

En la mayoría de las construcciones de concreto el calor desarrollado es rápidamente disipado y tiene poca importancia. En estructuras tales como cimentaciones masivas, grandes estribos, o presas, deben tomarse precauciones para limitar la elevación de temperatura y evitar que la expansión térmica sea lo suficientemente importante como para que posteriormente se presente agrietamiento, ya sea en el exterior de la masa enfriada con contracción desde el interior, o debido a que la totalidad de la estructura enfría y las grietas debidas al empotramiento se imponen.

Los principales compuestos del cemento portland hidratan en diferentes magnitudes e igualmente rinden considerablemente diferentes volúmenes de calor por unidad de masa hidratada. En general el C3A desarrolla la mayoría del calor en el primer día y el C3S en la primera semana; el C2S y el C4AF hidratan más lentamente.

La fineza del cemento es un factor importante que interviene en la liberación de calor, especialmente en las primeras edades. Adicionalmente, el efecto de la fineza es el principal contribuyente a las diferencias entre los valores obtenidos utilizando el cemento Tipo I o el Tipo III. En todos los casos, incluyendo el Tipo III, los cementos continúan hidratando aún a edades de un año. La velocidad de liberación de calor durante la hidratación está relacionada a la velocidad de ganancia de resistencia para cada uno de los cinco tipos de cemento. Es práctica aceptada que el único calor de hidratación importante es el de los siete primeros días.

A menudo se asume que los cementos combinados tienen calores de hidratación menores que los cementos portland pero, dependiendo de los ingredientes, ellos pueden tener calor de hidratación menor o aproximadamente igual. El efecto del calor en una estructura igualmente puede depender de la masa del elemento y su edad.

Los cementos expansivos compensantes de la contracción tienen calores de hidratación que son moderadamente mayores que aquellos de los cementos portland empleados en su fabricación.

En general, el control del calor de hidratación es más importante conforme aumenta la sección del elemento, y se incrementa la temperatura ambiente.

16.3 MANEJABILIDAD

Diversas características del cemento pueden influir en el concreto y en la facilidad de colocación del mismo. A continuación se indica algunos de los factores que intervienen:

16.3.1 CANTIDAD DE CEMENTO

La cantidad de cemento a emplear en la mezcla es un primer factor que debe ser considerado. El cemento es el material que en el concreto tiene el menor tamaño de partículas. El volumen de cemento en la mezcla tiene un efecto importante sobre la plasticidad y facilidad de colocación de ésta.

Las llamadas mezclas pobres, o mezclas con un pobre contenido de cemento, tienden a ser ásperas y difíciles de trabajar, siendo por lo tanto más difíciles de colocar y acabar. Las llamadas mezclas ricas, o mezclas que contienen cantidades importantes de cemento, tienden a tener más cuerpo y son más cohesivas, fluidas y trabajables. Sin embargo, las mezclas muy ricas tienden a ser demasiado cohesivas y más difíciles de colocar.

16.3.2 FINEZA DEL CEMENTO

La fineza del cemento influye en la manejabilidad, trabajabilidad y contenido de agua de una mezcla de concreto de la misma manera como el volumen de cemento empleado en el mismo. Sin embargo, la importancia de la fineza del cemento es secundaria en relación a los efectos de la cantidad de cemento empleada.

Las mezclas de bajo contenido de cemento tienden a perder coherencia, exudar en forma excesiva, y segregar. El empleo de un cemento de partículas gruesas tiende a agravar esta tendencia. Conforme la fineza o la cantidad de cemento se incrementan, la mezcla será más cohesiva. Al mismo tiempo, la cantidad de agua requerida para obtener un asentamiento determinado puede disminuir, reduciéndose la tendencia a exudar y segregar.

En contenidos de cemento intermedios, incrementos adicionales de cemento pueden hacer la mezcla más ligosa y difícil de colocar, debiendo incrementarse el contenido de agua. El contenido de cemento para el cual ocurre el mínimo requerimiento de agua y la óptima trabajabilidad, se reduce si la fineza del cemento se incrementa.

En el concreto, otros constituyentes tales como el aire incorporado, y los materiales finos y las arcillas presentes en el agregado, igualmente afectan la trabajabilidad, plasticidad y requisitos de agua de la mezcla.

16.3.3 CARACTERISTICAS DEL FRAGUADO

Las características de fraguado o atesamiento del cemento son transferidas directamente a la mezcla de concreto. La tendencia de la mezcla a adquirir rigidez prematuramente o a perder asentamiento rápidamente, afecta directamente a la facilidad de manejo, la consolidación y las características de acabado. Las características de fraguado normal o de rigidización deberán determinar el tiempo disponible para colocación, consolidación y acabado. Las mezclas ricas frecuentemente fraguan un poco más rápido que las mezclas pobres.

La temperatura del concreto tiene un efecto significativo sobre su velocidad de endurecimiento. La temperatura del cemento en si misma tiene muy poca influencia sobre la temperatura del concreto y por consiguiente sobre su velocidad de endurecimiento.

Es importante distinguir entre la pérdida normal de asentamiento del concreto en el tiempo y los efectos de una falsa fragua del concreto. La pérdida de asentamiento normal es gradual y más o menos proporcional al tiempo hasta que ya no hay asentamiento. La pérdida de asentamiento ordinaria no puede ser restablecida por remezclado.

Con una falsa fragua todo el asentamiento se pierde en 5 á 10 minutos, pero el remezclado permite recuperar la casi totalidad del asentamiento original. Un caso moderado de falsa fragua puede dar por resultado una alta velocidad de pérdida de asentamiento inmediatamente después del mezclado. La falsa fragua es menos afectada por la temperatura del concreto que el asentamiento, la pérdida del cual es más rápida en climas cálidos.

Los concretos que contienen un aditivo reductor de agua o un retardador pueden presentar pérdidas de asentamiento más rápidas que concretos similares sin el aditivo. Este efecto es especialmente pronunciado y común cuando se emplea plastificantes.

Los cementos expansivos compensadores de la contracción pueden presentar una pérdida de asentamiento ligeramente mayor que la de los cementos portland en climas cálidos.

16.4 RESISTENCIA

16.4.1 COMPONENTES Y COMPUESTOS

En los últimos 60 años muchos investigadores han trabajado la posibilidad de predecir la resistencia en compresión potencial del cemento portland a partir de su composición química expresada ya sea como compuestos potenciales u óxidos.

Como ya se ha indicado el C3S, C2S y C3A son los principales compuestos productores de resistencia en el cemento portland. La proporción de ellos puede variar en el proceso de fabricación cambiando tanto las características de la resistencia inicial como las de la resistencia en el largo plazo. Los siguientes párrafos describen dichos efectos para temperaturas de curado entre 2C y 90C.

Incrementos en la proporción de C3S aumentan la resistencia en edades de 10 á 20 horas a los 28 días. El porcentaje de C3S en el cemento portland varía del 35% al 70%.

El C2S contribuye ligeramente a la resistencia en edades de uno a dos días y significativamente en la resistencia a los 28 días. Su principal efecto es incrementar la resistencia en las edades posteriores. Sin embargo, los incrementos en la proporción de C2S con disminuciones proporcionales en el contenido de C3S generalmente disminuyen la resistencia a los 28 días e incrementan las edades entre los 45 a 60 días hasta los 5 años ó más.

La contribución del C2S en la resistencia a largo plazo depende principalmente de la disponibilidad de humedad. En secciones de concreto relativamente delgadas que se permite que sequen a edades tempranas, la hidratación se detiene cuando la humedad relativa interna cae por debajo del 80% y no se obtienen los beneficios los C2S en edades posteriores.

Las secciones de concreto de gran espesor tienden a retener la humedad y obtener el beneficio de la contribución de la resistencia a largo plazo del C2S. Algunos de estos beneficios ocurren en secciones de 20 cms de espesor, pero los mayores efectos se presentan en secciones con espesores de 60 cms. o mayores, dependiendo de las condiciones de secado. La mayoría de los cementos portland contienen de 10% a 35% de C2S.

El C3A contribuye principalmente a la resistencia en las primeras 24 horas. El C3A por si mismo hidrata rápidamente. Al mismo tiempo su hidratación genera calor lo cual tiene un modesto efecto en acelerar la hidratación del C3S y del C2S. El contenido de C3A de los cementos portland varía de 0% a 17%.

El C4AF tiene muy pequeña contribución a la resistencia del cemento portland. Su presencia se debe a que facilita la formación del clinker del cemento portland y por lo tanto de los silicatos productores de la resistencia. El contenido típico de C4AF varía de 5% a 20%.

Algunos de los componentes menores del cemento portland tambien afectan la resistencia. En especial la cantidad de sulfato de calcio es normalmente elegida para optimizar la resistencia y otras propiedades bajo las condiciones de empleo y curado comunes.

Las pérdidas por calcinación del cemento son generalmente un indicador de la cantidad de agua o bióxido de carbono, o ambos, químicamente combinadas con el cemento. La resistencia tiende a disminuir con incrementos en la pérdida por calcinación. La presencia de agua combinada en un cemento puede deberse a clinker que ha estado almacenado demasiado tiempo. La presencia de agua combinada produce un falso incremento en la fineza, determinada por el Método Blaine, por lo que para mantener la fineza inicial el cemento debe ser molido a una fineza significativamente más alta.

Normalmente están presentes en el cemento pequeños porcentajes de sodio y potasio, provenientes del combustible o los materiales crudos. Su efecto sobre la resistencia a la fecha no está bien comprendido. Algunos ensayos han indicado que el potasio origina pequeños incrementos en la resistencia en los primeros días pero que tiene muy pequeño efecto sobre la resistencia en edades finales. Inversamente, el sodio tiene pequeño efecto sobre la resistencia en las edades iniciales pero causa una moderada disminución de resistencia en las edades finales.

El óxido de magnesio está presente en el cemento portland debido a su inevitable ocurrencia en la materia prima. En las proporciones generalmente presentes tiene muy pequeño efecto sobre la resistencia. El ASTM C 150 limita el óxido de magnesio a un máximo del 6% para evitar la posibilidad de fallas por durabilidad.

La ganancia de resistencia de los cementos expansivos compensantes de la contracción es comparable a los cementos portland Tipo I.

16.4.2 FINEZA

Las altas finezas, tales como las de los cementos de alta resistencia inicial, incrementan las resistencias del cemento portland en las edades iniciales y hasta los 28 días. El efecto es más pronunciado en las primeras 10 á 20 horas y disminuye conforme la edad se incrementa.

A edades de dos a tres meses, bajo curado húmedo, los cementos de alta fineza (aproximadamente 5000 cm²/gr. Blaine) proporcionan resistencias aproximadamente iguales a los cementos de fineza normal (3500 cm²/gr. Blaine). A edades mayores de dos a tres meses, las resistencias de los cementos de fineza normal son mayores que las de los cementos de alta fineza siempre que el curado sea mantenido a fin que se produzca la hidratación.

Si el contenido de cemento se mantiene constante, los cementos de muy alta fineza pueden incrementar los requisitos de agua en una magnitud tal que los beneficios de la alta resistencia inicial sean parcialmente dejados de lado por las altas relaciones agua-cemento necesarias por trabajabilidad y colocación.

Las características de resistencia del cemento portland son igualmente afectadas

por las condiciones de quemado en el horno de clinkerización, la presencia de elementos menores y la distribución por tamaño de las partículas. Por estas razones pueden haber diferencias moderadas en cementos que aparentemente tienen composición y fineza similares.

Cuando se compara en relaciones agua-cemento constantes y finezas comparables, la resistencia de los cementos portland es generalmente más alta que la de los cementos combinados a edades de 7 días o menores, y más baja en edades de 28 días o mayores. Los cementos combinados son generalmente molidos a una fineza mayor que la de los cementos portland a fin de lograr que sus resistencias iniciales sean comparables a las de los cementos portland.

16.5 ESTABILIDAD DE VOLUMEN

El concreto está sujeto a cambios en su volumen durante el fraguado y el proceso de endurecimiento inicial y posteriormente, después que él ha ganado una resistencia significativa. El concreto recién mezclado está sujeto a cambios de volumen por exudación, cambios de temperatura, reacciones de hidratación del cemento y secado.

La exudación es la segregación del agua hacia la superficie del concreto debido al asentamiento de los ingredientes sólidos. La magnitud de la exudación está generalmente influenciada por el asentamiento, relación agua-cemento, granulometría y cantidad de finos en los agregados, y otras variables relacionadas con las proporciones del concreto. Las propiedades del cemento que tienden a disminuir la exudación incluyen incrementos en la fineza, especialmente incremento en la cantidad de los tamaños menores presentes en el cemento, incremento en el contenido de álcalis, e incremento en el contenido de C3A.

Las reacciones de hidratación en los cementos normales ocurren durante el fraguado y endurecimiento y tienden a producir pequeños cambios en el volumen de la pasta hidratada. Excepto en el caso de los cementos expansivos, estos cambios de volumen no son importantes para el comportamiento del concreto.

Los cementos que contienen cantidades significativamente mayores que lo normal de cal libre (CaO) o de periclase (MgO) pueden ser potencialmente expansivos, con efecto destructivo debido a la hidratación de estos compuestos. Los cementos que presentan esta expansión potencial destructiva no son estables.

La falta de estabilidad de volumen suele ser muy rara en los cementos comerciales, dado que tal tendencia puede ser rápidamente detectada por el ensayo de estabilidad de volumen de acuerdo a ASTM C 151, que es un ensayo de rutina en la calificación de cementos.

La rápida evaporación del agua de la superficie del concreto durante y después del proceso de acabado pero antes de la finalización del proceso de fraguado, es la causa principal del agrietamiento por contracción plástica. La velocidad de evaporación depende de la velocidad del viento, la humedad relativa, y de las temperaturas del aire y del concreto. Los constituyentes del concreto y sus proporciones relativas afectan la exudación, asentamiento, tiempo de fraguado y propiedades reológicas del concreto al estado no endurecido. Sin embargo, los intentos de relacionar estas propiedades con la ocurrencia o extensión del agrietamiento plástico todavía no ha tenido éxito.

El concreto cambia de volumen con cambios en la temperatura. El coeficiente de expansión térmica lineal está generalmente entre 6 y 12 millonésimos por °C. El valor de un concreto dado es el promedio pesado de los valores de la pasta y el agregado. El coeficiente de la pasta varía con el contenido de humedad de la misma pero aparentemente no es afectado por el tipo, marca, u otras características del cemento.

La magnitud y velocidad de contracción por secado del concreto depende de un gran número de factores incluyendo la cantidad y tipo de agregado, el contenido de agua de mezclado, la presencia y tipo de aditivo, las proporciones de los ingredientes y los materiales empleados. Todos estos factores son analizados en la recomendación ACI 209R.

Los agregados tienen como una de sus funciones limitar la relativamente alta contracción potencial de la pasta de cemento; sin embargo, en algunos casos, se puede presentar alta concentración cuando los agregados tienen un bajo módulo de elasticidad o contienen materiales que también cambian de volumen con cambios en el contenido de humedad. El efecto combinado de una mala selección de materiales y prácticas constructivas puede producir concretos con contracciones por secado hasta siete veces mayores que aquellas que se obtendrían con una adecuada selección de materiales y prácticas.

Los cementos pueden tener efecto importante sobre la contracción por secado del concreto. Los efectos son mínimos si el cemento es mantenido en un óptimo contenido de SO₃. En los ensayos de un gran número de cementos, no se ha podido apreciar una clara diferencia entre la contracción potencial de diferentes tipos de cementos, variando ésta desde 25% menos del promedio hasta 40% más que éste. Los cementos con un contenido de SO₃ menor en un 0.5% que el óptimo presentan contracciones por secado incrementadas en el 10% al 24%. El óptimo SO₃ se incrementa con la temperatura del concreto y puede aumentar si se emplea determinados aditivos reductores de agua. Los sulfatos presentes en el cemento pueden también afectar el óptimo contenido de SO₃.

16.6 PROPIEDADES ELASTICAS

El módulo de elasticidad del concreto es una función del módulo de elasticidad de la pasta de cemento (la cual forma la fase continua del concreto), del módulo de elasticidad del agregado (las partículas del cual se presentan como una inclusión dentro de la matriz) y el volumen de concentración de cada una de ellas.

Los productos sólidos de hidratación del cemento portland tienen un módulo de elasticidad prácticamente constante independientemente de la composición del cemento. El módulo de elasticidad de la pasta es función de la magnitud en que los productos de hidratación han llenado los poros capilares, siendo mayor el módulo cuanto mayor es el espacio ocupado. El grado de llenado se incrementa cuando la relación agua-cemento disminuye y el grado de hidratación se incrementa. Para los valores usuales de la relación agua-cemento y para las edades para las cuales la información es generalmente deseada, el módulo de elasticidad de la pasta está generalmente entre 7000 y 14000 Mpa

Desde que los valores indicados son menores que los de los agregados de peso normal y desde que el volumen de agregado es generalmente de 3 a 4 veces mayor que el de la pasta, el agregado es el mayor determinante del módulo de elasticidad del concreto. El principal efecto del cemento es incrementar el módulo de elasticidad del concreto conforme la relación agua-cemento disminuye y el grado de hidratación se incrementa, y reducir el modulo conforme la concentración del volumen de pasta se incrementa.

16.7 ESCURRIMIENTO PLASTICO

El ingrediente del concreto que tiene la capacidad de experimentar escurrimiento plástico es la pasta de cemento hidratada. Para propósitos prácticos el agregado es perfectamente elástico y no tiene escurrimiento plástico. La dureza del agregado, por lo tanto, es un parámetro importante en determinar el escurrimiento plástico del concreto, siendo menor éste conforme es mayor la dureza del agregado. La propiedad de la pasta que más afecta al escurrimiento es su porosidad, siendo menor el escurrimiento en las pastas de baja porosidad.

Virtualmente no hay un efecto directo de la composición del cemento excepto que los cementos con un contenido de yeso significativamente bajo pueden presentar un incremento en el escurrimiento. El Comité 209 del American Concrete Institute ha hecho un profundo estudio de interrelación entre el escurrimiento plástico y la relación agua-cemento.

Hay un efecto secundario de la composición del cemento sobre el escurrimiento plástico. Ello resulta del hecho que el escurrimiento es un fenómeno que solamente existe sobre un período de tiempo y que la magnitud del escurrimiento

es una función de la relación esfuerzo-deformación en un tiempo dado. El incremento en la resistencia durante el período de observación afecta la magnitud del escurrimiento y este incremento está relacionado a la composición del cemento.

Así, si concretos que contienen diferentes tipos de cemento son cargados a una relación esfuerzo-resistencia dada en una temprana edad, un concreto que tiene cemento Tipo IV deberá escurrir poco y uno que tiene cemento Tipo III más, con los otros tipos rindiendo resultados intermedios. Ello es debido a que el cemento Tipo IV deberá experimentar los mayores valores de incremento en la resistencia durante el período de observación.

Si los concretos son cargados al mismo nivel de esfuerzos en una edad relativamente temprana, aquellos que han sido preparados con cemento Tipo III tendrán los escurrimientos menores y los preparados con cemento Tipo IV los mayores, dado que los concretos con cemento Tipo III estarán sometidos a las menores relaciones esfuerzo-resistencia. El escurrimiento plástico es muy comunmente analizado en términos del escurrimiento por unidad de esfuerzo (escurrimiento específico).

Estudios de elasticidad y escurrimiento plástico de pastas de cemento con y sin puzolana demuestra como la proporción y edad de la pasta determinan la magnitud de su escurrimiento. Desde que ambas propiedades son función de la porosidad, puede anticiparse que hay una interrelación única entre las dos, pudiendo decirse que, para una relación dada agua-material cementante, las pastas que contienen puzolana experimentan mayor escurrimiento en las edades iniciales que aquellas que contienen únicamente cemento portland, ello como resultado de su menor volumen de material hidratado. Si se cargan en edades posteriores, las dos son esencialmente idénticas.

16.8 PERMEABILIDAD

La composición por compuestos de un cemento de una fineza dada afecta la permeabilidad de la pasta, para una relación agua-cemento dada a una edad determinada, únicamente en la medida que influye en la velocidad de hidratación. La porosidad final y la permeabilidad a edades posteriores no son afectadas. Sin embargo, para una relación agua-cemento dada, Power ha encontrado que los cementos de menor fineza tienden a producir pastas con más alta porosidad que los cementos más finos.

La permeabilidad del concreto depende de la de la pasta así como la del agregado y la proporción relativa de cada uno de ellos. También depende fuertemente de los procedimientos de colocación, acabado y curado, especialmente de la consolidación.

La permeabilidad del concreto al agua o al vapor no es una función simple de su porosidad, ya que depende igualmente del tamaño, distribución y continuidad de los poros tanto en la pasta de cemento como en el agregado.

Los poros en la pasta son de dos clases. Los poros gel, los cuales constituyen el 28% del volumen de la pasta y son espacios intersticiales dentro de la masa de gel. Ellos son muy pequeños, del tamaño de una burbuja de agua. Los poros capilares son mayores, entre 100 y 1000 micrones, y están irregularmente distribuidos a través de la pasta de cemento. Debido a que los poros capilares representan el remanente de los espacios originalmente llenos de agua, ellos pueden variar de 0% a 40%, dependiendo de la relación agua-cemento original y del grado de hidratación.

Conforme la hidratación progresa la permeabilidad disminuye. Así, normalmente, cuanto más alta es la resistencia de una pasta dada, o mayor es el tiempo de curado, menor es su permeabilidad.

El flujo de agua a través del concreto es similar al flujo a través de un cuerpo poroso. Power ha presentado una relación entre la permeabilidad y la porosidad capilar del cemento. Para pastas hidratadas al mismo grado, la permeabilidad será menor conforme disminuye la relación agua-cemento.

Puede esperarse que el aire incorporado incremente la permeabilidad del concreto. Sin embargo, desde que el aire incorporado reduce los requisitos de la relación agua-cemento, así como la exudación, y mejora la trabajabilidad, el efecto final de la incorporación de aire será una reducción en la permeabilidad.

Existe evidencia de laboratorio en el sentido que las pastas y concretos preparados con cementos combinados, conteniendo cenizas o escoria, tienen permeabilidades menores que las de pasta y concretos comparables preparados con cementos portland.

16.9 CORROSION DEL ACERO

Un concreto que es adecuadamente dosificado, compactado y curado, proporciona excelente protección contra la corrosión del acero embebido cuando el recubrimiento del acero es adecuado.

Para que ocurra corrosión deberá haber disponibles agua y oxígeno en la superficie del acero embebido y la alcalinidad del concreto deberá haber sido reducida a valores por debajo de un pH de 9. Sin embargo, cuando la calidad del concreto y la cobertura son adecuadas, la causa más frecuente de un proceso de corrosión es la presencia de cloruros. La presencia de metales disímiles embebidos en concretos que contienen cloruros facilita un rápido inicio de procesos corrosivos.

El tipo de cemento tiene un efecto secundario sobre el nivel de protección del acero. Hay informes discrepantes en relación a que el cemento con alto contenido de álcalis tiene un mejor comportamiento en medios alcalinos. De acuerdo a Verbeck cuanto más alto es el contenido de C3A mayor es la cantidad de ion cloro que puede ser precipitado como cloroaluminato de calcio insoluble, convirtiendo así a este elemento en inocuo en relación con la corrosión del acero. Los concretos densos que tienen baja permeabilidad con adecuada cobertura de recubrimiento y bajo volumen de cloruros deberán ser empleados para proporcionar protección contra la corrosión. Bajo condiciones de exposición severas, se puede requerir protección adicional tal como refuerzo revestido de epoxy a fin de prevenir la corrosión.

16.10 RESISTENCIA A LA CONGELACION

La vulnerabilidad del concreto a daños debidos a procesos de congelación y deshielo depende principalmente de si él se encuentra en condición de saturación crítica con agua. Ello a su vez es una función de la estructura porosa de la pasta y de la exposición a condiciones que proporcionen suficiente acceso a la humedad.

La saturación crítica es aquella condición por debajo de la cual los daños por congelación no tienen lugar. Ella es generalmente el 90% del volumen de agua requerido para llenar totalmente los poros capilares del concreto. Los efectos benéficos de la incorporación de un sistema de burbujas de aire escapan a la influencia del cemento en lo que se refiere a proporcionar resistencia a procesos de congelación y deshielo.

Aunque los cementos con incorporador de aire son una opción disponible en determinados países, generalmente es preferible preparar concretos con aire incorporado empleando un aditivo cuando se requiere resistencia a procesos de congelación y deshielo. Los cementos con incorporador de aire pueden ser especialmente útiles en aquellos casos en los que el concreto va a ser preparado en condiciones en las que no va a haber control de calidad, especialmente cuando no se dispone de medios para medir el contenido de aire del concreto fresco.

El criterio para determinar si un concreto se encuentra en condiciones de saturación crítica depende en parte de su permeabilidad y de su sistema de burbujas de aire. Por ello el efecto de un cemento sobre la resistencia del concreto a congelación y deshielo depende del grado con el que sus características afectan la permeabilidad y el sistema de burbujas de aire del concreto.

La permeabilidad disminuye conforme la hidratación aumenta y, por lo tanto, la resistencia se desarrolla y el número de poros capilares disminuye. Por ello, la permeabilidad de los concretos de la misma edad e igual relación agua-cemento

no deberá ser la misma si la velocidad y magnitud de ganancia de resistencia, la cual es función de las características del cemento, difiere para los diferentes cementos empleados.

Por ello, desde el punto de vista de la permeabilidad, las propiedades del cemento son importantes en la medida que ellas influyen en la resistencia y permeabilidad del concreto al momento de su exposición a procesos de congelación y deshielo. El American Concrete Institute recomienda que, bajo condiciones severas de congelación y deshielo, concretos adecuadamente dosificados con aire incorporado deberán tener una resistencia en compresión no menor de 280 kg/cm² a los 28 días; la resistencia recomendada para exposiciones moderadas es de 210 kg/cm². Ello significa que secciones delgadas de concreto que contienen cementos de lenta ganancia de resistencia (tales como algunos cementos Tipo IV y IP) requieren generalmente tiempos de curado mayores para alcanzar el mismo grado de protección que el de aquellos cementos con una alta velocidad de desarrollo de resistencia.

Aunque la importancia del desarrollo de un adecuado sistema de burbujas de aire es indiscutible, la reducción de la permeabilidad por el empleo de una baja relación agua-cemento y el logro de una adecuada hidratación por un curado apropiado son aspectos que corresponden al cemento.

La influencia de la composición del cemento sobre la resistencia a los procesos de congelación y deshielo es importante en sólo dos aspectos:

- a. El cemento puede afectar la resistencia y la permeabilidad al momento en que los procesos de congelación y deshielo ocurren.
- b. El cemento puede afectar los requerimientos de aditivo incorporador de aire para producir un sistema de burbujas de aire satisfactorio.

16.11 RESISTENCIA A ATAQUES QUIMICOS

El primer requisito para obtener resistencia a ataques químicos en el concreto es que sea preparado con un cemento adecuado, o una combinación cemento-puzolana o cemento-escoria adecuada. Además, el empleo de una baja relación agua-cemento acompañada de una cuidadosa compactación y un curado adecuado, a fin de producir un concreto de alta densidad, deberán contribuir a incrementar su resistencia a ataques químicos. El aire incorporado puede ser una ayuda.

Los concretos preparados con cemento portland son generalmente resistentes a acciones químicas cuyo pH es mayor de 6. Hay, sin embargo, notables excepciones y condiciones calificantes. Así el ataque por sulfatos es de especial importancia debido a la presencia de estas sales en suelos, agua de mar, aguas freáticas y procesos químicos provenientes de los efluentes. Debido a la

tendencia de los cementos portland de alto contenido de C3A a ser susceptibles al ataque de sulfatos, los cementos de bajo contenido de este compuesto (tipos II y V) son a menudo empleados para concretos en medios ricos en sulfatos.

Los cementos de alto contenido de alúmina pueden ser requeridos cuando el concreto va a ser empleado en un medio especialmente agresivo en el que el pH está en el rango de 3.5 á 6.0, desde que este tipo de cementos resiste a un conjunto de agentes que normalmente atacan a los concretos de cemento portland.

Si se prepara un mortero el cual es químicamente resistente a una solución especialmente agresiva, el agregado grueso empleado para hacer el concreto deberá también ser resistente. Sin embargo, si se emplea un mortero ordinario y por lo tanto no resistente a los ácidos en un concreto expuesto al ataque de éstos, puede ser ventajoso emplear agregado grueso soluble en ácidos, tal como la caliza. En este caso, la cantidad de ácido disponible para atacar el concreto deberá reducirse en aquella que se emplea en sacrificar el agregado grueso.

El concreto puede ser, en algunas oportunidades, protegido de agentes agresivos por un adecuado recubrimiento o por agentes impregnantes. Los recubrimientos son analizados en detalle en la recomendación ACI 515.1R y la impregnación con polímeros en ACI 548R.

Las sales descongelantes, tales como los cloruros de sodio y de calcio, aceleran los daños por congelación y deshielo en concretos preparados con cemento portland que no son resistentes a la congelación. Estos materiales posiblemente no atacan al concreto químicamente, pero tienden a incrementar el grado de saturación y por tanto incrementan la posibilidad de daños por congelación del agua en los poros capilares. El aire incorporado es un requisito necesario para concretos resistentes a la congelación.

16.12 RESISTENCIA A LAS ALTAS TEMPERATURAS

Si están adecuadamente preparados y secos, los concretos preparados con cemento portland pueden resistir temperaturas en el orden de 100C con pequeñas pérdidas de resistencia. También pueden resistir temperaturas del orden de 300C por varias horas con sólo una pequeña pérdida de resistencia debida a la deshidratación parcial y alteración del silicato de calcio hidratado.

Si se requiere resistencia a temperaturas más altas, deberá considerarse tanto las propiedades del cemento como las del agregado. Los cementos portland ya han sido empleados a temperaturas tan altas como 1100 C con agregados procesados al fuego en operaciones no cíclicas.

Para aplicaciones más severas se han empleado cementos de alto contenido

de alúmina de alta pureza combinados con agregados refractarios seleccionados a fin de producir concretos refractarios adecuados para ser empleados a temperaturas tan altas como 1870°C. El SP 57 del ACI y la recomendación ACI 547 proporcionan información mayor sobre concretos refractarios empleando ligantes a base de cementos hidráulicos.

16.13 REACCION CEMENTO-AGREGADOS

16.13.1 ALCANCE

Las pastas de cemento hidráulico hidratado son sistemas químicamente activos y muchas de las sustancias presentes en el agregado pueden reaccionar, en algún grado, con la pasta de cemento. Las reacciones químicas entre la pasta y el agregado que pueden destruir o comprometer seriamente la estabilidad de las estructuras de concreto no son comunes pero si lo suficientemente frecuentes como para justificar su estudio.

Algunos materiales del agregado pueden reaccionar con casi todas las pastas, independientemente de su composición. Tales agregados son aquellos que son solubles en agua, fácilmente descompuestos por oxidación en presencia del agua, o reaccionan fácilmente con el agua para formar hidratos.

Los constituyentes del agregado solubles en agua incluyen los sulfatos naturales, tales como el yeso y la anhidrita, y los cloruros naturales, tales como la halita (NaCl). Los constituyentes del agregado que se descomponen por oxidación en la presencia del agua incluyen un conjunto de sulfuros de hierro inestables a menudo asociados con carbón, lignito y esquistos negros. Los constituyentes o contaminantes que hidratan incluyen la anhidrita, la periclase, la cal viva, y el clinker de cemento portland.

16.13.2 REACCION ALCALI-SILICE

Las más importantes reacciones cemento-agregados, desde el punto de vista de su daño potencial al concreto, son las que pueden ocurrir con los álcalis. De ellas la mejor conocida y mayormente estudiada es la reacción álcali-sílice. Ella resulta de la presencia de soluciones concentradas de álcali hidróxido (o hidróxido alcalino) en los poros del concreto.

Estas reacciones son generadas por la interacción de los componentes secundarios de sodio o de potasio presentes en el cemento, usualmente en la forma de sulfatos, con la fase líquida en el cemento en hidratación. Como resultado de la renovación de los iones sulfato o calcio en forma de etringita, los cationes y los iones hidróxido se acumulan en la fase líquida. El incremento en el pH origina ataques en los agregados reactivos o en las puzolanas. Desde que es la acumulación de iones hidróxido y la subsiguiente alta alcalinidad los

que originan la reacción de los agregados reactivos, un nombre más apropiado que la reacción álcali-sílice debería ser hidróxido-sílice.

Dependiendo de la concentración de iones hidróxido, la presencia y proporción de partículas de agregado reactivas y sus características físicas, y de la relación agua-cemento y contenido de cemento del concreto, los productos de la relación álcali-sílice pueden ser un gel hidratado calcio-álcali-sílice que es expansivo en un grado limitado o un gel hidratado álcali-sílice el cual puede tomar agua y expandir mucho más destruyendo el concreto.

La expansión se considera que es excesiva si, realizados los ensayos de acuerdo a ASTM C 227, se excede de 0.05 a los tres meses ó de 0.10 a los 6 meses. Este es un criterio adecuado si se reconoce que los cuarzos y cuarzitas son capaces de importante reactividad, hecho que también puede ocurrir en las argillitas, grauvacas, y otras rocas sedimentarias y metamórficas aparentemente normales.

La magnitud del daño a las estructuras varía ampliamente dependiendo de diferencias en las proporciones del concreto, relación agua-cemento, humedad relativa media anual, precipitación anual, y temperatura media anual. Algunas veces se requiere efectuar reparaciones para corregir problemas estructurales o de operación, pero en la mayoría de los casos las reparaciones son necesarias por razones de acabado.

Entre las principales sustancias reactivas que se pueden encontrar en los agregados se encuentran el opalo, la calcedonia, el cuarzo, la cristobalita, la tridimita, y algunos tipos de vidrios provenientes de rocas ácidas a intermedias o de sus productos de desvitrificación criptocristalina. La presencia de estos elementos en el agregado no significa necesariamente que la reacción debe aparecer en días o meses, o en uno a cincuenta años después que la estructura ha sido construída.

Siempre que ello sea posible los agregados deberán ser evaluados, tomándose en consideración su registro de servicios, el contenido de cemento empleado, la presencia y cantidad de álcalis del cemento, si el agregado fue empleado sólo o en combinación con otros agregados, y las condiciones de exposición y edad del concreto.

La importancia de esta evaluación se apoya en el hecho que en obra se ha encontrado que algunos horstemos han dado un buen registro de servicios empleados con cementos de alto contenido de álcalis aún cuando el examen petrográfico (ASTM C 295) y el examen químico rápido (ASTM C 289) indicaban reactividad. Si la información del registro de servicios es incompleta, los agregados deberán ser evaluados por examen petrográfico, el análisis químico

rápido, y el ensayo de expansión de barras de mortero. Es recomendable que por lo menos dos de los métodos sean empleados.

Si la fuente de abastecimiento de agregados es económica pero reactiva, los siguientes remedios pueden emplearse:

- a. Especificar cementos de bajo contenido de álcalis con un contenido total expresado como óxido de sodio equivalente (porcentaje de óxido de sodio más 0.658 del porcentaje de óxido de potasio) no mayor de 0.6.
- b. Emplear un cemento con un contenido total de álcalis, expresado como equivalente de óxido de sodio, mayor del 0.6%, mezclado con una puzolana que cumpla los requisitos de la Norma ASTM C 618, debiendo tener a mezcla suficiente puzolana para prevenir expansión excesiva.
- c. Emplear un cemento del Tipo IP, de acuerdo a los requisitos de la Norma ASTM C 595, considerando los requisitos opcionales respecto a expansión del mortero.
- d. Emplear cemento IS, de acuerdo a la especificación ASTM C 595, o una combinación de escoria que cumpla la Norma ASTM C 989 y cemento en el cual el contenido de escoria es suficiente para evitar expansión excesiva.

Algunos casos especiales de reactividad álcali-sílice requieren de procedimientos especiales. En algunos pocos casos cementos con un contenido total de álcalis justo debajo del 0.6%, como óxido de sodio equivalente, deberán ser empleados en combinación con una puzolana adecuada, o el contenido total de álcalis deberá ser aún menor, señalando el Bureau of Reclamation, en algunos casos, valores de 0.5%.

16.13.3 REACCION ALCALI-ROCAS CARBONATADAS

El segundo grupo de reacción potencial dañina es la reacción álcali-rocas carbonatadas. Se han descrito casos de expansión interna y agrietamiento, algunas veces seguidos por desintegración del concreto, cuando éste ha sido preparado empleando agregado proveniente de rocas carbonatadas trituradas.

El proceso es generalmente asociado con rocas que no se aproximan al carbonato de calcio puro, ni a la dolomita pura; principalmente las rocas reactivas consisten en cristales de dolomita mineral en una matriz fina de arcilla y calcita. Estas rocas pueden reaccionar por descomposición de la dolomita para formar hidróxido de magnesio, o por reacciones que comprendan hinchazón de los constituyentes de la arcilla.

La Norma ASTM C 586 puede ser empleada para identificar rocas carbonatadas capaces de reacción expansiva con los álcalis. Tales ensayos deberán ser empleados para complementar los datos de comportamiento en obra, examen petrográfico, y ensayos de agregados en el concreto. Ensayos realizados en Canadá y en ASTM sugieren límites de expansión permisible e indican que

tales agregados agresivos podrían ser empleados con cementos de bajo contenido de álcalis, posiblemente del orden del 0.4%.

16.14 COLOR

El color de un concreto es dependiente, entre otros factores, del cemento y otros materiales empleados. Variaciones en el color pueden ocurrir día a día en el producto de una planta de cemento, y debe esperarse diferencias en el color entre cementos producidos por diferentes fábricas.

El color del cemento refleja la composición química y las condiciones de procesamiento. Generalmente el color del cemento varía de tonalidades blanquecinas a grises o marrones. Los cementos blancos contienen muy poco hierro u otros minerales de transición (cromo, manganeso, vanadio). Así cada mineral de transición tiene su propia contribución al color del cemento. Por ejemplo, cementos experimentales preparados con cantidades inusualmente altas de cromo (pero sin ningún otro mineral de transición presente) son casi verdes. Las tonalidades comunes del gris al pardo de los cementos comerciales son principalmente debidas a los compuestos de hierro presentes. Muy pequeñas cantidades de otros minerales de transición también afectan el color. Algunos pigmentos son añadidos al cemento para producir cementos coloreados.

La contribución del color del cemento al del concreto depende de los pigmentos, cenizas, arena u otras partículas finas presentes. Variaciones en el color y la granulometría de todas las partículas finas pueden afectar la uniformidad en el color del concreto. Otros factores relacionados con el cemento que pueden causar variación en el color del concreto son las proporciones de mezcla, el movimiento de humedad, las condiciones de curado, las eflorescencias, y la carbonatación superficial.

En lo que se refiere a las proporciones de la mezcla se tiene que, si como es usual, el cemento es el principal contribuyente al color del concreto, el color será más intenso y oscuro con incrementos en el contenido de cemento o disminuciones en la relación agua-cemento.

El movimiento de humedad en el concreto puede afectar el color del mismo como un resultado de cambios en la relación agua-cemento en la superficie debido a exudación, absorción por las caras del encofrado, y pérdida de agua o mortero a través de las juntas o uniones entre planchas del encofrado. La absorción de agua en la cara de los encofrados cuando el concreto está endureciendo puede causar oscurecimiento de éste.

Los concretos a los cuales se les ha permitido secar rápidamente en las primeras etapas de su vida tienen un color más claro que aquellos que se han mantenido

húmedos. Como un resultado pueden presentarse diferencias de color de un área a otra del concreto cuando los encofrados son removidos a edades significativamente diferentes después de la colocación. Sin embargo, las diferencias tienden a ser menos marcadas en el tiempo. Siendo otros factores iguales, las superficies del concreto curado por métodos diferentes pueden exhibir coloración diferente.

Las eflorescencias son los depósitos blancos de sales que algunas veces se aprecian sobre la superficie del concreto o de la albañilería. En el caso del concreto, los depósitos son generalmente de carbonato de calcio, el cual se sabe no es fácilmente soluble en agua, y ocasionalmente pueden contener sulfatos de sodio o potasio, o bicarbonatos. los cuales son fácilmente solubles en agua. Algo del abundante hidróxido de calcio producido por la reacción de hidratación de los cementos normales es desplazado hacia la superficie del concreto, depositado y convertido en carbonato de calcio por reacción con el bióxido de carbono presente en el aire.

La incidencia de las eflorescencias está principalmente regulada por la permeabilidad y textura de la superficie del concreto y la velocidad de secado de la superficie.

Las variaciones en el color del concreto debidas al cemento pueden ser minimizadas si se trabaja con cemento del mismo tipo y fábrica y se mantiene una calidad uniforme en los procedimientos de control para proporcionamiento, mezclado, colocación, encofrado y curado del concreto.

17. NORMALIZACION

En todos los países existen normas para determinar el nivel de calidad de los cementos a emplear. En el Perú se trabaja con las Normas NTP y las Normas ASTM.

Estas Normas fijan los valores mínimos o máximos para los resultados obtenidos en un conjunto de ensayos físicos y químicos que definen sus principales variables.

La forma de realizar estos ensayos es con una misma técnica y de forma que los principales factores que puedan afectar a los resultados obtenidos, estén a su vez previamente estudiados y fijados como parámetros invariables en todas las determinaciones. Entre las más importantes para la determinación de resistencias figura la relación agua-cemento, la temperatura en que se efectúan las hidrólisis de los cementos que se ensayan, las proporciones de arena en los morteros, su procedencia y granulometría, etc.

Los ensayos establecidos para determinar los valores de fineza, tiempos de fraguado, resistencias a la compresión y a la flexo-tracción, principales constantes químicas como son el residuo insoluble, la pérdida al fuego, el contenido de MgO y de anhídrido sulfúrico, o el análisis químico integral, están redactados de forma normalizada, con objeto que sus resultados sean comparables con independencia del laboratorio que los realiza.

18. CONDICIONES DE COMPRA

El cemento podrá ser adquirido en bolsas o en volumen a granel. En el Perú la bolsa tiene un volumen de un pie cúbico (0,02832 m³) y un peso de 42.5 kg.

Las bolsas deberán estar en buenas condiciones al momento de la inspección por la Supervisión, no debiéndose aceptar en la obra aquellas que se encuentren averiadas o cuyo contenido hubiese sido alterado por la humedad.

El nombre y marca del fabricante, así como el Tipo al que corresponde el cemento, deberán estar indicados en las bolsas. Información similar deberá figurar en la nota de embarque que acompaña al cemento a granel, debiéndose tener especial cuidado en su transporte y almacenamiento.

19. APROBACION O RECHAZO DEL CEMENTO

Dependiendo del proyecto, la aprobación del cemento se podrá hacer de alguna de las siguientes formas:

- a. Entrega por el fabricante de un certificado de calidad con cada embarque.
- b. Toma de muestras y autorización de utilización cuando los resultados de los ensayos de Laboratorio indiquen que no hay inconveniente.

Son causas de rechazo del cemento:

- a. Si no cumple con algunos de los requisitos indicados en las Normas y/o especificaciones de obra.
- b. Si el cemento permanece almacenado en volumen, antes de su embarque, por más de seis meses, o ensacado por más de tres meses después de la realización de los ensayos, debiendo en este último caso ser re-ensayado antes de emplearlo y rechazado si no cumple con alguno de los requisitos indicados en la Norma correspondiente.
- c. Si el peso promedio de las bolsas de un embarque, tomado del peso de 50 bolsas elegidas al azar, es menor que el especificado. En este caso se podrá rechazar todo el embarque.

20. ALMACENAMIENTO Y ENTREGA DEL CEMENTO

20.1 TIEMPO DE ALMACENAMIENTO

El comportamiento de un cemento en el concreto puede ser afectado por las condiciones bajo las cuales el cemento es almacenado y por su manejo durante la entrega. Ello obliga a que el cemento se deba almacenar en obra de manera tal que se evite su deterioro o contaminación. El procedimiento de almacenamiento será aprobado por la Inspección. No se utilizará cementos deteriorados o contaminados.

El cemento puede ser almacenado por tiempo indefinido siempre que él esté protegido de la humedad, incluída la del aire. El cemento en volumen colocado en grandes silos de concreto en las plantas de cemento puede ser almacenado por años sin deterioro. El tiempo de almacenamiento puede ser menor si el cemento está en silos pequeños bajo condiciones en las que la humedad puede condensarse en el interior del silo, no siendo inusual un almacenamiento satisfactorio por muchos meses.

El tiempo de almacenamiento en sacos de papel es mucho más limitado. En climas húmedos o bajo condiciones de humedad ambiente, el cemento puede llenarse de trozos endurecidos en cuatro a seis semanas.

20.2 FRAGUADO DURANTE EL ALMACENAMIENTO

La presencia de terrones es una evidencia de reacción con la humedad, condición referida como fraguado en depósito y definida como «la hidratación parcial de un cemento almacenado por un tiempo y expuesto a humedad atmosférica, o a compactación mecánica, ocurridas durante el almacenaje». Si los terrones son removidos por tamizado, el cemento remanente es normalmente satisfactorio para ser empleado. Las medidas para minimizar el fraguado durante el almacenamiento pueden ser:

- a. Emplear el material conforme va siendo recibido en la obra.
- b. Mantener seca el área de almacenamiento.
- c. Almacenar los sacos sobre parihuelas colocadas en el suelo.
- d. Almacenar los sacos bajo cubierta a fin de mantenerlos protegidos de la humedad.
- e. La inspección e identificación deberán poderse efectuar fácilmente.

El cemento en bolsas:

- a. Se almacenará en un lugar techado, fresco, con ventilación adecuada, libre de humedad y protegido de la externa, sin contacto con el agua o suelo.
- b. Las bolsas se almacenarán en pilas hasta de diez a fin de facilitar su

- control y manejo y se cubrirán con material plástico u otro medio de protección adecuado.
- c. No se aceptará en obra bolsas cuya envoltura esté deteriorada o perforada, que presenten humedad, o aquellas cuyo peso no corresponda a la Norma.

El cemento a granel:

- a. Se almacenará en silos metálicos cerrados, a fin de garantizar sus propiedades e impedir cambios en su composición y propiedades físicas y químicas.
- b. Los silos deberán ser aprobados por la Supervisión, debiendo su geometría facilitar la salida del material e impedir el ingreso de humedad o sustancias contaminantes.
- c. Deberá tenerse especial cuidado durante el traslado del cemento de los camiones a los silos, a fin de evitar que se humedezca o contamine con sustancias extrañas.
- d. Para las puzolanas, cenizas, escorias finamente molidas y microsílices se seguirán las mismas recomendaciones.

La tendencia del cemento a hacer prehidratación depende de muchos factores incluyendo composición química temperatura de almacenamiento, temperatura de molienda, y humedad disponible durante la molienda. Su efecto sobre la calidad del cemento es generalmente despreciable, pero puede causar falsa fragua y una ligera pérdida en el desarrollo de resistencia.

20.3 CONTAMINACION

La mayoría de la contaminación del cemento ocurre durante los procesos de embarque y manejo. Generalmente es causada por fallas para mantener limpios los camiones en los cuales es transportado. Ejemplos de los efectos que pueden resultar por la contaminación de materiales comunes son los siguientes:

- a. Muy pequeñas cantidades de azúcar y almidón pueden causar retardo importante en el fraguado, e igualmente lo pueden causar pequeños volúmenes de compuestos de plomo, zinc y cobre.
- b. Fertilizantes a base de amonio, si están presentes en el cemento, deberán generar gas de amoniaco cuando el cemento entra en contacto con el agua. Si la contaminación es con sulfato de amonio, puede incrementarse el contenido de sulfato del concreto a un nivel que puede ser peligroso para éste. Entre otros compuestos del amonio, los fosfatos pueden causar retardo de la fragua, y los nitratos corrosión del acero de refuerzo.
- c. La contaminación con dolomita calcinada inactiva, como aquella que se emplea en la fabricación de refractarios, puede originar ampolladuras y aún deterioro del concreto.

20.4 VENTILACION

La ventilación o renovación del aire en el cemento portland puede originar falsa fragua, la cual normalmente no es un problema salvo que el tiempo de mezclado del concreto sea muy corto. La magnitud de la ventilación en el proceso de entrega normalmente es lo suficientemente corta como para que las propiedades del concreto sean alteradas.

La ventilación por períodos largos puede inducir pérdidas de asentamiento, incrementar los requisitos de agua, inducir a falsa fragua, o incrementar los resultados del ensayo de fineza Blaine.

20.5 PROTECCION DEL PERSONAL

Los operarios deberán proteger sus ojos y piel del cemento y mezclas, ya que el cemento puede causar serias dermatitis y daño a los ojos. Deberá evitarse el contacto de la pasta de cemento fresca, mortero, concreto, o lechada, con la piel. Cuando el contacto ocurre las áreas afectadas deben ser limpiadas rápidamente con agua. Si el cemento o la mezcla caen en los ojos, la persona deberá recibir atención médica inmediata.

21. MUESTREO DEL CEMENTO

El usuario debe conocer si los cementos que compra cumplen con los requisitos establecidos en las especificaciones y se puede lograr un nivel adecuado de uniformidad. Las especificaciones del Proyecto o la Supervisión determinarán siempre la frecuencia de la toma de muestras. El cemento se muestreará siguiendo el procedimiento indicado en la Norma ASTM C 183 o en la Norma NTP 334.037

22. ENSAYO DEL CEMENTO

El cemento se ensayará de acuerdo a lo indicado en las Normas ASTM C 150 y C 595 y complementarias, o en las Normas NTP correspondientes.

Los ensayos que pueden ser solicitados por el comprador al fabricante incluyen análisis químico, expansión en el autoclave, superficie específica por el Método Blaine, resistencia a la compresión en cubos de mortero, y tiempo de fraguado. Por otra parte, el comprador puede conformarse con las medidas de la superficie específica como un criterio de uniformidad.

23. CERTIFICACION DEL CEMENTO

La tendencia actual es aceptar la certificación entregada por el productor la cual indica que el cemento cumple con las especificaciones. El fabricante tiene

a su disposición una amplia variedad de tipos de información relacionada con los registros de producción y de control de calidad que pueden permitirle certificar la calidad del producto sin necesidad de testigos adicionales en el momento que el cemento es entregado.

Cuando el Contratista o la Supervisión desean muestrear y ensayar el cemento para verificar si cumple con las especificaciones, el muestreo deberá realizarse de acuerdo con lo indicado en la Norma ASTM C 183. El método indicado presenta diversas formas de muestreo del cemento dependiendo del punto de toma de la muestra. Las muestras deberán ser protegidas colocándolas directamente en recipientes impermeables y aislados del aire, a fin de evitar absorción de humedad y aireación. Las muestras deberán ser pasadas por el Tamiz N° 20 antes de ser ensayadas. Deben tomarse precauciones para evitar o minimizar la aireación del cemento.

Todos los ensayos indicados en ASTM o NTP no son requeridos para cada tipo de ensayo y algunos son requisitos opcionales solamente solicitados bajo condiciones específicas. Tanto la Norma ASTM C 150 como la Norma ASTM C 595 dan un listado de requisitos estándar y opcionales para cada tipo de cemento.

Todos los ensayos están sujetos a variaciones. Las mayores generalmente se experimentan entre laboratorios que para uno solo de ellos. El ensayo de cemento requiere de laboratorios calificados y con experiencia en los métodos que están siendo empleados.

Todos los cementos están sujetos a variaciones de fabricación. Generalmente sólo el tipo de cemento predominante en la planta es muestreado y los resultados entregados al usuario de este cemento. En la mayoría de los trabajos y debido al alto costo de los ensayos, la confianza descansa en los ensayos realizados por el productor.

Sin embargo un adecuado control del cemento es importante. El costo de buenos ensayos y adecuados controles es pequeño si se lo compara con el costo de renovación o reemplazo del concreto en las estructuras.

23. NORMAS TECNICAS PERUANAS

El INDECOPI por intermedio de su Comité Especializado en Cemento, a elaborado las siguientes Normas Técnicas de Cemento:

- | | | |
|---------|-----|--|
| 334.001 | ... | Cementos. Definiciones y Nomenclatura. |
| 334.002 | ... | Cementos. Método para la determinación de la finura expresada por la superficie específica (Blaine) |
| 334.003 | ... | Cementos. Procedimiento para la obtención de pastas y morteros de consistencia plástica por mezcla mecánica. |

334.004	...	Cementos. Ensayo de autoclave para determinar la estabilidad de volumen.
334.005	...	Cementos. Método de determinación del peso específico.
334.006	...	Cementos. Método de determinación de la resistencia normal y fraguado.
334.007	...	Cementos. Recomendación para la extracción de muestras.
334.008	...	Cemento Portland. Clasificación y nomenclatura.
334.009	...	Cemento Portland, Tipo I Normal.
334.016	...	Cementos. Análisis Químico. Disposiciones Generales.
334.017	...	Cementos. Análisis Químico. Método usual para la determinación de dióxido de silicio, óxido férrico, óxido de calcio, óxido de aluminio y óxido de magnesio.
334.018	...	Cemento. Análisis Químico. Anhídrido Sulfúrico.
334.019	...	Cementos. Análisis Químico. Método de arbitraje para determinación de dióxido de silicio, óxido férrico, óxido de aluminio, óxido de calcio y óxido de magnesio.
334.020	...	Cementos. Análisis Químico. Pérdida por Calcinación.
334.021	...	Cementos. Análisis Químico. Residuo Insoluble.
334.038	...	Cemento Portland Tipo II
334.039	...	Cemento Portland Tipo III
334.040	...	Cemento Portland Tipo V
334.041	...	Cemento. Análisis Químico. Método de determinación de óxido de sodio y óxido de potasio.
334.042	...	Cemento. Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión y a la compresión del mortero plástico.
334.043	...	Cemento Portland Puzolánico. Clasificación y nomenclatura.
334.044	...	Cemento Portland Puzolánico Tipo IP. Requisitos.
334.045	...	Cementos. Método de Ensayo para determinar la finura por tamizado húmedo con Tamiz ITINTEC N° 325
334.046	...	Cementos. Método de ensayo para determinar la finura por tamizado húmedo con tamiz ITINTEC N° 100 y N° 200
334.047	...	Cemento Portland Puzolánico, Método de Ensayo de determinación del calor de hidratación.
334.048	...	Cementos. Método de Ensayo para determinar el contenido de aire en morteros de cemento hidráulico.

23. GLOSARIO

MATERIAL CEMENTANTE.- Es aquel que tiene propiedades adhesivas y cohesivas que hacen posible una ligazón de fragmentos minerales de manera de producir una masa continua y compacta.

CLINKER PORTLAND.- Es un producto artificial obtenido por calcinación a elevada temperatura, de una mezcla de materias primas naturales calizas y arcillosas, debidamente dosificadas y molidas hasta alcanzar un grado de finura

adecuado.

CLINKER BLANCO.- Es un producto artificial obtenido por calcinación a elevada temperatura, de una mezcla de materias primas naturales calizas y arcillosas, excentas de hierro u otros materiales colorantes, debidamente dosificadas y molidas hasta alcanzar un grado de finura adecuado.

ESCORIA GRANULADA DE ALTO HORNO.- Es el subproducto del tratamiento de minerales de hierro en altos hornos, para ser usada en fabricación de cementos. Debe ser obtenida en forma granular por enfriamiento rápido y además debe tener una composición química conveniente.

PUZOLANAS.- Es un producto que posee propiedades puzolánicas. Puede ser natural (tierra de diatomeas, rocas opalinas, esquistos, etc.), material calcinado (los anteriormente nombrados y algunos otros como arcillas y esquistos más comunes) y material artificial (óxido de silicio precipitado y cenizas volantes).

PROPIEDAD HIDRAULICA.- Es la aptitud de un material pulverizado de fraguar y endurecer en presencia de agua y formar compuestos prácticamente estables.

PROPIEDAD PUZOLANICA.- Es la aptitud de un material que pulverizado fija hidróxido de calcio a la temperatura ambiente, formando en presencia de agua compuestos que poseen propiedades hidráulicas.

CEMENTO PORTLAND.- Es el producto obtenido por la pulverización del clinker portland con la adición requerida de yeso natural y que posee propiedades hidráulicas.

CEMENTO PORTLAND DE ESCORIA DE ALTOS HORNOS.- Es el producto obtenido por la pulverización conjunta del clinker portland y de escoria granulada de altos hornos con la adición requerida de yeso natural y que posee propiedades hidráulicas.

CEMENTO PORTLAND PUZOLANICO.- Es el producto obtenido por la pulverización conjunta del clinker portland y puzolana con la adición requerida de yeso natural.

CEMENTO PORTLAND ADICIONADO.- Es el producto obtenido por la pulverización conjunta del clinker portland y otros materiales arcillosos o calcareos arcillosos calcinados o no, que posean propiedades hidráulicas y/o puzolánicas con la adición requerida de yeso natural y que posee propiedades hidráulicas.

CEMENTO BLANCO.- Es un compuesto formado por la pulverización de clinker blanco con la adición requerida de yeso natural, y que posee propiedades hidráulicas.

PERDIDA POR CALCINACION.- Es la pérdida en peso de una muestra de

cemento sometida a una temperatura de 950°C a 1000°C. Refleja el grado de hidratación y presencia de carbonatos en el cemento.

RESIDUO INSOLUBLE.- Es la materia inerte de una muestra de cemento, que no es atacada por una solución diluida de ácido clorhídrico 1:1 cerca a la ebullición. Refleja el contenido de materiales extraños en los cementos portland a excepción del cemento portland puzolánico.

ANHIDRIDO SULFURICO.- Su contenido refleja el de yeso natural en el cemento. Se expresa como anhídrido sulfúrico, y actúa como regulador del fraguado.

OXIDO DE MAGNESIO.- Es la cantidad de magnesio contenida en el cemento y determinada como óxido de magnesio, el cual influye en cambios volumétricos de los morteros y concretos del cemento.

FINURA.- Es el grado de molienda determinado por (a) tamices y (b) el área superficial de las partículas (Método Blaine, Wagner, etc).

ESTABILIDAD DE VOLUMEN.- Expresa la expansión y contracción de las pastas de cemento sometidas a altas temperaturas y presiones.

FRAGUADO INICIAL.- Expresa un aumento relativamente brusco de la cohesión de una pasta de cemento, acompañado de una elevación de temperatura.

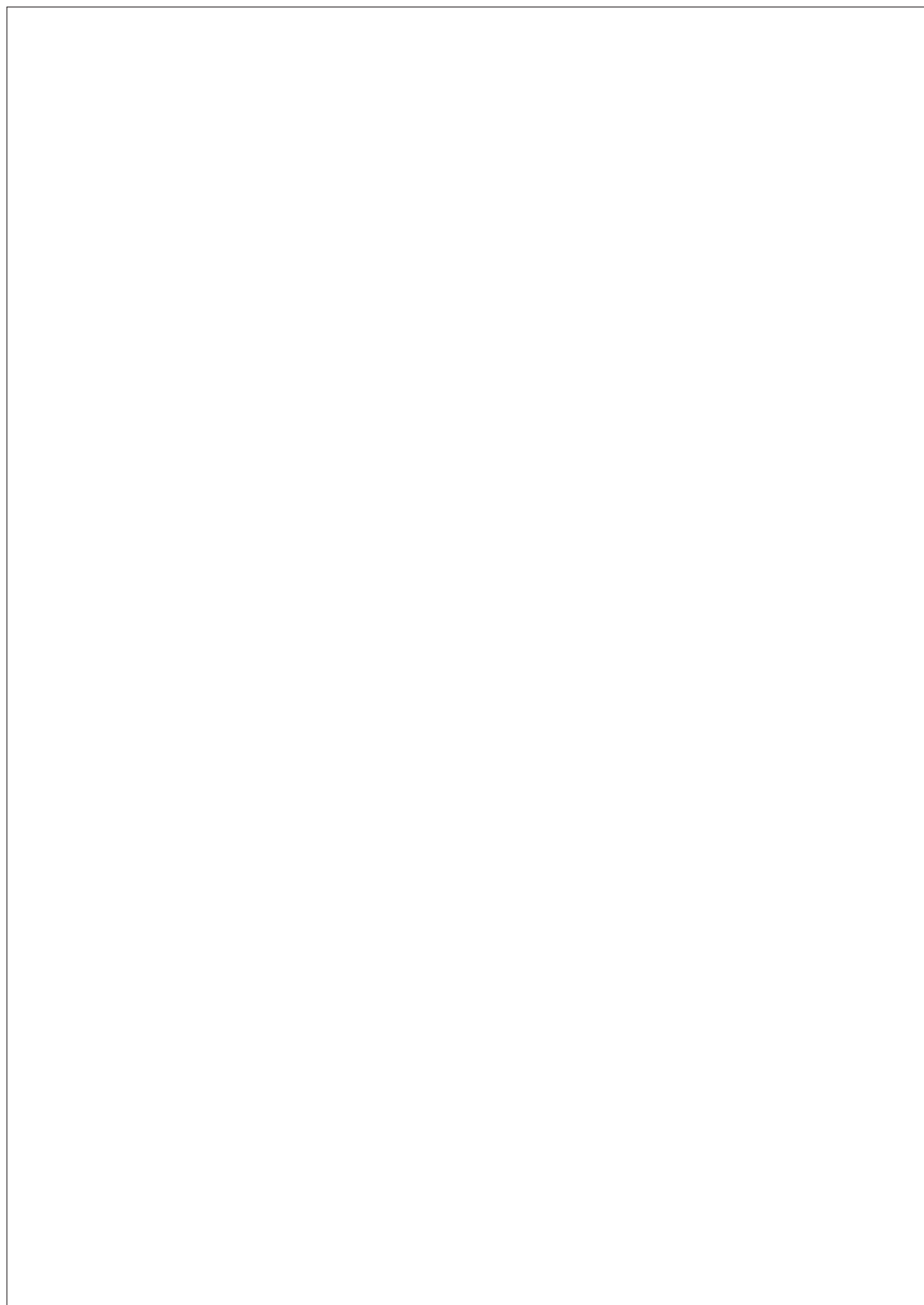
FRAGUADO FINAL.- Expresa el tiempo que la pasta de cemento deja de ser deformable y se transforma en un bloque rígido. Las resistencias mecánicas de este bloque crecen regularmente con el tiempo (endurecimiento)

FALSO FRAGUADO.- Fenómeno que se produce durante y después del mezclado y que se caracteriza con un espesamiento de la pasta o mortero sin desprendimiento apreciable de calor. Un mezclado prolongado restituye al material su plasticidad.

CONTENIDO DE AIRE.- Es el aire retenido en las pastas y morteros de cemento, se expresa en porcentaje del volumen total.

RESISTENCIA A LA COMPRESION.- Es un ensayo que permite medir la carga de rotura de cubos de mortero normalizado de cemento, a tiempos de endurecimiento o edades deseadas (1,3,7 y 28 días).

CALOR DE HIDRATACION.- Es el calor expresado en cal/g, desarrollado por la reacción química de hidratación de un cemento y que comienza con la fragua inicial. Cementos con calor de hidratación elevados manifiestan fenómenos de variaciones en el volumen final del concreto, sobre todo en obras que requieren vaciados masivos.



CAPITULO

04

AGREGADOS

INSTITUTO DE LA CONSTRUCCION Y GERENCIA

1. INTRODUCCION

Sabemos que el concreto está conformado por una pasta de cemento y agua en la cual se encuentran embebidas partículas de un material conocido como agregado, el cual ocupa aproximadamente del 65% al 80% del volumen de la unidad cúbica de concreto.

No obstante que el agregado constituye el material que en el más alto porcentaje interviene en la unidad cúbica de concreto, el estudio del importante real que él desempeña en el comportamiento de éste fue durante muchos años descuidado.

Este descuido fue principalmente debido a tres razones: que su costo, en general, era bastante menor que el del cemento; que las resistencias en compresión de los concretos eran, en general, bajas; y que se le consideraba como un material inerte de relleno. Hoy se sabe que el agregado tiene influencia determinante sobre las propiedades del concreto tanto en su estado plástico como ya endurecido.

Además de los efectos específicos sobre las diversas propiedades del concreto, las características físicas, químicas y mecánicas de los agregados tienen efecto importante no sólo en el acabado y calidad final del concreto; sino también sobre la trabajabilidad y consistencia al estado plástico, así como sobre la durabilidad, resistencia, propiedades elásticas y térmicas, cambios de volumen y peso unitario del concreto endurecido.

Los estudios efectuados a partir de las investigaciones iniciales de Gilkey permiten hoy conocer que el agregado debe estar constituido por partículas limpias y adecuadamente conformadas; que en su estructura deben entrar materiales resistentes y durables; que debe poseer una granulometría adecuada; que debe tener límites en su capacidad de absorción y de partículas inconvenientes; que debe ser resistente a la abrasión; que debe tener inalterabilidad de volumen; que debe ser capaz de resistir cambios físicos o químicos que podrían originar rajaduras, hinchazón o ablandamiento del concreto, etc.

En relación con su origen y su procedimiento de preparación el agregado puede ser natural o artificial. Las arenas y gravas son productos del intemperismo y la acción del viento y el agua. Las arenas manufacturadas, no empleadas en el Peru, y la piedra partida son productos de la trituración de piedras naturales. En el procesamiento de cualquier agregado puede utilizarse lavado y tamizado.

Los agregados pueden ser obtenidos o producidos a partir de rocas igneas, sedimentarias o matamórficas. La presencia o ausencia de un tipo geológico determinado no es suficiente para definir a un agregado como adecuado o inadecuado.

La aceptación de un agregado para ser empleado en la preparación del concreto para una obra de características determinadas, deberá basarse en la información obtenida a partir de los ensayos de laboratorio, de su registro de servicios bajo condiciones de obra similares, o de ambas fuentes de información.

Los agregados livianos y pesados pueden ser naturales o artificiales. Entre los primeros se incluyen la piedra pomez, las escorias de alto horno, o las arcillas expandidas. Entre los segundos, la limonita, la hematita, el espato pesado, o los agregados a base de mineral de hierro o trozos de acero.

Los agregados reciclados están adquiriendo relativa importancia. En el Perú todavía no se emplean. Existen muchas formas de clasificar a los agregados. Todas ellas son útiles en la medida que pueden servir de ayuda para describir el material. Sin embargo no debe olvidarse que más importante que la clasificación es el entendimiento correcto del rol que tiene el agregado en el comportamiento del concreto lo que es fundamental para definir las propiedades que le son necesarias en un caso dado y analizar sus efectos sobre las propiedades de la mezcla.

El propósito de esta Sección es múltiple y está orientado fundamentalmente a tomar conciencia de la importancia del papel del agregado en el comportamiento del concreto. El ingeniero no puede ni debe aceptar que el concreto es fundamentalmente cemento, agua y relación agua-material cementante, pudiéndose incluir en esta combinación cualquier cosa para completar la unidad cúbica de concreto. Sabemos que el agregado desempeña un papel fundamental en el comportamiento y propiedades del concreto y es obligatorio conocerlo para obtener un producto de las características deseadas.

En el texto se hacen frecuentes referencias a las Normas Técnicas Peruanas (NTP) que han reemplazado en denominación a las Normas ITINTEC, conservando la numeración de éstas últimas. Igualmente se hace referencia a las Normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM). Corresponde al ingeniero Proyectista indicar en las especificaciones de obra cual de las Normas debe ser utilizada por el Laboratorio y/o la Supervisión.

El presente texto no trata de ser novedoso. Sólo es un documento al servicio de quienes tratan de obtener concretos durables y de alta calidad.

2. CONSIDERACIONES INICIALES

2.1 ALCANCE

Estas recomendaciones definen los requisitos de calidad de las canteras y de los agregados fino y grueso a ser utilizados en la preparación del concreto normal. Estas recomendaciones pueden ser empleadas por el ingeniero

proyectista, el contratista, el abastecedor de concreto, u otros, como parte de las especificaciones de obra o del documento de compra en el que se describe el material a ser utilizado.

Estas recomendaciones han sido elaboradas para garantizar materiales satisfactorios para la mayoría de los concretos. Para determinados trabajos o en ciertas regiones, ellas pueden ser más o menos restrictivas que lo necesario. En aquellos casos en los que la estética es importante, se puede requerir límites más estrictos dado que la presencia de impurezas puede deteriorar la superficie del concreto.

Mediante un estudio cuidadoso y selección adecuada de las canteras a ser utilizadas, el proyectista podrá conocer que agregados existen o pueden ser disponibles en el área de trabajo, especialmente en relación a sus propiedades físicas, químicas o mecánicas, o una combinación de estos factores que es requerida para obtener las propiedades deseadas en el concreto.

Estas recomendaciones pueden servir en las del proyecto para definir la calidad del agregado, su tamaño máximo nominal, y otros requisitos específicos. El ingeniero responsable de seleccionar las proporciones de la mezcla determina las de los agregados fino y grueso, así como la adición de tamaños en mezclas de agregados, si ello es requerido o aprobado.

2.2 UNIDADES DE MEDIDA

En relación al tamaño de los tamices y al del agregado determinado mediante el empleo de tamices de ensayo, los valores pulgada-libra se muestran por conveniencia del usuario; sin embargo, la designación de tamices es el valor estándar tal como lo establece la Especificación ASTM E 11.

En algunos casos, por conveniencia del usuario, se presentan los valores de acuerdo a las Normas ISO, al Sistema Métrico Decimal, o a las Normas NTP.

2.3 NORMAS DE REFERENCIA

En cada una de las Secciones de este trabajo se indica la Norma NTP ó ASTM que deben ser empleadas como referencia. En la Sección correspondiente a «Ensayos» se presenta una relación de las mismas.

2.4 ORDENES DE COMPRA Y ESPECIFICACIONES

El comprador de los agregados deberá incluir la información necesaria en la orden de compra en la medida que ello sea conveniente. El ingeniero proyectista deberá incluir en los documentos del proyecto información que describa los agregados a ser empleados.

Se incluirá en la orden de compra la siguiente información en la medida que ello sea aplicable:

2.4.1 Referencia a la Norma correspondiente.

2.4.2 Referencia a si la orden de compra es para agregado fino, agregado grueso, u hormigón.

2.4.3 Cantidad de material, en toneladas o metros cúbicos.

2.4.4 Si la orden es para agregado fino:

- a. Si se aplica la granulometría opcional indicada en el acápite correspondiente
- b. Si se aplican las restricciones sobre materiales reactivos indicadas en el acápite correspondiente.
- c. En el caso del ensayo de estabilidad efectuado con sulfatos, cual sal deberá ser empleada. Si ninguna es indicada cualquier sal podrá ser empleada.
- d. El límite apropiado para el material más fino que la Malla N° 200. Si no indica se deberá aplicar el límite del 3%.
- e. El límite apropiado para carbón y lignito. Si no se indica se deberá aplicar el límite del 1%.

2.4.5 Si la orden es para agregado grueso:

- a. La granulometría seleccionada y la designación de la clase.
- b. Si se aplica las restricciones sobre material reactivo.
- c. En el caso del ensayo de estabilidad empleando sulfatos, que sal deberá ser empleada. Si ninguna es indicada, cualquier sal podrá ser empleada.
- d. Cualquier excepción o adición a estas recomendaciones.

El peso del agregado deberá ser determinado como cargado en la unidad de transporte, incluyendo cualquier humedad presente. No se deberá añadir agua al momento de la carga.

3. COMPORTAMIENTO DE LAS ROCAS COMO AGREGADO

3.1 ROCAS

Usada en su sentido más amplio, la palabra roca comprende todos los constituyentes sólidos de la corteza terrestre, ya sea compactos (como el granito), ya granulares (como la arena y grava), ya terreos (como la arcilla). La Petrología estudia las rocas como materiales.

Todas las rocas están compuestas de minerales de distintas clases con composición y estructura química propias, que tienden a formas cristales cuya forma está determinada por esa estructura.

Las rocas se agrupan en:

- Rocas Igneas.
- Rocas Sedimentarias.
- Rocas Metamórficas.

3.2 ROCAS IGNEAS

Las rocas igneas se han formado por el enfriamiento, lento o rápido, de partes de la masa del material fundido que se conoce con el nombre de magma, el cual se ha enfriado al interior de la corteza, ha surgido a través de ella, o se ha inyectado en la misma.

Las rocas igneas son de tres clases principales:

- Extrusivas, aquellas que han salido a la superficie y se han enfriado lenta o violentamente en ella.
- Intrusivas, aquellas grandes masas de roca que no se han enfriado y consolidado en contacto con la superficie.
- Filónicas o abisales, aquellas que se han enfriado muy cerca de la superficie.

Las tres clases de rocas se hallaron fundidas un tiempo. Su estado presente es el resultado del modo como se solidificaron.

Las rocas extrusivas son el resultado de erupciones volcánicas, con una masa fluida que fue lanzada a la atmósfera junto con emanaciones gaseosas, para enfriarse en ella rápidamente y caer en forma de polvo volcánico; o deslizarse por las laderas del volcán en forma de corriente fundida que se desliza por la superficie del suelo hasta que se solidifica. Estas rocas se distinguen por su textura vitrea de grano grande y por el «recocido» de aquellas otras rocas sobre las cuales han corrido.

Las rocas intrusivas, que se enfriaron y solidificaron a grandes profundidades y presiones, encierran gases y son completamente cristalinas (holocristalinas), dado que las condiciones de enfriamiento favorecen la formación de cristales de muy pequeño tamaño. Estas rocas se presentan en formaciones de gran extensión y aunque siempre se forman a gran profundidad afloran en grandes masas a causa de los movimientos de la corteza y de los procesos de erosión.

Las rocas filónicas o hipoabisales ocupan un lugar intermedio entre las extrusivas y las intrusivas profundas y por eso, en general, tienen textura parcialmente cristalina. Estas rocas se presentan en forma de diques o mantos. Los primeros son anchos muros en la corteza que suelen cortar a los planos de estratificación. Los segundos son anchas hojas horizontales introducidas en otras formaciones. Común a todas estas formas es el recocido de la roca contigua por ambos lados en la intrusión.

El análisis químico de las rocas ígneas demuestra que se componen esencialmente de silicio, aluminio, hierro, calcio, magnesio, sodio, potasio, hidrógeno y oxígeno. Estos elementos suelen presentarse combinados en forma de silicatos, óxidos o hidróxidos.

La composición química y mineral se ha adoptado como base para la clasificación general de las rocas ígneas. El bióxido de silicio (sílice), generalmente en forma de cuarzo, es uno de los principales constituyentes minerales de las rocas ígneas, por lo que se ha establecido una clasificación de acuerdo a la proporción de sílice.

Entre las principales rocas ígneas intrusivas se encuentran el granito, la sienita, la diorita y el gabro. Entre las principales rocas ígneas extrusivas volcánicas se encuentran la riolita, la traquita, la andesita y el basalto. Entre las principales rocas ígneas hipoabisales se encuentran el pórfido cuarcífero, el pórfido de ortoclasa, la porfirita y la dolerita.

La casi totalidad de las rocas ígneas son excelente material para ser utilizado como agregado, siendo normalmente duras, tenaces y densas. La excepción la constituyen los tufos y ciertas lavas que son extremadamente porosas por la inclusión de burbujas de gas, lo que las hace poco resistentes, livianas y de alto coeficiente de absorción.

De acuerdo a su resistencia en compresión se puede clasificar, de más a menos, a las rocas ígneas como sigue:

- Rocas Trapeanas, incluyendo las rocas plutónicas básicas, es decir de bajo contenido de sílice o cuarzo, y las volcánicas básicas tales como la andesita, el basalto y la diabasa.
- La felsita, riolita y el cuarzo pórfido.
- Las plutónicas básicas de tipo gábrico.
- Granitos, sienitas y otras ígneas de coloración clara.

Considerando su resistencia a la abrasión, el orden de clasificación de las rocas ígneas comenzando por la más resistente es:

- Diabasa y basalto.
- Diorita.
- Andesita y Riolita.
- Gabro.

Debe recordarse que las rocas de color más oscuro y de mayor peso son más duras y resistentes que las más livianas y de color claro. Igualmente, las rocas plutónicas básicas (trapeana, andesita, basalto, diabasa, etc) tienen mayor valor cementante que las rocas ígneas ácidas (granito, etc.).

3.3 ROCAS SEDIMENTARIAS

Las rocas sedimentarias o deutógenas han sido depositadas en cualquier edad geológica ya mecánicamente por acción del viento, el agua o el hielo; ya químicamente; ya orgánicamente.

Las rocas sedimentarias son, en general, el resultado de la meteorización de las rocas preexistentes. La extensión que ellas ocupan en toda la superficie terrestre contribuye a demostrar que se deben a los cambios y movimientos del suelo que han ocurrido en épocas geológicas pasadas.

Las rocas sedimentarias suelen encontrarse en capas o estratos que, en algunos casos, fueron horizontales en un tiempo aunque ahora formen ángulos hasta de 90° con la horizontal. Esta estratificación es el resultado directo del procedimiento de formación, pues inicialmente el material se depositó horizontalmente.

Las rocas sedimentarias pueden clasificarse en tres grandes grupos generales:

- De formación mecánica.
- De formación química.
- De formación orgánica.

El proceso mecánico de formación de las rocas consiste en la acción del viento, heladas, nieve, cambios diarios de temperatura, todo lo que puede clasificarse como influencia meteorológica, que conduce a la formación de suelo vegetal, brechas, o depósitos de elementos menudos debidos a la acción pluvial o el polvo movido por el viento.

Un segundo tipo de acción mecánica externa es la del agua, la cual forma los verdaderos sedimentos tal como los conglomerados, areniscas y algunos tipos de arcillas.

Por último, la acción de los hielos ha sido y es factor importante en la formación de las rocas sedimentarias pues ha producido extensos depósitos glaciáricos que han ocupado y aún ocupan dilatadas extensiones del globo.

La caliza es la mejor conocida de las rocas de formación orgánica siendo, en general, acumulación de restos orgánicos marinos, pudiendo presentarse en diferentes formas. Cuando son duras y densas son adecuadas como agregado.

Igualmente, las areniscas duras y densas pueden ser empleadas como agregado, pero, en general, las areniscas son desmenuzables o excesivamente porosas debido a cementación imperfecta del material granular constituyente. Las areniscas son adecuadas si el material aglomerante es calcareo o silíceo, no

así si es arcilloso dado que éste convierte a la arenisca en roca desmenuzable, blanda y absorbente.

Cuando se incrementa su porcentaje de arcilla las calizas y areniscas devienen en esquistos arenosos o calizos. Estos, en general, son materiales pobres para ser empleados como agregado dado que son blandos, livianos, débiles y absorbentes.

El conglomerado puede no ser adecuado como agregado debido a su tendencia a romperse progresivamente en tamaños menores durante el laboreo y procesamiento.

Las pizarras son generalmente material pobre para ser empleado como agregado dado que son blandas, livianas, débiles y absorbentes. Aún más, debido a que originariamente fueron de estratificación delgada, las pizarras pueden asumir perfiles chatos y laminados cuando se les reduce a arena y grava.

Por su resistencia mecánica, las rocas sedimentarias más empleadas son la caliza, dolomita, arenisca, conglomerado y brecha. No son recomendables el horsteno y la pizarra.

3.4 ROCAS METAMORFICAS

Las rocas metamórficas proceden de cambios ocurridos en otra original, ya sea ígnea o sedimentaria. Los principales agentes del cambio son intensas compresiones y tensiones, debidas a los grandes movimientos corticales y al excesivo calor. Este puede proceder o de la proximidad de rocas intrusivas, o de la penetración de vapores y líquidos calientes. Otra causa puede la producción de intercambios químicos dentro del estado sólido.

Los resultados de estas acciones son diversos y las rocas metamórficas así producidas varían desde las que presentan completa y distinta foliación, conservando estructura cristalina, hasta un estado semicristalino causado directamente por la compresión y también la cementación de partículas sedimentarias por medio de sílice.

La característica del principal grupo de las rocas metamórficas es la citada foliación. Ello significa que los minerales que componen la roca se disponen en hojas lenticulares, cada una compuesta por uno o varios minerales, de modo que los distintos lechos no siempre están separados unos de otros.

Estas características son diferentes de la estructura fluidal de la lava y también del depósito en lechos de las rocas sedimentarias no alteradas. El nombre que se aplica a estas rocas hojosas es el de esquisto y los diversos tipos de rocas esquistosas están entre las rocas metamórficas mejor conocidas.

Entre las rocas metamórficas de origen sedimentario es notable ejemplo el marmol (caliza matamórfica) cuyo aspecto muestra con frecuencia los restos orgánicos que lo formaban originalmente. El conglomerado esquistoso es otro tipo sedimentario bien definido. La cuarzita puede considerarse como formada a expensas de granos de arena, y la gran variedad de pizarras son, indudablemente, originadas por arcillas o fango.

Las rocas clasificadas como esquistos son de variadas composiciones; la micacita es agregado cristalino de mica y cuarzo con una adición accidental de otros agregados no esenciales. El gneiss es un término que se aplica generalmente al grupo de rocas análogas a los esquistos, pero con elementos gruesos y con fajas alternas de diversa composición mineralógica.

Las rocas metamórficas varían ampliamente en características. Los marmoles y las cuarzitas son generalmente macizos, densos y adecuadamente tenaces y resistentes. Los gneiss son generalmente muy durables y tenaces, pero pueden tener las características indeseables de los esquistos.

Los esquistos son generalmente de laminación delgada y tienden a asumir perfiles de esas características; generalmente contienen grandes cantidades de minerales micaceos blandos y, a menudo, carecen de la resistencia que es deseable en agregados para concreto.

4. CANTERAS

Corresponde al Contratista la selección preliminar de la cantera que ha de proveer a la obra de agregado; la prospección que permita la ubicación de canteras de agregado; y la exploración, explotación, muestreo y certificación de la calidad de los depósitos.

Corresponde a la Supervisión la aprobación final de la cantera seleccionada y del agregado proveniente de ella, previa certificación del Laboratorio que el agregado cumple con los requisitos requeridos por las Especificaciones del Proyecto.

El profesional encargado de la selección de la cantera deberá tener experiencia en este tipo de trabajo; conocimiento de la calidad y cantidad de agregado requerido; y principales características del proyecto en el cual él va a ser empleado. Deberá contar con la aprobación de la Supervisión.

En aquellos casos en que la cantera debe ser ubicada y explotada por el Contratista, además de la prospección, exploración y muestreo de los posibles depósitos disponibles, los estudios deben incluir el origen geológico; la clasificación petrográfica y composición mineral; la clasificación y propiedades del material como agregado; los informes de Laboratorio correspondientes; el

costo de operación y rendimiento en relación a la magnitud del proyecto, la facilidad de acceso, y la cercanía a la obra.

La aprobación por la Supervisión de la cantera seleccionada requiere de la presentación por el Contratista de los certificados de calidad del agregado expedidos por un laboratorio autorizado por ella. La aprobación de uso del material de la cantera por la Supervisión no exime al Contratista de la obligación de emplear en obra material de calidad igual o superior a la autorizada.

5. PROPIEDADES DEL AGREGADO

5.1 DUREZA

Se define como dureza de un agregado a su resistencia a la erosión, abrasión o, en general, el desgaste. La dureza de las partículas depende de sus constituyentes.

Entre las mejores rocas a emplear en concretos que deben ser resistentes a procesos de abrasión o erosión, figuran el cuarzo, la cuarzita, las rocas densas de origen volcánico y las rocas silíceas.

La determinación de la dureza de un agregado se hace sometándolo a un proceso de desgaste por abrasión. El ensayo más empleado es el conocido como el Método de Los Angeles, realizado de acuerdo con lo especificado en la Norma ASTM C 131. Este método combina procesos de desgaste por abrasión y frotamiento.

5.2 DENSIDAD

La densidad de los agregados depende tanto de la gravedad específica de sus constituyentes sólidos como de la porosidad del material mismo. La densidad de los agregados es de especial importancia en todos aquellos casos en que, por resistencia o durabilidad, se requieren concretos con un peso por encima o debajo de aquel que corresponde a concretos usuales.

Las bajas densidades generalmente indican material poroso, poco resistente y de alta absorción. Tales características, cuando ello fuere necesario, deberán ser confirmadas por ensayos de laboratorio.

5.3 POROSIDAD

5.3.1 DEFINICION

La palabra «poro» define al espacio no ocupado por materia sólida en la partícula de agregado. Se considera a la porosidad como a una de las más importantes

propiedades físicas del agregado, dada su influencia sobre las otras propiedades de éste y el papel que desempeña durante los procesos de congelación.

5.3.2 IMPORTANCIA

La porosidad del agregado tiene influencia sobre la estabilidad química, resistencia a la abrasión, resistencias mecánicas, propiedades elásticas, gravedad específica, absorción y permeabilidad de las partículas, siendo todas estas propiedades menores conforme aumenta la porosidad del agregado.

Igualmente, las características de los poros determinan la capacidad y velocidad de absorción, la facilidad de drenaje, el área superficial interna de las partículas, y la porción de su volumen de masa ocupado por materia sólida.

5.3.3 INFLUENCIA SOBRE LAS PROPIEDADES

La velocidad de la reacción química de los agregados en el concreto, así como su estabilidad química, están influenciadas por las características de su porosidad. Los agregados que tienen alto porcentaje de poros, especialmente si éstos son pequeños, tienen una mayor superficie específica susceptible de ataques químicos que aquella que pueden presentar agregados en los que hay un menor superficie de poros o éstos son de gran tamaño.

Las características térmicas del agregado están influenciadas por la porosidad. Cambios importantes en el coeficiente de expansión, la difusividad y la conductividad del agregado pueden ocurrir por modificaciones del contenido de humedad del mismo. En la actualidad se considera que las características de los poros probablemente influyen en las propiedades térmicas del agregado seco.

La adherencia de la pasta a las partículas de agregado está determinada por algunas propiedades de la superficie del mismo incluídas la rugosidad y características de los poros de la zona superficial, las cuales pueden afectar la textura superficial y bondad de la adherencia de la pasta.

La influencia de la porosidad del agregado sobre la resistencia de éste a los procesos de congelación es muy importante. Para que ocurra daño en las partículas deberán estar presentes condiciones críticas de contenido de humedad y falta de drenaje adecuado. El tamaño y continuidad de los poros controla la velocidad y magnitud de la absorción, así como la velocidad con la cual el agua puede escapar de las partículas de agregado.

En la actualidad se acepta que la durabilidad de un agregado durante el proceso de congelación depende, en primer lugar, de su habilidad para permanecer altamente saturado, sin experimentar daño, bajo condiciones de exposición

dadas. Se estima que un diámetro de poros menor de 4 μ permite una penetración fácil del agua en los poros, pero no su fácil drenaje.

Se ha demostrado que las porosidades menores de 4 μ permiten drenar solamente con presiones lo suficientemente altas para causar fallas en tensión en algunos tipos de rocas y concretos, no siendo necesario que la partícula de agregado en sí misma sea destruída para que el concreto en el cual está siendo empleada sufra daños por congelación y deshielo.

De acuerdo a lo anterior, las más importantes propiedades del agregado que controlan la durabilidad en congelación y deshielo son la distribución de los poros por tamaños y la permeabilidad. Desde que esta última está controlada por el tamaño y continuidad de los poros, puede considerarse ambas características de igual importancia, siendo prioritarias en relación con la porosidad total del agregado.

5.3.4 DETERMINACION DE LA POROSIDAD

Los actuales métodos de laboratorio sólo permiten medir la porosidad total del agregado más no el tamaño, perfil y continuidad de los poros. Ello no permite establecer en forma adecuada una correlación entre la durabilidad del concreto y la porosidad del agregado.

5.4 RESISTENCIA

5.4.1 ASPECTOS GENERALES

Por su propia naturaleza, la resistencia del concreto no puede ser mayor que la de sus agregados. Sin embargo, la resistencia a la compresión de los concretos convencionales dista mucho de la que corresponde a la mayoría de las rocas empleadas como agregado, las mismas que se encuentran por encima de los 1,000 kg/cm²

La textura, estructura y composición de las partículas de agregado influyen sobre la resistencia de éste, la cual disminuye si sus granos constituyentes no están bien cementados unos a otros o si están compuestos de partículas inherentemente débiles.

La resistencia a la trituración o compresión del agregado deberá ser tal que permita desarrollar totalmente la resistencia potencial de la matriz cementante. Ello no es problema dado que, en la actualidad, la resistencia del agregado suele ser más alta que la del concreto preparado con él, estando la resistencia del primero dentro de valores del orden de 700 á 3500 kg/cm².

La resistencia a la trituración de las principales rocas empleadas en construcción

civil es:

Felsita	3300 kg/cm ²
Roca Trapeana	2850 kg/cm ²
Cuarzita	2250 kg/cm ²
Granito	1850 kg/cm ²
Diabasas	1800 kg/cm ²
Esquisto	1700 kg/cm ²
Caliza	1600 kg/cm ²
Gneiss	1500 kg/cm ²
Gabro	1500 kg/cm ²
- Arenisca	1300 kg/cm ²

5.4.2 DETERMINACION

Es difícil determinar la resistencia del agregado en sí mismo. La información se obtiene a partir de la resistencia a la trituración de las muestras, debidamente preparadas, de la roca originaria o de ensayos de comportamiento del agregado en el concreto.

Un modo indirecto consiste en preparar mezclas de concreto con el agregado cuya resistencia se desea determinar, las cuales tienen las mismas proporciones que otras en las cuales se ha empleado agregado de resistencia conocida y determinar su resistencia. Si se obtiene una resistencia menor y si muchas partículas de agregado aparecen fracturadas, puede deducirse que la resistencia del agregado es menor que la resistencia compresiva nominal de la mezcla en la que el agregado es empleado.

5.5 MODULO DE ELASTICIDAD

El módulo de elasticidad es definido como el cambio de esfuerzos con respecto a la deformación elástica, considerándosele como una medida de la resistencia del material a las deformaciones.

El módulo de elasticidad de los agregados se determina en muy contadas ocasiones. Sin embargo, desde que la deformación que experimenta el concreto es, parcialmente, una deformación del agregado, es razonable pensar que mayor será el módulo de elasticidad del concreto conforme aumenta el de los agregados que lo integran.

Es importante recordar que el valor del módulo de elasticidad del agregado tiene especial influencia sobre la magnitud del escurrimiento plástico y la contracción que pueden presentarse en el concreto.

Algunos de los valores del módulo de elasticidad del agregado normalmente empleados en concreto son los siguientes:

Roca Trapeana	930,000 kg/cm ²
Gabro	860,000 kg/cm ²
Diabasas	860,000 kg/cm ²
Granito	610,000 kg/cm ²
Arenisca	310,000 kg/cm ²
Caliza	280,000 kg/cm ²

5.6 PROPIEDADES TERMICAS

El coeficiente de expansión térmica, el calor específico y la conductividad térmica, son tres propiedades del agregado que, en determinados casos pueden ser importantes para establecer la calidad del mismo en relación con el comportamiento del concreto.

El calor específico y la conductividad térmica son importantes en construcciones masivas en las que es necesario un cuidadoso control de la elevación de temperatura. Igualmente lo son cuando se requiere concretos con propiedades de aislamiento térmico.

La importancia del coeficiente de expansión térmica del agregado radica en que determina el del concreto como un todo, elevándose el del segundo conforme aumenta el del primero, teniendo siempre en consideración la cantidad total de agregado y las proporciones de la mezcla. Una de las causas del deterioro de las estructuras de concreto puede deberse a las diferencias entre los coeficientes del agregado y la matriz cementante.

Debe de recordarse la importancia de una excesiva diferencia entre los coeficientes de expansión térmica del agregado y la pasta, por la posibilidad de movimientos diferenciales y pérdida de adherencia entre el agregado y la pasta que lo rodea. Si la temperatura del concreto se mantiene en el rango de 4C a 60C la diferencia puede no ser necesariamente peligrosa.

El empleo de agregados de bajo coeficiente de expansión térmica puede conducir a la destrucción del concreto debido a que conforme la temperatura de éste se reduce la pasta tiende a contraer más que el agregado con el resultado que se desarrollan esfuerzos de tensión en la pasta, los cuales pueden ser acompañados por agrietamiento.

El cuarzo cambia de estado a los 573C y expande bruscamente en un 0.85% originando una presión que puede destruir el concreto. No es recomendable emplear agregado cuarzoso en concretos que puedan estar sometidos a altas temperaturas.

Al igual que los agregados calcareos, los agregados silicosos son considerados adecuados para concretos que deben ser resistentes a las altas temperaturas.

En general, si se espera que un concreto esté sometido a altas temperaturas es importante conocer en forma completa las propiedades del agregado a ser utilizado.

5.7 INTEGRIDAD FÍSICA

Algunas rocas pueden estar internamente fracturadas aún cuando externamente presenten apariencia de solidez. Estas grietas pueden ser microscópicamente pequeñas pero tienden a incrementar la absorción y porosidad, disminuyendo la resistencia y durabilidad del agregado.

Las fracturas internas son generalmente producidas o modificadas por el proceso de trituración del material. Las fracturas originales pueden generalmente ser visualizadas por la presencia de materiales secundarios tales como el óxido de hierro, común en las pizarras y esquistos, o la presencia de núcleos de arcilla, comunes en las calizas impuras.

Las fracturas son comunes en aquellos tipos de rocas que son, por naturaleza, quebradizas, tales como el horsteno y las pizarras, pero ellas pueden existir en cualquier roca como resultado de la acción del intemperismo o de movimientos de tierras, tales como plegamientos o fallas, los cuales afectan la zona sobre la que la roca estuvo originalmente.

Debe recordarse que, aunque las fracturas presentes en la roca pueden ser selladas por un proceso de metamorfismo bajo condiciones de alta presión y temperatura, los materiales secundarios depositados no previenen la entrada del agua.

5.8 ESTABILIDAD DE VOLUMEN

5.8.1 CONCEPTO

La estabilidad de volumen se define como la capacidad del agregado para resistir cambios en su volumen como resultado de modificaciones en sus propiedades físicas. No debe ser confundida con la expansión causada por reacciones químicas entre el agregado y los álcalis presentes en el cemento.

Las condiciones que pueden dar cambios excesivos de volumen incluyen los procesos de congelación y deshielo, de calentamiento y enfriamiento, y de humedecimiento y secado.

Los cambios de volumen pueden dar por resultado deterioro del concreto, el cual puede presentarse en forma de descascaramientos localizados de pequeño significado estructural pero dañinos para la apariencia, hasta agrietamiento externo y desintegración que pueden ser lo suficientemente grandes como para causar falla estructural del concreto.

5.8.2 CLASIFICACION

Las partículas de agregado carentes de estabilidad de volumen están comprendidas en dos categorías:

- a. Aquellas en las que la desintegración del concreto resulta de fallas de las partículas de agregado para mantener su integridad, lo que da lugar a que las partículas se rompan en numerosas piezas menores. El deterioro se evidencia principalmente por el descascaramiento superficial. Es el caso de las areniscas blandas.
- b. Aquellas que se expanden en forma destructiva en el concreto. Estas, cuando congelan en condición saturada, incrementan en volumen con suficiente presión como para causar desintegración de concreto. Es el caso de las calizas que contienen arcillas expansivas.

5.8.3 CONSECUENCIAS

Los agregados físicamente débiles, extremadamente absorbentes, fácilmente hendibles, o que se hinchan cuando se saturan, pueden fallar en procesos naturales de intemperismo. Su empleo reduce la resistencia del concreto, facilita el deterioro prematuro del mismo, debilita la adherencia agregados-pasta, o induce al agrietamiento, descascaramiento o ampollamiento de la superficie del concreto.

5.8.4 AGREGADOS NO RECOMENDABLES

La falta de estabilidad de volumen principalmente se presenta en los horstenos con estructura porosa finamente texturada; algunos esquistos; calizas con arcilla laminada o expansiva; partículas con arcilla mineral; areniscas desmenuzables; rocas micaceas; rocas de cristalización muy gruesa.

Las doleritas con 30% de nontronita se expanden y contraen linealmente en un 0.06%, y las calizas arcillosas en 0.01%, ambas en ciclos de humedecimiento y secado. Algunas areniscas se expanden linealmente más del 0.08% bajo las mismas condiciones.

Para rocas estratificadas los cambios pueden ser distintos en condiciones diferentes. Así, una caliza arcillosa se expande linealmente 0.028% a través de la estratificación y 0.016% paralela a ella durante la inmersión en agua.

5.8.5 REQUISITOS DEL AGREGADO

Las más importantes propiedades del agregado que intervienen en el control de la estabilidad de volumen son el tamaño, abundancia y continuidad de poros. Estas propiedades influyen en la durabilidad ante procesos de congelación y

deshielo; así como en la resistencia, elasticidad, resistencia a la abrasión, gravedad específica, adherencia con la pasta, y velocidad de alteración química.

Las investigaciones indican que los poros menores de 4μ ó 5μ son críticos dado que son lo suficientemente grandes para permitir que el agua entre, pero no lo suficientemente grandes como para permitir un fácil drenaje bajo la presión del hielo.

Se estima que si el espacio está totalmente confinado y la temperatura por debajo de 0°C , la presión puede llegar a ser tan alta como 2000 kg/cm^2 . Por lo tanto, a fin de evitar la rotura de las partículas de agregado y la destrucción de la pasta que las rodea, el flujo de agua hacia los poros vacíos en el agregado o en la pasta debe ser reducido por la disminución de los poros capilares o la incorporación de aire a la mezcla.

5.8.6 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

La Norma ASTM C 88 establece un ensayo de estabilidad de volumen en el cual una muestra del agregado graduado es sometida, en forma alternativa, a inmersión en una solución de sulfato de sodio o magnesio y luego secada al horno. Este ensayo sólo es cualitativo en predecir el comportamiento del agregado bajo las condiciones de obra y es relativo en su capacidad de aceptar o rechazar un agregado desconocido.

Otro procedimiento de ensayo consiste en someter el agregado a ciclos alternos de congelación y deshielo. Tampoco este ensayo da una indicación segura del comportamiento del agregado bajo las condiciones de humedad reales y los cambios de temperatura que se experimentan en obra.

Posiblemente la medida más real de la estabilidad de volumen del total del agregado se derive de ensayos de congelación y deshielo del concreto en el cual el agregado ha sido incorporado. Este método es de valor principalmente como medida de comparación de las características de comportamiento de los diferentes agregados y en el estudio de nuevos métodos para mejorar la resistencia al intemperismo.

5.9 TEXTURA SUPERFICIAL

5.9.1 CONCEPTO

La textura superficial de un agregado es aquella propiedad del mismo que refleja la textura interna original y la estructura y composición de sus partículas, siendo ella el resultado de los procesos naturales o artificiales de impacto o abrasión a los cuales el agregado está sujeto.

La textura superficial del agregado depende de la dureza, tamaño del grano y características porosas del material original, así como de la magnitud con que las fuerzas que han actuado sobre la superficie de las partículas de agregado las han suavizado o dejado rugosas.

La importancia de esta propiedad radica en que la rugosidad de la superficie del agregado, al crear una textura superficial, define en grado importante la capacidad de adherencia de éste con la pasta.

5.9.2 CLASIFICACION

La clasificación de los agregados por su textura superficial se hace usualmente en función de si su textura es suave o rugosa. La Norma ASTM no contempla una clasificación en función de la textura superficial. La Norma Británica B.S.812 clasifica a los agregados en seis grupos de acuerdo a su textura superficial:

- a. Textura Vitrea, que se caracteriza por fractura conchoidal. Ejemplo la escoria vitrea.
- b. Textura suavizada, producto del desgaste por agua, o suavizamiento debido a fracturas de rocas laminadas o de grano fino. Ejemplos, la grava, el horsteno, el marmol.
- c. Textura granular que se fractura mostrando granos más o menos redondeados. Ejemplo la arenisca y las Oolitas.
- d. Textura rugosa, que corresponde a la fractura rugosa de rocas de grano fino o medio que no contienen constituyentes cristalinos fácilmente visibles. Ejemplos el Basalto, la Felsita, la Calcita.
- e. Textura cristalina que corresponde a aquella que contiene constituyentes cristalinos fácilmente visibles. Ejemplos el granito y el gabro.
- f. Textura alveolar que corresponde a poros y cavidades visibles, Ejemplos, la Piedra Pómez, el Ladrillo, la escoria expandida.

5.9.3 RESISTENCIA POR ADHERENCIA

La capacidad de adherencia con la pasta es una de las más importantes propiedades del agregado, siendo por ello su textura superficial, al incidir sobre la resistencia por adherencia, una de las que más puede tener influencia sobre la resistencia del concreto. La resistencia en compresión es menos afectada que la resistencia en flexión, siendo el efecto más significativo en concretos de alta resistencia.

La adherencia entre la pasta y el agregado es función tanto de fenómenos físico químicos como de los procesos físicos y mecánicos inherentes a la posibilidad de penetración de la pasta en los poros del agregado. Todos estos procesos establecen un grado de unión entre los agregados y el elemento ligante el cual es función de la rugosidad superficial del agregado.

5.9.4 LIMITACIONES

Las partículas de agregado cuya textura superficial está dada por superficies altamente intemperizadas o descompuestas, son indeseables dado que ellas pueden desprenderse fácilmente del núcleo sano reduciendo la capacidad de adherencia. Se estima que porcentajes del orden del 5% de material intemperizado reducen la adherencia pasta-agregado y la resistencia del concreto.

La textura rugosa de agregados que provienen de roca triturada da resistencias por adherencia mayores que aquellas que se obtendría empleando agregados de textura suave tales como las gravas. Esta ventaja puede perderse si el agregado está recubierto por el fino revestimiento de polvo proveniente de la trituración.

Las partículas de textura suave no producen una buena adherencia con la pasta, tendiendo ello a reducir la resistencia. Este efecto puede ser compensado en parte por una reducción en la relación agua-material cementante que se obtiene gracias al incremento en la trabajabilidad y reducción en la demanda de agua que da este tipo de textura.

5.10 PERFIL

5.10.1 CONCEPTO

El perfil de las partículas del agregado depende principalmente de la presencia y espaciamiento de los planos de separación y clivaje. Muchos elementos poseen planos de fácil fractura, de tal forma que se producen partículas angulares por fragmentación de cristales.

Otras rocas definen su perfil por los planos de separación o uniones formados como resultado de presiones de formación.

Así, los esquistos y pizarras producen formas laminadas, en tanto que los guijarros de granito y cuarzita son elementos más o menos equidimensionales. El cuarzo, que no posee un clivaje definido, da granos que pueden considerarse equidimensionales, en tanto que los dos excelentes clivajes del feldespato dan lugar a la formación de elementos laminados y rectilíneos.

5.10.2 CLASIFICACION

Las Normas ASTM no clasifican el agregado por su perfil. Las Normas Británicas clasifican, de acuerdo a su perfil, al agregado en función de su redondez, esfericidad y elongación. En los Estados Unidos el agregado se clasifica en redondeado, subredondeado o subabigular, y angular.

La redondez mide la angularidad relativa de las aristas de las partículas. Los agregados más angulares deberán requerir una mayor cantidad de agua y contenido de agregado fino para proporcionar la trabajabilidad necesaria. La redondez está controlada por la resistencia a la abrasión y trituración de la roca original, así como por la magnitud del proceso de desgaste al cual la partícula ha sido sometida.

La esfericidad es una medida de cuan compacta es la partícula en perfil y es definida como una función de la relación del área superficial de la partícula a su volumen. Cuando mayor es la esfericidad más baja deberá ser su área superficial y por tanto menor la cantidad de agua de mezclado necesaria e igualmente menor la cantidad de agregado fino necesaria en la mezcla para proporcionar trabajabilidad.

Las partículas elongadas y laminadas pertenecen al tipo con una alta relación de área superficial a volumen y son importantes en la medida que contribuyen a disminuir la trabajabilidad de la mezcla.

Igualmente pueden afectar la durabilidad del concreto dado que tienden a orientarse en un plano, dejando debajo de ellas vacíos y lentes de agua.

Se considera que son indeseables partículas de perfil elongado o laminado en exceso del 10% al 15% del peso total del agregado grueso.

5.10.3 IMPORTANCIA

El grado de acomodo en el concreto de las partículas de agregado de un tamaño determinado depende de su perfil, existiendo relación entre éste y el contenido de vacíos, disminuyendo éste último conforme se incrementa la proporción de partículas redondeadas.

Desde el punto de vista de economía en los requisitos de cemento, para una relación agua-cemento dada, el agregado redondeado, por su menor superficie específica, podría ser preferible al agregado angular. Sin embargo, por otra parte, el cemento adicional requerido por los agregados de perfil angular es, en parte, compensado por las mayores resistencias y, algunas veces, por la mayor durabilidad que resultan de una mayor resistencia por adherencia entre el agregado de perfil angular y la pasta, así como de una mayor ligazón en la textura del concreto endurecido.

Las partículas elongadas y laminadas son especialmente objetables debido a sus efectos adversos sobre la trabajabilidad, requisitos de cemento, durabilidad y resistencia. Este tipo de partículas se acomodan muy mal en la mezcla, reduciendo el peso del concreto y disminuyendo la resistencia a la compresión. Además tienden a orientarse horizontalmente en el concreto, permitiendo la

acumulación de agua entre ellas y reduciendo de esta manera el desarrollo de una buena adherencia sobre la superficie inferior.

5.11 LIMPIEZA

5.11.1 CONCEPTO

Los elementos contaminantes de los agregados actúan sobre el concreto reduciendo su resistencia, modificando la durabilidad y dañando la apariencia externa. Adicionalmente pueden alterar el proceso de mezclado al incrementar la demanda de agua o retrasar el proceso de mezclado.

La mayoría de los agregados presentan algún grado de contaminación, pero la norma determina el porcentaje máximo admisible. Los excesos pueden eliminarse fácilmente mediante el proceso de lavado, como sucede con los materiales finos ligeros.

Se considera que en el agregado pueden presentarse cuatro clases de sustancias inconvenientes que pueden afectar o modificar las propiedades del concreto:

- Impurezas Orgánicas
- Revestimientos
- Sales
- Elementos Reactivos

El comportamiento de cada una de ellas es el siguiente:

5.11.2 IMPUREZAS ORGANICAS

Los agregados pueden ser resistentes a las sollicitaciones mecánicas y la acción de desgaste y, aún así, no ser satisfactorios para preparar concreto si ellos contienen impurezas orgánicas las cuales pueden interferir en el proceso de hidratación.

La materia orgánica presente en el agregado puede consistir de productos de destrucción o descomposición de materia vegetal, y aparecer en forma de, margas orgánicas, barro orgánico o humus. Se presenta con más frecuencia en el agregado fino que en el grueso el cual puede ser fácilmente lavado. Estas impurezas pueden afectar las reacciones de hidratación, modificando el fraguado o reduciendo la resistencia.

El control inicial del agregado se realiza de manera cualitativa, mediante una prueba colorimétrica, aplicable especialmente al agregado fino. El valor de este ensayo reside en indicar la presencia potencial de compuestos orgánicos nocivos, permitiendo la realización de ensayos adicionales de mayor precisión.

No toda materia orgánica es dañina, por lo que debe comprobarse su efecto potencial por ensayos de resistencia en cubos de mortero. El ensayo usual es el correspondiente a la Norma ASTM C 40 que da un índice de la presencia y magnitud de la materia orgánica.

La presencia de materia orgánica no indica necesariamente que ésta sea dañina para el concreto, dado que el color oscuro de la solución puede deberse a la presencia de minerales de hierro. Por ello es recomendable, cuando el ensayo ASTM C 40 da valores no convenientes, realizar ensayos de resistencia a la compresión en cubos de mortero y comprobaciones de tiempo de fraguado.

El procedimiento de ensayo consiste en comparar una solución de referencia de color-patrón, con la coloración de líquido que sobrenada, después de un período de 24 horas, sobre una muestra de arena, de aproximadamente 500 grs., luego de mezclada con una solución al 3% de hidróxido de sodio en agua. Cuando el color del líquido de la muestra de ensayo es más oscuro que el color de referencia, se puede inferir la presencia de materia orgánica.

En los casos en que el ensayo sea positivo, se establece una prueba adicional, consistente en comparar la resistencia a la compresión de morteros, fabricados con el agregado fino cuestionado y otro reconocido como sano. En el caso que la resistencia obtenida estuviera por debajo del 95% de la alcanzada con la arena patrón, no deberá emplearse el agregado por inadecuado.

En todos los casos, los resultados de los diferentes ensayos deben ser tomados con reserva dado que el efecto de la materia orgánica, si la hay, sólo puede ser temporario, alcanzándose a los 28 días resistencias similares a las del agregado sin ella.

5.11.3 MATERIALES FINOS

El material muy fino, constituido por arcilla y limo, se presenta recubriendo el agregado grueso, o mezclado con la arena. En el primer caso afecta la adherencia del agregado y la pasta; en el segundo, incrementa los requerimientos de agua de la mezcla. En principio, un moderado porcentaje de elementos muy finos puede favorecer la trabajabilidad, pero su incremento afecta la resistencia del concreto.

La arcilla puede estar presente en el agregado en forma de revestimientos superficiales, los cuales pueden interferir con una buena adherencia pasta-agregado. La Norma ASTM C 33 indica para el contenido de lentes de arcilla, un máximo del 15% en peso de la muestra para el agregado fino y del 0.25% para el agregado grueso.

Pueden estar presentes en la superficie del agregado limo y polvo de roca. El

limo es el material comprendido entre 0.002 mm y 0.06 mm. El polvo de roca procede del proceso artificial de trituración. Tanto el limo como el polvo de roca pueden formar revestimientos o presentarse en forma de partículas sueltas no adheridas al agregado. Un exceso de ambos hace que, debido a su alta fineza y gran área superficial, incrementen el volumen de agua necesario en la mezcla.

El procedimiento de ensayo consiste en lavar una muestra de agregado y pasar el agua de lavado a través Tamiz N° 200. La pérdida de masa resultante del lavado se calcula como un porcentaje de la masa de la muestra original y es expresada como la cantidad de material que pasa el Tamiz N° 200.

La Norma ASTM C 33 recomienda, para los porcentajes máximos de material fino que pasa la Malla N° 200 un valor del 3% en el agregado fino que se va a emplear en concretos sujetos a procesos abrasivos y del 5% en los otros concretos. En el caso del agregado grueso un valor máximo del 1%, excepto en el caso de agregados triturados en los que si el fino es polvo de roca se acepta hasta un máximo del 1.5%.

5.11.4 REVESTIMIENTOS

Los revestimientos pueden formarse sobre los agregados debido a la deposición, por parte de las aguas, de sustancias minerales sobre la superficie de las partículas. Generalmente esta deposición es mayor en las partículas de agregado grueso.

Los revestimientos pueden ser de arcilla, limo, o carbonato de calcio. También pueden presentarse óxido de hierro, ópalo, yeso, fosfatos solubles, sulfatos, etc. Todos estos tipos de inclusiones afectan la calidad del concreto.

Los revestimientos pueden variar en espesor de fracciones de milímetros a muchos; el área cubierta puede ser muy pequeña u ocupar casi la totalidad del agregado; variar de densos y duros a porosos y blandos; y pueden estar sueltos o firmemente adheridos a la superficie de las partículas.

Los revestimientos blandos o pobremente adheridos pueden ser removidos de las partículas durante el proceso de tratamiento. Los revestimientos duros y bien adheridos, si son químicamente estables, tienen pequeño o ningún efecto peligroso en las propiedades del agregado.

Si los revestimientos son químicamente reactivos y no pueden ser económicamente removidos, los agregados afectados no deberán ser empleados en el concreto.

El porcentaje de partículas deleznales se expresa como el cociente del peso de la muestra y el peso de las partículas deleznales tamizadas.

5.11.5 SALES

Las sales presentes en la superficie del agregado pueden acelerar la fragua por elevación del porcentaje de cloruro de calcio. Combinadas con la humedad atmosférica pueden dar lugar a eflorescencias las cuales aparecen como deposiciones blancas sobre la superficie del concreto. La presencia de sales en el agregado aumenta el riesgo de corrosión de los elementos metálicos embebidos.

Las arenas de estuario o de playa pueden contener un 5% á 6% de sales. Su presencia puede atentar contra determinadas propiedades del concreto.

5.11.6 PARTICULAS NO ESTABLES

Los esquistos son considerados inestables. Igualmente las inclusiones blandas tales como la madera, lentes de arcilla o carbón en la medida que puedan dar ampollamiento y descascamiento del concreto, en la medida que pueden afectar la durabilidad del concreto Si estos materiales están presentes por encima del 2% al 5% en peso del agregado, pueden afectar la resistencia del concreto.

El carbón es adicionalmente indeseable porque puede hincharse al absorber oxígeno y agua, dando lugar a incrementos de volumen que pueden dañar el concreto. Su presencia en forma de partículas finamente divididas puede alterar el proceso de endurecimiento. La Norma ASTM C 33 fija un contenido máximo de carbón y lignito del 0.5% en aquellos casos en que la apariencia superficial del concreto es importante y del 1% en todos los casos.

La presencia de mica, yeso, o sulfatos no es recomendable porque pueden alterar el proceso de reacción del cemento hidratado.

Dos compuestos de hierro, la pirita y la marcasita, reaccionan con el agua y el oxígeno del aire para formar sulfatos ferrosos que posteriormente se descomponen para formar el hidróxido ferroso mientras el ion sulfato reacciona con el aluminato de calcio del cemento. Estas reacciones pueden dar lugar a ampollamiento y descascamiento, especialmente en presencia de calor y humedad.

5.11.7 PARTICULAS INESTABLES

Algunos elementos que contaminan los agregados no mantienen su integridad o experimentan en contacto con el agua expansiones destructivas. Tal es el caso de las pizarras y otras partículas de baja densidad.

En otros casos, inclusiones blandas, como el carbón, pueden hincharse y causar roturas en el concreto. La presencia de estas partículas se determina por la prueba de decantación en líquido denso.

5.12 PESO UNITARIO

5.12.1 CONCEPTO

Se denomina peso volumétrico o peso unitario del agregado, ya sea suelto o compactado, el peso que alcanza un determinado volumen unitario. Generalmente se expresa en kilos por metro cúbico del material. Este valor es requerido cuando se trata de agregados ligeros o pesados y en el caso de dosificarse el concreto por volumen.

El peso unitario está influenciado por:

- Su gravedad específica;
- Su granulometría;
- Su perfil y textura superficial
- Su condición de humedad;
- Su grado de compactación de masa.

El peso unitario varía con el contenido de humedad. En el agregado grueso incrementos en el contenido de humedad incrementan el peso unitario. En el agregado fino incrementos más allá de la condición de saturado superficialmente seco pueden disminuir el peso unitario debido a que la película superficial de agua origina que las partículas estén juntas facilitando la compactación con incremento en el volumen y disminución del peso unitario.

El fenómeno anterior, conocido como esponjamiento, es de pequeña importancia si el agregado va a ser dosificado en peso. Si se dosifica en volumen, el esponjamiento debe ser tomado en cuenta cuando varía el contenido de humedad.

Las granulometrías sin deficiencias o exceso de un tamaño dado generalmente tienen un peso unitario más alto que aquellas en las que hay preponderancia de un tamaño dado en relación a los otros.

Cuanto más alto el peso específico para una granulometría dada mayor el peso unitario del concreto. La baritina, espato pesado, hematita, biotita, geotita, heulandita, pueden dar pesos unitarios mayores de 4,500 kg/m³.

Los agregados redondeados de textura suavizada tienen, generalmente, un peso unitario más alto que las partículas de perfil angular y textura rugosa, de la misma composición mineralógica y granulometría.

El peso unitario de los agregados en los concretos de peso normal, entre 2200 y 2400 kg/m³, generalmente varía entre 1500 y 1700 kg/m³.

5.12.2 IMPORTANCIA

A partir del conocimiento del peso unitario del agregado se puede:

- Calcular el contenido de vacíos;
- Clasificar a los agregados en livianos, normales y pesados;
- Tener una medida de la uniformidad del agregado.

5.12.3 DEPERMINACION DEL PESO UNITARIO

En la determinación del peso unitario es importante que la granulometría sea aquella con la cual va a ser utilizado para preparar el concreto, dado que modificaciones en ésta dan lugar a cambios en el porcentaje de vacíos, lo que a su vez modifica el peso unitario.

En el Perú la determinación del peso unitario de los agregados, ya sea el peso unitario seco compactado o suelto seco, se efectúa de acuerdo a lo indicado en la Norma ASTM C 29.

Así por ejemplo:

Peso del agregado (ya sea suelto o compactado)
y el recipiente 36.80 kg

Peso del recipiente 13.00 kg

Volumen del recipiente 0.014 m³

Peso Unitario $(36.80 - 13.00) / 0.014$ 1,700 kg/m³

5.13 PESO ESPECIFICO

5.13.1 CONCEPTO

El peso específico de los agregados, que se expresa también como densidad, adquiere importancia en la construcción cuando se requiere que el concreto tenga un peso límite. Además, el peso específico es un indicador de calidad, en cuanto que los valores elevados corresponden a materiales de buen comportamiento, mientras que el peso específico bajo generalmente corresponde a agregados absorbentes y débiles, caso en que es recomendable efectuar pruebas adicionales.

5.13.2 DEFINICIONES

Aplicado a agregados el concepto de peso específico se refiere a la densidad de las partículas individuales y no a la masa del agregado como un todo. Pudiendo definirse al peso específico como la relación, a una temperatura estable, de la masa de un volumen unitario del material, a la masa del mismo volumen de agua destilada, libre de gas.

La Norma ASTM C 128 considera tres formas de expresión de la gravedad específica:

- a. Peso Específico de masa; el cual es definido por la Norma ASTM E 12 como la relación, a una temperatura estable, de la masa en el aire de un volumen unitario de material permeable (incluyendo los poros permeables e impermeables naturales del material) a la masa en el aire de la misma densidad, de un volumen igual de agua destilada libre de gas.
- b. Peso Específico de masa saturado superficialmente seco; el cual es definido como el mismo que el peso específico de masa, excepto que ésta incluye el agua en los poros permeables.
- c. Peso Específico Aparente; el cual es definido como la relación, a una temperatura estable, de la masa en el aire de un volumen unitario de un material, a la masa en el aire de igual densidad de un volumen igual de agua destilada libre de gas. Si el material es un sólido, el volumen es aquel de la porción impermeable.

En las determinaciones del peso sólido y el volumen absoluto, así como en la selección de las proporciones de la mezcla, se utiliza el valor del peso específico de masa.

5.13.3 INFLUENCIAS

El peso específico de un agregado es principalmente función de las características de la roca originaria.

5.13.4 VALORES USUALES

El peso específico de masa de la mayoría de los agregados comunmente empleados está comprendido dentro de los límites de 2.6 a 3.0. Los valores comunmente empleados son:

Basalto	2.80
Pedernal	2.54
Granito	2.69
Hornfelsa	2.82
Caliza	2.66
Pórfido	2.73

Cuarzita	2.62
Arenisca	2.50
Arena y Grava	2.65
Roca Trapeana	2.90

5.13.6 IMPORTANCIA

En relación con la importancia del peso específico del agregado, es conveniente considerar lo siguiente:

- Los pesos específicos bajos generalmente indican un material poroso, absorbente y débil. Los altos generalmente indican buena calidad pero ello, en ambos casos, siempre no es seguro salvo que se confirme por otros medios.
- El valor del peso específico puede ser utilizado como una medida indirecta de la solidez o estabilidad de un agregado, siendo generalmente aceptado que éstos disminuyen conforme es menor el valor del peso específico.
- El peso específico del agregado influye sobre el peso unitario del concreto, pudiendo ello ser de especial importancia en presas de gravedad en las que se requiere máximo peso del concreto, o en centrales nucleares en las que puede requerirse pantallas de alto peso.
- En general, el peso específico del agregado, salvo determinados tipos de agregados livianos o muy densos, está dentro de límites comparativamente estrechos, no siendo el valor crítico para usos normales del concreto.

5.13.6 ENSAYOS

La Norma ASTM C 128 indica el procedimiento para determinar el peso específico del agregado fino. La Norma ASTM C 127 indica el procedimiento para determinar el peso específico del agregado grueso.

En el caso del agregado grueso la muestra de ensayo se forma con aproximadamente 5000 gr. del agregado por el método de cuarteo. Se lavan los componentes de la muestra, eliminando el polvo o material adherido y se sumerge en agua durante 24 horas.

Luego se saca la muestra del recipiente de inmersión y se envuelve en una toalla, eliminando las partículas visibles de agua de la superficie. En estas condiciones, saturada y seca superficialmente, se pesa con una aproximación de 0.5 gr.

A continuación se determina su peso, sumergida en agua, a una temperatura entre 21 C y 25 C. Luego se introduce en el horno a una temperatura de 110 C hasta peso constante. Se deja enfriar y se pesa. Las características del agregado se determinan por las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}\text{Peso Específico Nominal } D_n &= P / (P - P_i) \\ \text{Peso Específico Aparente } D_a &= P / (P_s - P_i) \\ \text{Peso Específico S.S.S. } D_{sss} &= P_s / (P_s - P_i)\end{aligned}$$

Siendo:

- P = peso en gramos de la muestra seca
- P_s = peso en gramos de la muestra saturada interiormente y seca superficialmente
- P_i = peso en gramos de la muestra sumergida en agua.

5.14 PESO SOLIDO

5.14.1 CONCEPTO

Se define como peso sólido de un agregado al producto de su gravedad específica por la densidad del agua. En la práctica se considera que el peso sólido es aquel que tendría el material si se pudiera eliminar totalmente los vacíos internos externos. El peso sólido se emplea en la determinación del volumen absoluto o volumen de sólidos del material.

5.14.2 EJEMPLO

Se desea conocer cuál es el peso sólido de un agregado cuya gravedad específica de masa es de 2.72?

El peso sólido será igual a la gravedad específica del agregado multiplicada por la densidad del agua:

$$\text{Peso Sólido} = 2.72 \times 1,000 = 2,700 \text{ kg/m}^3$$

5.15 VOLUMEN ABSOLUTO

5.15.1 CONCEPTO

Se define como volumen absoluto, volumen sólido, o volumen de sólidos, al espacio ocupado por las partículas de un material sin considerar sus vacíos internos o externos. El volumen absoluto de una masa de agregados es la suma de los volúmenes absolutos de todas sus partículas.

5.15.2 EJEMPLO

Cual será el volumen absoluto de 830 kg de agregado fino seco cuya gravedad específica es de 2.72?

$$\begin{array}{llll} \text{Peso Sólido} & = & 2.72 \times 1000 & = & 2,730 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Volumen Absoluto} & = & 830/2,730 & = & 0.350 \text{ m}^3 \end{array}$$

5.16. CONTENIDO DE VACIOS

5.16.1 CONCEPTO

Con respecto a la masa de agregado, el término «vacíos» se refiere a los espacios no ocupados entre las partículas de agregado. Puede decirse que este valor es la diferencia entre el volumen bruto o volumen total de la masa de agregado y el espacio realmente ocupado por las partículas.

5.16.2 IMPORTANCIA

El criterio empleado para obtener la mejor combinación de agregados fino y grueso es que el porcentaje de sólidos sea tan grande como fuere posible. Desde que éste es controlado por la granulometría, perfil y textura superficial de las partículas, tanto el peso unitario como el porcentaje de vacíos del agregado sirven como índices aproximados de la adecuada selección de la granulometría.

Es importante recordar que, desde que la trabajabilidad de una mezcla de concreto está influenciada por la granulometría del agregado y que aquella que produce máxima densidad tiende a dar mezclas poco trabajables, la densidad de sólidos por sí sola no puede ser tomada como un criterio final.

Es igualmente importante recordar que el peso unitario del conjunto del agregado está directamente influenciado por el de las partículas individuales, el contenido de humedad de las mismas, así como la compacidad de la masa. Por ello puede esperarse amplios márgenes en los valores del peso unitario y del contenido de vacíos.

5.16.3 DETERMINACION

El espacio teórico ocupado por los vacíos entre las partículas de agregado puede determinarse a partir del conocimiento del peso unitario del agregado y de la gravedad específica de la masa del mismo. Dicho valor viene dado por la ecuación:

$$\% \text{ Vacíos} = 100 (\text{Peso sólido} - \text{Peso unitario}) / \text{Peso sólido}.$$

Cuanto mayor es el peso unitario, para una gravedad específica dada, menor es el contenido de vacíos. Igualmente, si el agregado está compuesto de partículas de textura superficial suave y perfil redondeado, para una granulometría determinada, deberá contener menor cantidad de vacíos que otro agregado de idéntica granulometría pero compuesto por partículas de textura

rugosa y perfil angular.

5.16.4 EJEMPLO

Se desea conocer el porcentaje de vacíos de un volumen unitario de 1,600 kg/m³ de agregado grueso cuya gravedad específica de masa es de 2,72?

$$\begin{aligned}\text{Peso Sólido} &= 2.72 \times 1,000 = 2,720 \text{ kg/m}^3 \\ \text{\% Vacíos} &= 100(2,720 - 1,600) / 2,720 = 41\%\end{aligned}$$

5.17 HUMEDAD Y ABSORCION

5.17.1 CONDICIONES DE HUMEDAD

Los agregados presentan poros internos, los cuales se conocen como «abiertos» cuando son accesibles al agua o humedad exterior sin requisito de presión, diferenciándose de la porosidad cerrada, en el interior del agregado, sin canales de comunicación con la superficie a la que se alcanza mediante fluidos bajo presión.

El estado de humedad de un agregado puede estar comprendido dentro de las cuatro condiciones siguientes:

- Seco, que es aquella condición en la que toda la humedad, tanto interna como externa, ha desaparecido, generalmente por calentamiento a 100°C.
- Semi seco, o secado al ambiente, que es aquella condición en la cual no hay humedad superficial sobre las partículas, existiendo alguna humedad interna.
- Saturado superficialmente seco, que es aquella condición en la que no hay humedad libre o superficial sobre las partículas, pero todos los poros dentro de ellas están llenos de agua.
- Saturado o húmedo, que es aquella condición en que el agregado se encuentra saturado y con agua libre o superficial sobre las partículas.

5.17.2 ABSORCION Y ABSORCION EFECTIVA

Se entiende por absorción, al contenido de humedad total interna de un agregado que está en la condición de saturado superficialmente seco.

La capacidad de absorción del agregado se determina por el incremento de peso de una muestra secada al horno, luego de 24 horas de inmersión en agua y de secado superficial. Esta condición se supone representa la que adquiere el agregado en el interior de una mezcla de concreto.

Se entiende por absorción efectiva al volumen de agua necesario para traer un

agregado de la condición de secado al aire, o semi seco, a la condición de saturado superficialmente seco.

5.17.3 HUMEDAD SUPERFICIAL

Se entiende por humedad superficial, o agua libre, a la diferencia entre los estados saturado o húmedo y el estado saturado superficialmente seco. La humedad superficial o agua libre es aquella con la que contribuirá el agregado al agua de la mezcla.

5.17.4 CONTENIDO DE HUMEDAD

En los cálculos para el proporcionamiento del concreto se considera al agregado en condición de saturado superficialmente seco, es decir, con todos sus poros abiertos llenos de agua y libre de humedad superficial. Esta situación, que no es correcta en la práctica, conviene para fines de clasificación.

Si el agregado está saturado y superficialmente seco no puede absorber ni ceder agua durante el proceso de mezcla. Sin embargo, un agregado parcialmente seco resta agua, mientras que el agregado mojado, superficialmente húmedo, origina un exceso de agua en el concreto. En estos casos es necesario reajustar el contenido de agua, a fin que el contenido de agua resulte el correcto.

El contenido de humedad o agua total del agregado es la diferencia entre el estado actual de humedad del mismo y el estado seco.

5.17.5 APOORTE DE HUMEDAD DEL AGREGADO

La diferencia entre el contenido de humedad y el porcentaje de absorción da el aporte, positivo o negativo, del agregado al agua de la mezcla.

5.17.6 ENSAYOS DE DETERMINACION

Para determinar el porcentaje de absorción del agregado se aplican las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\% \text{ de Absorción del fino} &= 100 (500 - A) / A \\ \% \text{ de Absorción del grueso} &= 100 (B - A) / A\end{aligned}$$

En las que:

A = Peso en gramos de la muestra secada al horno.

B = Peso en gramos de la muestra saturada superficialmente seca.

5.17.7 IMPORTANCIA

La capacidad de absorción es una medida de la porosidad del agregado, estimándose que valores en exceso del 2% al 3% pueden ser un índice de agregados de alta porosidad efectiva. Agregados que absorben valores mayores que los indicados pueden ser aceptables si el tamaño de los poros es grande.

Los agregados de alta absorción y poros pequeños, con valores por debajo de 0.004 mm á 0.005 mm, deben ser evitados dado que el agua no drena de ellos fácilmente. En una mezcla de concreto, si el agregado no está en condición de saturado superficialmente seco, parte del agua puede ser tomada por él para llegar a esa condición. Igualmente, la humedad libre presente sobre la superficie de las partículas contribuirá al agua total de la mezcla.

Por tanto, la determinación del contenido de humedad, porcentaje de absorción y humedad libre son importantes en la medida que permiten conocer el volumen de agua con que contribuirá o que absorberá el agregado en una mezcla de concreto.

5.18 ESPONJAMIENTO

5.18.1 CONCEPTO

El esponjamiento del agregado fino es definido como el incremento de volumen de un peso dado del material debido a que la humedad superficial tiende a mantener las partículas separadas unas de otras.

El esponjamiento del agregado fino debido a variaciones en su contenido de humedad significa modificaciones en el contenido del agregado para un peso dado o, viceversa, fuertes disminuciones en el peso del agregado para un volumen dado, así como un fuerte incremento en el porcentaje de vacíos.

Aunque el esponjamiento en si mismo no afecta las proporciones de un concreto dosificado en peso, en el caso de las dosificaciones en volumen da lugar a que, en función de las diferentes condiciones de humedad del agregado, un volumen determinado del mismo pueda significar pesos diferentes con la consiguiente modificación en las proporciones de la mezcla.

Como consecuencia de esta interrelación peso-volumen variable, una mezcla podría resultar muy deficiente en su contenido de agregado fino, aumentando las posibilidades de segregación y formación de cangrejeras. Igualmente el rendimiento del concreto se reduciría.

5.18.2 MAGNITUD DEL ESPONJAMIENTO

La magnitud del esponjamiento depende del porcentaje de humedad presente en el agregado fino y de la fineza del mismo. Incrementos en el contenido de humedad del 5% al 8%, para agregados finos en condición de saturados superficialmente secos, pueden significar esponjamientos del 20% al 30%.

Para contenidos de agua libre mayores del 5% en el caso del agregado fino grueso y del 8% en el caso del agregado fino, cuanto mayor es el porcentaje de agua libre mayor es el esponjamiento.

Se considerará que el máximo incremento de volumen debido al esponjamiento puede ser del orden del 40% para agregado muy fino y del orden del 25% para agregado fino grueso. La correspondiente reducción en el peso unitario puede ser del 25% para agregado muy fino y del 15% para agregado fino grueso.

5.18.3 FORMA DE ACCION

A partir de un agregado fino totalmente seco, conforme aumenta el contenido de humedad, hasta un límite dado, las partículas comienzan a humedecerse y separarse debido a la formación entre ellas de una película de agua. Este proceso continúa, dando lugar a un aumento de volumen para un peso dado de agregado hasta que se alcanza el máximo incremento de volumen para un contenido de agua determinado.

Más allá de este contenido de agua libre, conforme el contenido de humedad crece tiende a disolverse la película de humedad que separa las partículas y el agua empieza a moverse en los vacíos que separan las partículas, tendiendo a escapar. Ello da lugar a que el volumen tienda a decrecer y que cuando el agregado fino esté totalmente saturado su volumen sea prácticamente el mismo que cuando está seco.

La única diferencia entre los estados seco y saturado radica en que el agregado fino totalmente saturado tiene un peso unitario más alto que el seco debido al 15% a 25% de agua requerido para saturarlo totalmente.

En el caso del agregado grueso prácticamente no hay esponjamiento. Sólo se aprecia un volumen adicional despreciable debido a la presencia de agua, siendo el espesor de la película muy pequeño en relación al tamaño de las partículas.

5.18.4 DETERMINACION

Desde que el volumen que ocupa el agregado fino en condición de saturado es igual al que ocupa al estado seco, la forma más conveniente de determinar el esponjamiento es medir la disminución de volumen de un agregado fino dado cuando es llevado al punto de saturación.

Para ello se llena un recipiente de volumen conocido con agregado húmedo suelto. Se vacía el agregado y se llena el recipiente parcialmente de agua y a continuación se hecha el agregado gradualmente al interior del mismo, moviendo y varillando para expeler todo el aire. A continuación se determina el volumen de arena en el estado saturado, estando el esponjamiento dado por la ecuación:

$$E = 100 (V_m - V_s) / V_s$$

En la que:

- E = Esponjamiento.
- V_m = Volumen inicial del agregado fino.
- V_s = Volumen en el estado saturado.

5.19 GRANULOMETRIA

5.19.1 CONCEPTO

Se define como granulometría a la distribución por tamaños de las partículas de agregado. Ello se logra separando el material por procedimiento mecánico empleando tamices de aberturas cuadradas determinadas.

El agregado comprende del 65% al 80% del volumen unitario del concreto. En razón de su importancia en el volumen de la mezcla la granulometría seleccionada para los agregados fino y grueso deberá permitir obtener en las mezclas una máxima densidad, con una adecuada trabajabilidad y características de acabado del concreto fresco y con obtención de las propiedades deseadas en el concreto endurecido.

5.19.2 GRANULOMETRIA IDEAL

En la práctica no existe ningún método que permita llegar a una «granulometría ideal» aplicable en todos los casos a todos los agregados. Sin embargo, se han desarrollado especificaciones de granulometría las cuales, en promedio, permitirán obtener concretos de propiedades satisfactorias a partir de materiales disponibles en una área determinada.

5.19.3 FORMAS DE EXPRESION

El sistema usual de expresar la granulometría de un agregado es aquel en el cual las aberturas consecutivas de los tamices son constantemente dobladas. Con tal sistema y empleando una escala logarítmica se puede espaciar líneas a intervalos constantes para representar los tamaños sucesivos.

Normalmente la granulometría del agregado fino se expresa en términos de los

porcentajes retenidos en los Tamices ASTM N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100 y N° 200.

Normalmente la granulometría del agregado grueso se expresa en términos de los porcentajes retenidos en los Tamices ASTM 1/4"; 3/8"; 1/2"; 3/4"; 1"; 1 1/2"; y mayores.

5.19.4 FORMAS DE DETERMINACION

La distribución de las partículas por tamaños se determina por análisis mecánico vibrando el material a través de una serie de tamices de aberturas cuadradas. Normalmente los tamices empleados tienen una abertura doble del que le sigue en la serie. La muestra debe ser representativa del conjunto del agregado.

Los datos obtenidos se registran en forma tabulada incluyendo:

- Peso retenido en cada tamiz
- Porcentaje retenido en cada tamiz
- Porcentaje acumulado retenido o que pasa cada tamiz.

5.19.5 CURVA GRANULOMETRICA

La curva granulométrica es una excelente ayuda para mostrar la granulometría de los agregados individuales y combinados. El ploteo logarítmico es conveniente dado que en una serie de tamices con aberturas con una relación constante el espaciamiento logarítmico es igual.

Los puntos que representan los resultados de un análisis son unidos para formar la «curva granulométrica» del agregado ensayado. Si se ha planteado una «granulometría ideal» para el proyecto, la curva obtenida puede aproximarse a la ideal empleando porcentajes de prueba de las granulometrías ideales incluidas.

5.19.6 GRANULOMETRIA CONTINUA Y DISCONTINUA

En general se considera que las granulometrías continuas, es decir aquellas en las que el tamaño de las partículas varía del más fino al más grueso siguiendo una ley uniforme, son las más satisfactorias, no siendo deseable que en cada tamiz sean retenidos porcentajes iguales.

La experiencia ha demostrado que es posible obtener concretos de calidad empleando agregados con granulometrías discontinuas, es decir excluyentes de determinados tamaños de agregados, siendo la principal desventaja de éstas la posibilidad de una mayor segregación.

La corrección de la granulometría del agregado fino por tamizado y recombinación puede ser costosa e impracticable. Para el agregado grueso puede ser fácilmente realizada.

5.19.7 REQUISITOS GRANULOMETRICOS DEL FINO

La granulometría del agregado fino empleado en un trabajo determinado debe ser razonablemente uniforme. Las variaciones de más o menos 0.2 en el módulo de fineza pueden ser causa de rechazo.

El agregado fino deberá contener suficiente cantidad de material que pasa la Malla N° 50 si se desea obtener adecuada trabajabilidad en la mezcla. En pastas ricas en material cementante, este porcentaje puede disminuir, mientras que las pastas pobres requieren importante cantidad de material fino.

El máximo deseable para el material que pasa la Malla N° 100 es de 3% a 5%. Es importante indicar que los finos del agregado no deben ser confundidos con el limo, la marga u otras impurezas indeseables.

Cuando se emplea un agregado que tiene un porcentaje importante de partículas en las Mallas N° 4 y N° 8, el agregado grueso deberá contener muy poco material del tamaño mayor de las partículas de agregado fino, a fin de evitar un concreto áspero y granuloso, de difícil acabado.

En general se recomienda que el agregado fino tenga un módulo de fineza entre 2.3 y 3.1. Ello no excluye la posibilidad de emplear agregados con módulos de fineza mayores o menores si se toman las precauciones adecuadas en la selección de las proporciones de la mezcla.

Debe recordarse que los límites permisibles para el agregado fino dependen en alguna forma del perfil y las características superficiales de las partículas. Un agregado fino compuesto de partículas suaves y redondeadas puede dar resultados satisfactorios con granulometrías gruesas.

5.19.8 COMBINACION DE AGREGADOS

Al combinar agregados separados sobre la base del análisis de tamices se deberá considerar lo siguiente:

- a. Las proporciones se seleccionarán de manera tal que la granulometría de los agregados combinados esté comprendida dentro de los límites deseados o se aproxime a la granulometría considerada ideal para el concreto a ser utilizado en la obra.
- b. La granulometría ideal es aquella que se ha determinado por experiencia y/o ensayos que representa, para condiciones dadas (clase y tamaño

- máximo del agregado; contenido de cemento y consistencia) la combinación que produce un concreto de óptima calidad.
- c. El módulo de fineza de los agregados combinados debe estar dentro de los límites que se han considerado aceptables mediante ensayos.

5.19.9 OPTIMA GRANULOMETRIA

En trabajos importantes se considera conveniente hacer estudios especiales para determinar la más deseable combinación de agregados. Debe tratarse de lograr una combinación de materiales que produzca la máxima densidad compatible con una buena trabajabilidad del concreto y mínimo contenido de cemento para una consistencia dada.

5.19.10 TAMAÑO MAXIMO DEL AGREGADO GRUESO

El tamaño máximo del agregado grueso se determina a partir de un análisis por tamices y, generalmente, se acepta que es el que corresponde al tamiz inmediatamente superior a aquel en el cual queda 15% ó más de material acumulado retenido.

De la observación de los resultados de los ensayos se aprecia una limitación importante del concepto de tamaño máximo: granulometrías muy disímiles pueden dar el mismo valor del tamaño máximo del agregado grueso. Ello debe tenerse presente en la elección del agregado, de su granulometría y de las proporciones de mezcla.

5.19.11 CLASIFICACION PERUANA

En lo referente a la granulometría del agregado, la norma NTP 400.037 especifica que:

- a. Cuando se determine de acuerdo con la Norma NTP 400.012, el agregado grueso deberá cumplir con la gradación establecida en la Tabla N° 1, la cual se presenta al final del Capítulo.
- b. Cuando se determine de acuerdo con la Norma NTP 400.012, el agregado fino deberá cumplir con los límites especificados en la Tabla N° 2.
- c. Se permitirá el empleo de agregados que no cumplan con las gradaciones especificadas, siempre que existan estudios calificados a satisfacción de las partes, que aseguren que el material producirá concreto de la calidad requerida.
- d. El agregado utilizado en concretos de $f'c$ 210 kg/cm² de resistencia de diseño y mayores, así como los utilizados en pavimentos de concreto, deberán cumplir además de los requisitos obligatorios, los siguientes:

- A La granulometría del agregado fino deberá corresponder a la graduación C de la Tabla N° 2. Se permitirá el uso de agregado que cumpla con la gradación indicada siempre y cuando existan estudios calificados a satisfacción de las partes, que aseguren que el material producirá concreto de la calidad requerida.

TABLA 2

TAMIZ	GRUPO C	GRUPO M	GRUPO F
3/8"	100	100	100
Nº 4	95 - 100	85 - 100	89 - 100
Nº 8	80 - 100	65 - 100	80 - 100
Nº 16	50 - 85	45 - 100	70 - 100
Nº 30	25 - 60	25 - 80	55 - 100
Nº 50	10 - 30	5 - 48	5 - 70
Nº 100	2 - 10	0 - 12	0 - 12

El Grupo C corresponde a arenas gruesas

El Grupo M corresponde a arenas intermedias

El Grupo F corresponde a arenas finas

5.20 MODULO DE FINEZA

5.20.1 CONCEPTO

El módulo de fineza es un índice del mayor o menor grosor del conjunto de partículas de un agregado. Se define como la suma de los porcentajes acumulados retenidos en las mallas de 3"; 1 1/2"; 3/4"; 3/8"; Nº 4; Nº 8; Nº 16; Nº 30; Nº 50; y Nº 100, dividida entre 100.

Gran número de granulometrías de agregados fino o grueso, o de una combinación de ambos, pueden dar un módulo de fineza determinado. Esta es la principal desventaja del empleo de este factor, el cual se utiliza como un índice de control de uniformidad de materiales.

5.20.2 APLICACIONES Y LIMITES

El módulo de fineza usualmente se determina para el agregado fino, pero el conocimiento del módulo de fineza del agregado grueso puede ser necesario

para la aplicación de algunos métodos de proporcionamiento de mezclas.

Los agregados que presentan un módulo de fineza bajo indican una preponderancia de las partículas más finas con un área superficial total muy alta, la que será necesario cubrir con pasta.

El módulo de fineza sirve como una medida del valor lubricante de un agregado, dado que cuanto mayor es su valor menor será el valor lubricante y la demanda de agua por área superficial.

Pudiendo obtenerse con diferentes granulometrías el mismo módulo de fineza, éste no deberá emplearse para definir la granulometría de un agregado.

5.20.3 EJEMPLOS

Se desea conocer el módulo de fineza de un agregado fino cuyos porcentajes retenidos y acumulados retenidos se dan a continuación:

TAMIZ	PORCENTAJE RETENIDO	PORCENTAJE ACUMULADO
1 1/2"	0	0
3/4"	0	0
3/8"	0	0
Nº 4	2	2
Nº 8	13	15
Nº 16	15	30
Nº 30	30	60
Nº 50	25	85
Nº 100	13	98

Suma = 290

$$\text{Módulo de Fineza} = 290 / 100 = 2.9$$

Se desea determinar el módulo de fineza de un agregado grueso en el que se conocen los porcentajes retenidos y acumulados retenidos:

TAMIZ	PORCENTAJE RETENIDO	PORCENTAJE ACUMULADO
1 1/2"	0	0
3/4"	50	50
3/8"	30	80
Nº 4	20	100
Nº 8	0	100
Nº 16	0	100

Nº 30	0	100
Nº 50	0	100
Nº 100	0	100

Suma = 730

Módulo de Fineza = $730 / 100 = 7.3$

Si se ha empleado un número mayor de mallas con el propósito de obtener una curva granulométrica más exacta, los valores adicionales deberán ser sumados a las mallas correspondientes para reducir el conjunto a la serie estándar:

TAMIZ	PORCENTAJE RETENIDO	PORCENTAJE ACUMULADO
Nº 4	2	2
Nº 6	5	
Nº 8	5	12
Nº 10	5	
Nº 16	14	31
Nº 20	12	
Nº 30	10	63
Nº 40	12	
Nº 50	8	73
Nº 80	10	
Nº 100	3	86

Suma = 257

Módulo de fineza = $257 / 100 = 2.57$

En el agregado grueso puede presentarse el caso que éste sea el resultado de combinar diferentes porcentajes de material de diferentes dimensiones y se desee conocer el módulo de fineza de dicha combinación.

En este caso el procedimiento consiste en calcular el módulo de fineza de cada uno de los agregados gruesos y luego, de acuerdo al porcentaje en que cada uno de ellos entre en la combinación calcular el módulo de fineza de ésta.

5.21 SUPERFICIE ESPECIFICA

5.21.1 CONCEPTO

Se define como superficie específica de una partícula de agregado al área superficial de la misma. La superficie específica de un conjunto de partículas es la suma de las áreas superficiales de las mismas. Se expresa en cm^2/gr .

Cuanto mayor es la superficie específica mayor el área superficial a ser cubierta con pasta y menor el diámetro de las partículas. El agregado fino siempre tiene una superficie específica alta, en tanto que la del agregado grueso suele ser bastante baja.

Agregados en los cuales varía la superficie específica, aún cuando tengan la misma densidad, no dan la misma resistencia al concreto.

Para relaciones agua-cemento y agregado-cemento constantes, no existe una relación única entre densidad y superficie específica, de tal manera que aún cuando la densidad varíe, si la superficie específica permanece constante la resistencia en compresión también permanece significativamente constante.

Si la granulometría de los agregados combinados se modifica de manera tal que la superficie específica varía puede obtenerse concretos de propiedades diferentes; pero si la granulometría del agregado combinado se modifica de manera tal que la superficie específica se mantiene constante, se obtendrán concretos de las mismas propiedades.

La consistencia del concreto disminuye conforme la superficie específica se incrementa. Por tanto, no es posible variar la superficie específica del agregado sin variar la consistencia.

La Tabla 3 presenta, para cada uno de los tamices utilizados, el valor del diámetro medio de dicho tamiz y el anterior:

TABLA 3

TAMIZ	ABERTURA (cms)	DIAMETRO MEDIO
3"	7.62	—
2"	5.08	6.35
1 1/2"	3.81	4.44
1"	2.54	3.17
3/4"	1.90	2.22
1/2"	1.27	1.58
3/8"	0.95	1.11
Nº 4	0.48	0.714
Nº 8	0.238	0.357
Nº 16	0.119	0.179
Nº 30	0.059	0.089
Nº 50	0.0297	0.044
Nº 100	0.0149	0.022
Nº 200	0.0074	0.011
Nº 400	0.0037	0.0056

Para obtener la superficie específica se divide, para cada uno de los tamices, el valor del porcentaje retenido entre el valor del diámetro medio. La superficie específica del conjunto se determina por la ecuación:

$$\text{SUPERFICIE ESPECIFICA} = (0.06 \text{ S/G}) \text{ cm}^2/\text{gr.}$$

P = Suma de la superficie específica de cada tamiz.

G = Gravedad Específica de masa del agregado.

El valor de la superficie específica del agregado será igual a la suma de la superficie específica de cada tamiz.

5.21.2 EJEMPLOS

Se desea conocer la superficie específica de un agregado fino cuya gravedad específica es de 2.73 y cuya granulometría es la que se presenta a continuación:

MALLA	% RETENIDO
Nº 4	3.6
Nº 8	11.5
Nº 16	19.5
Nº 30	24.0
Nº 50	21.5
Nº 100	10.9

Aplicando los criterios indicados se tiene:

MALLA	% RETENIDO	DIAMETRO MEDIO	S
Nº 4	3.6	0.714	5
Nº 8	11.5	0.357	32
Nº 16	19.5	0.179	109
Nº 30	24.0	0.089	270
Nº 50	21.5	0.044	489
Nº 100	10.9	0.022	496
			<hr/>
			1404

$$\text{Superficie específica} = 0.06(1404/2.72) = 30.5 \text{ cm}^2/\text{gr.}$$

Se desea conocer la superficie específica de un agregado grueso cuya gravedad específica es de 2.79 y su granulometría es de:

MALLA	% RETENIDO
1"	48.8
3/4"	36.5
1/2"	11.4
3/8"	1.8
Nº 4	1.3

Aplicando los criterios indicados se tiene:

MALLA	% RETENIDO	DIAMETRO MEDIO	S
1 1/2"	—	—	—
1"	48.8	3.17	15.4
3/4"	36.5	2.22	16.5
1/2"	11.4	1.58	7.2
3/8"	1.8	1.11	1.6
Nº 4	1.3	0.714	1.8
			42.5

$$\text{Superficie específica} = 0.06(42.5/2.79) = 0.91 \text{ cm}^2/\text{gr}$$

6. CLASIFICACION DE LOS AGREGADOS

6.1 POR SU ORIGEN

Por su origen los agregados se clasifican en:

- Agregados Naturales
- Agregados Artificiales

Se considera como agregados naturales a las partículas que son el resultado de un proceso de obtención o transformación natural. Los agregados obtenidos por trituración mecánica y tamizado de rocas se consideran dentro de la clasificación de agregados naturales.

Entre los principales grupos de agregados naturales se encuentran la arena y canto rodado de río o cantera; las arenas naturales muy finas; la piedra pomez natural y la lava volcánica porosa.

Se define como agregados artificiales a las partículas obtenidas como el resultado de un proceso de transformación industrial de un elemento natural, como en el caso de las arcillas y esquistos expansionados; o como subproducto de un proceso industrial, como sería el caso de las arcillas de alto horno.

6.2 POR SU COMPOSICION MINERALOGICA

Por su composición mineralógica los agregados pueden ser primordialmente:

- Silíceos
- Calcareos

La forma en la cual los minerales principales se presentan, así como la presencia o ausencia de minerales secundarios, pueden ser más importantes que la composición promedio.

6.3 POR SU TAMAÑO

De acuerdo a su tamaño los agregados se clasifican en:

- Agregado Fino
- Agregado Grueso

Se define como agregado fino a aquel que pasa integralmente el tamiz de 3/8" y como mínimo en un 95% el Tamiz N° 4, quedando retenido en el Tamiz N° 200. Se define como agregado grueso a aquel que queda retenido, como mínimo, en un 95% en el Tamiz N° 4.

6.4 POR SUS PROPIEDADES FISICAS

Por la contribución de sus propiedades físicas a la calidad del concreto, el agregado puede clasificarse en cuatro categorías:

- Agregado bueno
- Agregado satisfactorio
- Agregado regular
- Agregado pobre

Se considera como agregado bueno aquel que por la superior calidad de sus constituyentes contribuye a una resistencia alta, tiene buena durabilidad bajo cualquier condición externa o interna, y es resistente a los procesos de erosión y abrasión.

Se considera como agregado satisfactorio aquel cuyos elementos contribuyen a una moderada resistencia del concreto; e igualmente dan a éste resistencia a los procesos de erosión y abrasión, así como buena durabilidad bajo cualquier condición.

Se considera como agregado regular aquel cuyos constituyentes contribuyen a obtener una moderada resistencia a la compresión y abrasión del concreto, pero bajo condiciones de clima pueden contribuir a su destrucción.

Se considera agregado pobre aquel cuyos constituyentes son de baja calidad y contribuyen a obtener bajas resistencias mecánicas y de abrasión del concreto; e igualmente causan destrucción del concreto bajo condiciones climáticas pobres.

6.5 POR SUS PROPIEDADES QUÍMICAS

La reactividad química de los constituyentes del agregado, especialmente con los álcalis del cemento, permite clasificarlos en: Inocuos; y Deletereos

Se denomina agregados inocuos a aquellos cuyos elementos constituyentes no participan en reacciones químicas dañinas al concreto.

Se denomina agregados deletereos a aquellos que contienen materiales los cuales producen efectos adversos sobre el concreto debido a la reacción química que tiene lugar con posterioridad al endurecimiento de la pasta.

Las sustancias que se consideran deletereas, en razón de su susceptibilidad al ataque por álcalis presentes en el cemento, no son peligrosas si se emplean con cementos que contienen menos del 0.6% de álcalis totales.

6.6 POR SU PESO

De acuerdo a su peso unitario, dado por su densidad, los agregados se clasifican en:

- Agregados pesados
- Agregados de peso normal
- Agregados livianos.

Los agregados pesados naturales incluyen el espato pesado; la hematita, la magnetita; la limonita; la baritina, etc. Los artificiales incluyen trozos de hierro, bolas de metal, virutas de acero, limaduras de hierro, etc.

Los agregados de peso normal naturales, incluyen las arenas y cantos rodados de río o cantera, la piedra partida, etc. Entre los artificiales las escorias de alto horno, el clinker triturado, el ladrillo partido, etc.

Entre los agregados livianos naturales se encuentran la escoria volcánica y la piedra pomez. Entre los artificiales el clinker de altos hornos; las arcillas, pizarras y esquistos expandidos; la perlita, la vermiculita, etc.

6.7 POR SU PERFIL

De acuerdo a su perfil las partículas de agregado comprenden siete grupos:

- Redondeado
- Irregular
- Laminado
- Angular
- Semiangular o semiredondeado
- Elongado
- Laminado y elongado

El perfil redondeado comprende aquellas partículas totalmente trabajadas por el agua o completamente perfiladas por desgaste o frotamiento, tales como la grava de río o de mar

El perfil angular comprende las gravas naturalmente irregulares o parcialmente perfiladas por desgaste y que tienen caras redondeadas, tales como las gravas de cantera de aluvión.

El perfil laminado comprende aquellas partículas en las cuales el espesor es pequeño en relación a las otras dos dimensiones.

El perfil angular comprende aquellas partículas cuyos ángulos son bien definidos y están formados por la intersección de caras rugosas

El perfil semiangular o semiredondeado comprende aquellas partículas algunos de cuyos ángulos están formados por la intersección de caras rugosas y otras que son redondeadas o tienden a serlo.

El perfil elongado comprende aquellas partículas, generalmente angulares, en las cuales la longitud es considerablemente mayor que las otras dos dimensiones.

El perfil laminado y elongado comprende aquellas partículas que tienen la longitud considerablemente mayor que el ancho, y éste considerablemente mayor que el espesor.

6.8 POR SU TEXTURA SUPERFICIAL

De acuerdo a su textura superficial, las partículas de agregado se clasifican en seis grupos:

- Textura vitrea
- Textura suave
- Textura granular
- Textura rugosa
- Textura cristalina
- Textura alveolar.

La textura vitrea corresponde a aquellas partículas de agregado en las cuales

se presenta fractura conchoidal, tales como el pedernal negro o la escoria vitrea.

La textura suave corresponde a aquellas partículas de agregado en las cuales la textura ha sido suavizada por la acción del agua, tales como la grava o el marmol.

La textura granular corresponde a aquellas partículas de agregado que muestran en la zona de fractura granos redondeados más o menos uniformes, tales como las areniscas.

La textura rugosa corresponde a agregados provenientes de rocas fracturadas de grano fino y medio, las cuales contienen elementos cristalinos no fácilmente visibles tales como el basalto, la felsita y la caliza.

La textura cristalina corresponde a aquellas partículas de agregado que presentan constituyentes cristalinos fácilmente visibles, tales como el granito, el gabro, el gneiss.

La textura alveolar corresponde a aquellas partículas de agregado que presentan poros y cavidades visibles, tales como el ladrillo, la piedra pómez y el clinker.

6.9 CLASIFICACION PETROGRAFICA

La clasificación petrográfica de los agregados, de acuerdo a sus rocas originarias, comprende diez grupos:

- a. Grupo Basalto, el cual incluye las andesitas, basalto, diabasa, porfídita básica, dolerita, epidiorita, hornablensa-esquistos, lamprófito, cuarzo dolerita, espilita.
- b. Grupo Granito, el cual incluye el granito, granodiorita, cuarzo, diorita, gneiss, granulita, pegmatita, sienita.
- c. Grupo Hornfelsa, el cual incluye rocas de toda clase alteradas por contacto, con excepción del marmol.
- d. Grupo Pórfido, el cual incluye la aplita, dacita, felsita, riolita, granófito, queratófito, microgranito, pórfido, cuarzo porfídita, riolita, traquita.
- e. Grupo Pedernal, el cual incluye el pedernal y el horsteno.
- f. Grupo Gabro, el cual incluye la diorita básica, gabro, serpentina, peridotita, gneiss básico, hornablenda.
- g. Grupo Arenisca, el cual incluye el conglomerado, las areniscas, arcosa, brecha, cascajo, tufa.
- h. Grupo Caliza, el cual incluye la dolomita, la caliza, el marmol.
- i. Grupo Cuarzita, el cual incluye la arenisca cuarzítica, la cuarzita recristalina, el ganister.
- j. Grupo Esquisto, el cual incluye el esquisto, la pizarra, la filita y, en general, todas las rocas severamente cizalladas.

7. CONSIDERACIONES GENERALES

7.1 CUMPLIMIENTO DE LAS ESPECIFICACIONES

En relación con los agregados empleados en la preparación del concreto:

- a. Los agregados de peso normal cumplirán con los requisitos de la Norma NTP 400.037 ó de la Norma ASTM C 33 en su caso, o los de las especificaciones del Proyecto.
- b. El empleo de agregados livianos o pesados deberá estar referido a las Normas ASTM correspondientes.
- c. Los agregados seleccionados deberán ser aprobados por la Supervisión.
- d. Las especificaciones técnicas del proyecto podrán indicar requisitos especiales
- e. El Contratista deberá emplear en obra agregados de calidad igual o superior a la indicada en las especificaciones del Proyecto.

Los agregados que no cumplan con alguno de los requisitos indicados podrán ser autorizados, por escrito, por la Supervisión si demuestran, por ensayos de laboratorio o experiencia de obra, que pueden producir, bajo condiciones similares a las que se espera en obra y sin incidir en el costo, concreto de las propiedades requeridas.

Los agregados que no cuenten con un registro de servicios demostrable, o provengan de canteras explotadas directamente por el Contratista, podrán ser aprobados por la Supervisión si cumplen con aquellos ensayos normalizados que ésta considere convenientes. Este procedimiento no invalida el control de lotes en obra.

7.2 MANEJO

Los agregados fino y grueso deberán ser manejados como materiales independientes. Cada tamaño de agregado grueso, así como la combinación cuando dos o más tamaños son empleados, deberá cumplir con los requisitos de granulometría de la Norma ASTM C 33 o de la Norma NTP 400.037

Los agregados seleccionados se procesarán, transportarán, almacenarán y utilizarán en todas sus etapas de manera que:

- a. Se garantice que la pérdida de finos será mínima;
- b. Se mantenga su uniformidad;
- c. No se produzca contaminación por sustancias extrañas,
- d. No se produzca rotura o segregación importante.

7.3 GRANULOMETRIA

Se define como granulometría de un agregado a la distribución por tamaños de las partículas del mismo, la que se logra por separación mediante el empleo de tamices de aberturas determinadas.

La granulometría seleccionada para los agregados fino y grueso deberá permitir obtener mezclas de máxima densidad, con una adecuada trabajabilidad en función de las condiciones de colocación y acabado de la mezcla fresca; y con la obtención de las propiedades deseadas para el concreto endurecido. La granulometría deberá cumplir con los requisitos de la Norma ASTM C 33 ó de la Norma NTP 400.037

En la práctica no existe ningún método que permita llegar a una «granulometría ideal» aplicable a todos los agregados. Se han desarrollado especificaciones de granulometría las cuales, en promedio, permiten obtener concretos de propiedades satisfactorias a partir de los materiales disponibles en un área determinada.

Si bien se considera que las granulometrías continuas son las más satisfactorias, la experiencia ha demostrado que es posible obtener concretos de calidad empleando agregados con granulometrías discontinuas, siendo la principal desventaja de éstas la posibilidad de una mayor segregación.

La corrección del agregado fino por tamizado y recombinación puede ser costosa e impracticable. Para el agregado grueso puede ser fácilmente realizada.

7.4 REACTIVIDAD ALCALI-AGREGADO

El agregado empleado en concretos que han de estar sometidos a humedecimiento, exposición prolongada a atmósferas húmedas, o en contacto con suelos húmedos, no deberá tener, en su composición mineralógica, en un porcentaje como para causar expansión excesiva del concreto o mortero, ningún material que sea potencialmente reactivo con los álcalis del cemento.

Se exceptúa los casos en que el cemento contiene menos del 0.6% de álcalis calculado como el equivalente de óxido de sodio ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}$), o cuando se adiciona materiales capaces de controlar las expansiones debidas a la reacción álcali-agregado.

7.5 ESTABILIDAD DE VOLUMEN

El comportamiento de los agregados en los concretos sujetos a la acción de las heladas se evalúa por el conocimiento de su comportamiento histórico en obras similares. Cuando esto no es posible, o se quiere una opinión más sustentada,

se recomienda efectuar una de las siguientes pruebas: el ensayo de congelamiento o de inmersión en sulfato de magnesio o de sodio. En ambos casos se trata de establecer una similitud entre el ensayo y la realidad.

El comportamiento del concreto expuesto a la congelación guarda relación con la estructura de poros de los agregados. Si el agregado tiene un alto coeficiente de absorción, puede ocurrir que cuando el agua pasa del estado líquido al sólido por el congelamiento, la expansión de volumen provoca tensiones internas muy elevadas, que ocasionan el agrietamiento o desintegración del concreto.

El ASTM ha normalizado el ensayo C 88, por el cual una muestra de agregado de granulometría especificada se coloca en una solución saturada de sulfato de sodio o de magnesio, determinando su alteración o magnesio. Se estima que la formación de los cristales de sal en la estructura capilar del agregado se realiza con incremento de volumen, sometiendo el agregado a condiciones similares a las que se presentan en el caso de las heladas. Existen serias discrepancias sobre el grado de correlación existente entre el ensayo y la realidad.

El ensayo de estabilidad de volumen sólo se realizará en agregados a ser empleados en concretos que van a estar sometidos a procesos de congelación y deshielo en cualquier etapa de su vida. El agregado ensayado de acuerdo a la Norma ASTM C 88 ó NTP 400.016, deberá presentar:

- a. En el agregado fino una pérdida no mayor del 10% si se emplea sulfato de sodio, ni mayor del 15% si se emplea sulfato de magnesio.
- b. En el agregado grueso una pérdida no mayor del 12% si se emplea sulfato de sodio, ni mayor del 18% si se emplea sulfato de magnesio.

Las excepciones a los casos anteriores son:

- a. El agregado que no cumpla con los requisitos mencionados podrá ser utilizado si un concreto de propiedades comparables, preparado con agregados del mismo origen, ha demostrado un registro de servicio satisfactorio cuando ha estado sometido a condiciones de intemperismo similares a las que se espera. Se requiere autorización escrita de la Supervisión.
- b. El agregado que no tenga un registro de servicios demostrable podrá ser aceptado siempre que se obtengan resultados satisfactorios en concretos sometidos a ensayos de congelación y deshielo efectuados de acuerdo a la Norma ASTM C 666. Se requiere autorización escrita de la Supervisión.

La interpretación del ensayo debe hacerse de una manera cualitativa y cuantitativa. En el primer caso se examinarán las partículas mayores de 3/4" después de cada ciclo, determinando su estado y clasificándolas según su desintegración, agrietamiento, hendidura, exfoliación y desmoronamiento.

La evaluación cuantitativa del ensayo se realiza por un promedio compensado, calculado a partir del porcentaje de pérdida para cada fracción granulométrica, teniendo como base la graduación de la mezcla antes del ensayo.

7.6 SALES

El agregado, fino o grueso, no deberá contener sales solubles totales en porcentaje mayor de 0.015% en peso del cemento. Si el contenido es mayor deberá ser tratado por lavado cuidadoso con agua potable. Su utilización requiere informe previo del Laboratorio y autorización escrita de la Supervisión.

El contenido de cloruro de calcio soluble en agua, presente en el agregado, se determinará a acuerdo a lo especificado en la Norma ASTM D 1411.

En ningún caso se utilizará agregado de procedencia marina que no haya sido previamente cuidadosamente lavado, en mezclas para estructuras de concreto armado y/o presforzado, o en aquellas que tengan elementos metálicos embebidos.

7.7 AGREGADOS CALIENTES

Los agregados expuestos a la acción directa del sol deberán, cuando ello fuere necesario, enfriarse para su utilización en el mezclado. Si dicho enfriamiento se efectúa bajo riego, se deberá considerar la cantidad de agua añadida al agregado a fin de corregir la de la mezcla y mantener la relación agua-cemento seleccionada.

7.8 AGREGADO CONGELADO

El agregado total o parcialmente congelado no deberá ser utilizado en tanto mantenga esa condición. Se utilizará métodos apropiados para volver el agregado a su condición normal. En el proceso de deshielo se tomarán precauciones para no modificar la relación agua-cemento seleccionada.

8. AGREGADO FINO

8.1 DEFINICION

Se define como agregado fino a aquel proveniente de la desintegración natural o artificial de las rocas, el cual pasa el Tamiz NTP 9.4 mm (3/8") y cumple con los límites establecidos en las Normas NTP 400.037 ó ASTM C 33.

8.2 REQUISITOS

El agregado podrá consistir de arena natural o manufacturada, o una combinación de ambas. Sus partículas serán limpias; de perfil preferentemente angular; duras;

compactas y resistentes; libres de polvo, terrones, partículas escamosas o blandas, esquistos, pizarras, álcalis, materia orgánica, sales u otras sustancias dañinas para el concreto.

8.3 GRANULOMETRIA

El agregado estará graduado dentro de los límites indicados en la Normas NTP 400.037 ó ASTM C 33. La granulometría seleccionada será preferentemente uniforme y continua, con valores retenidos en las mallas N° 4 a N° 100 de la Serie Tyler. Se recomiendan para el agregado los siguientes límites:

MALLA		PORCENTAJE QUE PASA
3/8"	(9,50 mm)	100
N° 4	(4.75 mm)	95 a 100
N° 8	(2.36 mm)	80 a 100
N° 16	(1.18 mm)	50 a 85
N° 30	(600 micrones)	25 a 60
N° 50	(300 micrones)	10 a 30
N° 100	(150 micrones)	2 a 10

El porcentaje retenido en dos mallas sucesivas no excederá del 45%. Si el agregado es empleado en concretos con aire incorporado y un contenido de cemento mayor de 255 kg/m³; o si el concreto es sin aire incorporado y un contenido de cemento mayor de 300 kg/m³; o si una adición mineral aprobada es empleada para suplir las deficiencias en el porcentaje que pasa dichas mallas, el porcentaje indicado para las mallas N° 50 y N° 100 podrá ser reducido a 5% y 0% respectivamente.

Preferentemente el módulo de fineza no deberá ser menor de 2.3 ni mayor de 3.1 debiendo ser mantenido dentro de los límites de más o menos 0.2 del valor asumido para la selección de las proporciones de la mezcla. Si se sobrepasa el valor asumido, por exceso o por defecto, la Supervisión podrá autorizar reajustes en las proporciones de la mezcla o rechazar el agregado, para compensar las variaciones en la granulometría. Estos ajustes no deberán significar reducción en el contenido de cemento.

El agregado fino que no cumple con los requisitos de granulometría y módulo de fineza indicados podrá ser empleado si el Contratista demuestra a la Supervisión que:

- a. Concretos preparados con agregado fino similar de la misma fuente de abastecimiento tienen un registro de servicios aceptable en construcciones de concreto similares; ó

- b. En la ausencia de un registro de servicios aceptable, pueda demostrar que concretos de la clase especificada, preparados con el agregado fino bajo consideración, tienen sus propiedades más importantes por lo menos iguales a las de aquellos concretos preparados con los mismos ingredientes;
- c. El agregado fino es seleccionado de una fuente que tiene un registro de servicios aceptable en construcciones de concreto similares.

El agregado fino que cumple con los requisitos de granulometría de las especificaciones de otra entidad y que es de empleo general en el área, deberá ser considerado como que tiene un registro de servicios satisfactorio en relación a aquellas propiedades del concreto que pueden ser afectadas por la granulometría del agregado fino.

Adicionalmente, en relación con su granulometría, el agregado fino deberá:

- a. Contener suficiente cantidad de material que pasa la malla N° 50 a fin de obtener en el concreto adecuada trabajabilidad, ello especialmente en mezclas con pastas pobres.
- b. Tener un máximo de 3% á 5% de material que pasa la Malla N° 200. No se confundirá los finos del agregado con el limo, la marga u otras impurezas indeseables.
- c. Emplear un agregado grueso con poco o ningún material en las Mallas N° 4 y N° 8 en aquellos casos en que el agregado fino tiene un porcentaje importante en esas mallas, a fin de evitar un concreto áspero, granuloso y de acabado difícil.
- d. Evitar emplear, salvo que las circunstancias del entorno obliguen a ello, como en el caso de la selva baja peruana, agregado excesivamente fino.
- e. Recordar que los límites permisibles para el agregado fino dependen en alguna forma del perfil y características superficiales de las partículas.

8.4 PARTICULAS INCONVENIENTES

La cantidad de sustancias deletereas o partículas inconvenientes presentes en el agregado fino no deberá exceder de los siguientes límites, expresados como porcentaje en peso de la muestra total:

- Lentes de arcilla y partículas desmenuzables 3.0%
- Material más fino que la Malla N° 200:
 - a. Concreto sujeto a abrasión 3.0%
 - b. Todos los otros concretos 5.0%
- Carbón y Lignito:
 - a. Cuando la apariencia superficial del concreto es importante 0.5%

- b. Otros concretos 1.0%
- Mica 0.0%
- Partículas deleznales 3.0%

8.5 MATERIA ORGANICA

El agregado no deberá indicar presencia de materia orgánica. No deberá emplearse agregados que en el ensayo de la Norma ASTM C 40 ó NTP 400.013 den una coloración mayor del N° 1, excepto si:

- a. La coloración en el ensayo se debe a la presencia de muy pequeñas cantidades de carbón; lignito o partículas similares; ó
- b. Realizado el ensayo a que se refiere la Norma ASTM C 87, la resistencia a la compresión a los 7 días, de morteros preparados con dicho agregado, no es menor del 95% de la de morteros similares preparados con otra porción de la misma muestra de agregado previamente lavada con una solución al 3% de hidróxido de sodio de acuerdo a los requisitos de la Norma NTP 400.013 ó ASTM C 33.

9. AGREGADO GRUESO

9.1 DEFINICION

Se define como agregado grueso al material retenido en el Tamiz NTP 4.75 mm (N° 4) y que cumple con los límites establecidos en las Normas ITINTEC 400.037 ó ASTM C 33

9.2 CARACTERISTICAS

El agregado grueso puede consistir de piedra partida, grava natural o triturada, agregados metálicos naturales o artificiales, concreto triturado, o una combinación de ellos. Estará conformado por partículas cuyo perfil sea preferentemente angular o semiangular, limpias, duras, compactas, resistentes, de textura preferentemente rugosa, y libres de material escamoso o partículas blandas.

Las partículas deberán ser químicamente estables y estarán libres de escamas, tierra, polvo, limo, sales, humus, inscrustaciones superficiales, materia orgánica, u otras sustancias dañinas.

9.3 GRANULOMETRIA

El agregado grueso estará graduado dentro de los límites especificados en las Normas NTP 400.037 o ASTM C 33. La granulometría seleccionada deberá ser

preferentemente continua y deberá permitir obtener la máxima densidad del concreto con una adecuada trabajabilidad en función de las condiciones de colocación de la mezcla. La granulometría seleccionada no deberá tener más del 5% del agregado retenido en la malla de 1 1/2" y no más del 6% del agregado que pasa la malla de 1/4".

Si se emplea dos o más tamaños de agregado grueso, cada uno de ellos, así como la combinación de los mismos, deberá cumplir con los requisitos de granulometría indicados.

Los rangos considerados en las Normas necesariamente son lo suficientemente amplios para permitir acomodar las diferentes condiciones que pueden presentarse. Se deberá considerar que:

- a. Para control de calidad de una condición específica, el productor deberá desarrollar una granulometría promedio para las facilidades y fuente de producción, y controlar la granulometría dentro de una tolerancia razonable con este promedio; y
- b. Cuando se emplea agregado grueso cuyo tamaño corresponde a los números 357 ó 467 de la Norma ASTM C 33, el agregado deberá ser entregado en por los menos dos tamaños separados.

9.4 TAMAÑO MAXIMO

De acuerdo a la Norma NTP 400.037 el tamaño máximo del agregado grueso es el que corresponde al menor tamiz por el que pasa la muestra de agregado grueso.

Granulometrías muy disímiles pueden dar el mismo valor del tamaño máximo del agregado grueso. Ello debe tenerse presente en la selección del agregado, de su granulometría y las proporciones de la mezcla.

9.5 TAMAÑO MAXIMO NOMINAL

De acuerdo a la Norma NTP 400.037 se entiende por tamaño máximo nominal al que corresponde al menor tamiz de la serie utilizada que produce el primer retenido. El tamaño máximo nominal del agregado no deberá ser mayor de:

- a. Un quinto de la menor dimensión entre caras de encofrados; ó
- b. Un tercio del peralte de las losas; ó
- c. Tres cuartos del espacio libre mínimo entre barras o alambres individuales de refuerzo, paquetes de barras, tendones, o ductos de presfuerzo.

En elementos de espesor reducido, o ante la presencia de gran cantidad de armadura, se podrá disminuir el tamaño del agregado grueso siempre que se

mantenga una adecuada trabajabilidad, se cumpla con el asentamiento requerido y se obtenga la resistencia especificada.

Las limitaciones anteriores también pueden ser obviadas si, a criterio de la Supervisión, la trabajabilidad y consistencia del concreto y los procedimientos de compactación son tales que el concreto puede ser colocado sin que se formen vacíos o cangrejeras.

9.6 PARTICULAS PERJUDICIALES

Las partículas perjudiciales presentes en el agregado no deberán exceder de los siguientes valores:

- Arcilla 0.25%
- Partículas Blandas 5.00%
- Material más fino que la Malla Nº 200 3.00%
- Carbón y Lignito:
 - a. Cuando el acabado superficial es de importancia 0.50%
 - b. Otros concretos 1.00%

El agregado cuyos límites de partículas superficiales excedan a los indicados, podrá ser aceptado siempre que un concreto, preparado con agregados de la misma fuente, haya cumplido con los requisitos especificados o, en ausencia de un registro de servicios, tenga características satisfactorias cuando es ensayado en el laboratorio.

Los límites dados deberán aplicarse a las clases de agregado especificadas por el comprador o en otros documentos. Si la clase no es especificada, los requisitos para las clases 3S, 3M, ó 1N deberán ser aplicados en las regiones de severo, moderado y despreciable intemperismo, respectivamente.

9.7 CONDICIONES DE INTEMPERISMO

Para agregado grueso a ser utilizado en concretos expuestos a condiciones de intemperismo, es conveniente consultar un mapa de isotermas del Perú. Si no se dispone del mismo, es conveniente estudiar el comportamiento de estructuras similares ya construídas en la región, los registros de precipitaciones en invierno, así como el número de ciclos de congelación y deshielo que pueden ser esperados, a fin de determinar la posible severidad del intemperismo y establecer los requerimientos de ensayo para el agregado grueso.

Para construcciones ubicadas sobre los 1500 m.s.n.m. deberá considerarse la posibilidad de condiciones de intemperismo severas. En zonas áridas, la severidad del intemperismo puede ser menor que la indicada.

En todos los casos la definición de severidad del intemperismo deberá gobernar. Si existe dudas en la elección de dos valores de severidad del intemperismo, deberá elegirse la condición más desfavorable.

El agregado grueso cuyos resultados excedan los límites indicados podrá ser aceptado siempre que un concreto preparado con agregado similar de la misma fuente haya dado resultados satisfactorios en servicio cuando ha estado expuesto a condiciones similares a las que se espera; o, en ausencia de un registro de servicios demostrable, siempre que el agregado produzca concretos que tengan propiedades relevantes satisfactorias.

9.8 EROSION Y ABRASION

En la mayoría de las normas sobre agregados a nivel internacional se establecen pruebas de desgaste o abrasión, siendo la más generalizada el denominado Ensayo de Los Angeles, el cual fundamentalmente consiste en colocar una muestra de agregado con granulometría especificada en un cilindro rotatorio horizontal, conjuntamente con un número de bolas de acero, aplicando al tambor un número dado de vueltas. El porcentaje de material fragmentado constituye un indicador de calidad.

El Ensayo de Los Angeles está normalizado por el ASTM, existiendo dos métodos de ensayo que corresponden a agregados gruesos mayores de 3/4", que comprenden tamaños hasta de 3"; y para agregados menores de 1 1/2". El ASTM clasifica a estas Normas como C 535 y C 131.

El agregado que va a ser empleado en concretos para pavimentos, pisos o estructuras sometidas a abrasión y/o erosión no deberá tener una pérdida mayor del 50% en el ensayo de abrasión realizado de acuerdo a las Normas ASTM indicadas ó a las Normas NTP 400.019 ó 400.020

9.9. LAVADO DE LAS PARTICULAS

El lavado del agregado se deberá hacer con agua libre de cantidades inconvenientes de materia orgánica, sales o sólidos en suspensión.

9.10. CRITERIOS DE SELECCION

El especificador del agregado deberá designar la clase de agregado grueso a ser empleado en obra, basándose sobre la severidad del intemperismo, la abrasión, y otros factores de exposición. Los límites del agregado grueso que corresponden a cada designación deberán garantizar un comportamiento satisfactorio en el concreto para los respectivos tipos y ubicación de la construcción.

Seleccionar una clase de agregado con límites excesivamente restrictivos puede resultar en costos innecesarios si el material que los reúne no es disponible localmente. Seleccionar una clase de agregado con límites poco restrictivos puede dar por resultado un comportamiento insatisfactorio y deterioro prematuro del concreto.

Aunque el concreto en diferentes partes de la estructura puede ser adecuadamente preparado con diferentes clases de agregado grueso, el proyectista puede desear que el agregado grueso de todo el concreto cumpla con los requisitos más restrictivos a fin de reducir los cambios de comportamiento del concreto en su relación a la mejor clase de agregado, especialmente en proyectos pequeños.

10. HORMIGON

10.1. DEFINICION

El hormigón, conocido también en el Perú como agregado integral, es una mezcla natural, en proporciones arbitrarias, de grava y arena procedentes de río o cantera. Su granulometría deberá estar comprendida entre el material retenido en la malla N° 200 como mínimo y el que pase la malla de 2" como máximo.

10.2. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

En lo que sea aplicable se seguirán para el hormigón las recomendaciones correspondientes a los agregados fino y grueso. Siempre deberá efectuarse un análisis granulométrico a fin de determinar la proporción de agregados fino y grueso presente en el agregado integral. Las características físicas se determinan teniendo en consideración el porcentaje de cada uno de los agregados componentes.

10.3. LIMPIEZA

El hormigón deberá estar libre de cantidades perjudiciales de polvo, terrones, partículas blandas o escamosas, sales, álcalis, materia orgánica, u otras sustancias dañinas para el concreto.

10.4. MANEJO

El hormigón deberá ser manejado, transportado y almacenado de manera tal que se tenga ausencia de contaminación con materiales que podrían reaccionar con el cemento u originar cambios en el comportamiento de la mezcla.

10.5. LIMITACIONES DE EMPLEO

Es recomendable que el hormigón sólo sea empleado en la elaboración de concretos en los que la resistencia a la compresión de diseño, dependiendo de la relación fino-grueso, sea hasta de 175 kg/cm² a los 28 días. El contenido mínimo de cemento portland normal Tipo I será de 255 kg/m³ y el de cemento portland puzolánico Tipo 1P de 300 kg/m³.

En lo pertinente se seguirán para el hormigón las recomendaciones correspondientes a los agregados fino y grueso. Se evitará la contaminación del hormigón con materiales que podrían originar cambios en el comportamiento de la mezcla.

La mayoría de las Normas Internacionales no recomiendan el empleo del hormigón como agregado, e inclusive algunas ni lo mencionan, sin embargo en el Perú se viene empleando para los niveles de resistencia indicados, con resultados muy aceptables.

11. AGREGADO MARGINAL

11.1. CONCEPTO

Debido al agotamiento de las canteras, la disponibilidad de «buenos» agregados, especialmente en áreas urbanas, ha disminuído en años recientes. Ello, unido a los altos costos de transporte, ha incrementado la atención sobre la posibilidad de empleo de los denominados «agregados marginales»

Los agregados marginales son aquellos que no cumplen con los requerimientos de las especificaciones de las Normas y, usualmente, serían rechazados. Sin embargo, un empleo limitado de tales agregados puede ser aceptado si el concreto resultante cumple con todos los requisitos de las especificaciones de obra.

Si la actual tendencia continúa es inevitable que la presión por el empleo de agregados marginales será cada vez mayor. Un empleo aceptable de los mismos depende tanto del criterio del ingeniero como de una adecuada evaluación de su calidad.

Se estima que un estudio permanente de los efectos de las propiedades individuales del agregado sobre el comportamiento del concreto a largo plazo es necesario para elaborar una guía más completa para el usuario.

11.2. EMPLEO DE AGREGADOS MARGINALES

Los concretos están expuestos a ambientes que pueden ser muy diferentes y ello interviene en la determinación de las propiedades del concreto necesarias y pertinentes a ser especificadas.

El empleo de agregados marginales implica la disminución en la severidad de los requisitos exigidos en las especificaciones para los agregados normales. En algunos casos esta decisión puede basarse sobre los requisitos de obra y los resultados de ensayos. En otros, un alto nivel de criterio y conocimientos se requiere, sopesando el efecto potencial de disminuir los requisitos contra el ahorro potencial debido al empleo de estos agregados.

Los agregados que no cumplen con los requisitos de las especificaciones pueden ser empleados en concreto siempre que éstos estén expuestos a condiciones menos severas, o cuando se efectúen modificaciones en las proporciones de la mezcla para compensar por las deficiencias del agregado.

Así, el agregado grueso que no tiene una granulometría estándar puede normalmente ser empleado para preparar concretos satisfactorios mediante ajustes adecuados en el proporcionamiento o un reprocesamiento del material.

El agregado fino que tiene deficiencias en su granulometría puede ser más difícil de emplear en forma satisfactoria. Sin embargo, una arena con granulometría que no es estándar puede a menudo ser utilizada después de verificaciones de las propiedades del concreto en mezclas de prueba.

Una deficiencia de finos en el agregado puede requerir el empleo de cementante adicional, adiciones minerales, aditivos incorporadores de aire, u otros aditivos a fin de proporcionar suficiente trabajabilidad en mezclas con contenido de cemento medio o bajo. En mezclas con alto contenido de cemento, una arena pobre en finos puede ser ventajosa.

Los agregados con problemas de degradación, los cuales afectan los requisitos de agua, deberán poder ser evaluados bajo condiciones similares a aquellas propuestas para ser empleadas en el proyecto. Cambios en el procedimiento de manejo del agregado y minimización de los tiempos de mezclado y agitado durante la producción del concreto pueden reducir la degradación lo suficiente para obtener resultados satisfactorios.

En casos especiales en los que está involucrada la totalidad del conjunto del diseño, éste puede permitir el empleo de agregado marginal. Por ejemplo, un agregado de alta contracción puede ser empleado si se da especial atención al espaciamiento de las juntas y otros parámetros del diseño los cuales son directamente afectados por la contracción del concreto.

El empleo de agregados marginales en el concreto deberá ser decidido en cada caso particular, empleando métodos probados y el criterio adecuado del ingeniero.

11.3. PREPARACION DEL AGREGADO MARGINAL

En algunos casos es posible lograr un agregado aceptable, dentro de determinados límites, gracias a una adecuada preparación. La Tabla 11.3 presenta algunos procedimientos empleados para mejorar la calidad del agregado.

Aunque los procedimientos de mejora pueden ser empleados para manipular diversas propiedades del agregado, en algunas oportunidades ello puede ser impracticable si se lo compara con el costo de traer de mayor distancia un agregado de mejor calidad.

TABLA 11.3

TRATAMIENTO Y OBJETIVOS

Tratamiento	Objetivos
Trituración	Retirar partículas desmenuzables
Separación	Retirar partículas livianas
Flujo de agua	Retirar partículas livianas
Inyección de aire	Retirar partículas livianas
Lavado	Retirar revestimientos y finos
Tamizado	Control de la granulometría
Mezclado	Control de componentes Indeseables.

11.4. ECONOMIA DE LOS AGREGADOS MARGINALES

En aquellas areas en las que los «buenos» agregados no son disponibles o son muy costosos, los agregados marginales quedan ser una alternativa adecuada y económica en algunos tipos de elementos estructurales.

Siempre debe tenerse presente que la asociación de evaluación, tratamiento y riesgo pueden tener un impacto negativo sobre la economía.

Un estudio detallado de costos deberá proporcionar las primeras indicaciones sobre la conveniencia o no de emplear agregados marginales. El costo de transportar agregados de buena calidad puede a menudo ser mayor que el de emplear agregados marginales sometidos a un tratamiento adecuado.

12. AGREGADOS RECICLADOS O PRODUCTOS DE DESECHO.

Se han efectuado estudios para determinar la conveniencia de la utilización de materiales reciclados como agregados para el concreto. Tal uso puede ser deseable tanto desde el punto de vista económico como de protección del ambiente, pero deben tomarse precauciones especiales si se considera la posibilidad de emplear agregados reciclados.

Los desechos de construcción pueden contener cantidades inconvenientes de ladrillo, vidrio, y yeso, cualquier concreto reciclado puede contener agregados reactivos o de pobre calidad o un alto contenido de cloruros.

Los agregados preparados en base a desechos reciclados pueden contener una gran cantidad de propiedades físicas o químicas indeseables. Mezclas de prueba, ensayos continuos y profundos, y registros de comportamiento en obra, son de vital importancia para tomar una decisión sobre la conveniencia o inconveniencia de su empleo. En general, los materiales reciclados deberán ser evaluados como cualquier agregado a ser empleado en concreto.

13. CONTROL DE CALIDAD

13.1. CONCEPTOS GENERALES

Tanto el vendedor así como el contratista tienen la obligación de asegurar la calidad del agregado como parte de un sistema integral de control que permita garantizar que se obtendrán las propiedades que se desean en el concreto.

Las operaciones conducentes a la garantía de calidad incluyen inspecciones de rutina y ensayos de control durante la producción del agregado; así como ensayos de aceptación en la etapa de la compra del agregado.

El propósito principal del control de calidad del agregado es asegurar un material uniforme que cumpla con los requerimientos de las especificaciones de obra durante la producción del concreto.

Si la cantera seleccionada ha sido muestreada y ensayada y el material cumple con los requisitos de las especificaciones de obra, el control de calidad se aplica a aquellas propiedades del agregado que podrían ser afectadas por el procesamiento.

Es recomendable verificar periódicamente otras propiedades tales como composición mineral, contenido de ion cloruro, peso específico, etc., a fin de determinar posibles cambios en la cantera.

Los trabajos de control de calidad deberán incluir la inspección rutinaria de la cantera; de la planta de procesamiento; del sistema de manejo; y del recorrido del agregado hasta la planta dosificadora. Adicionalmente muestreo y ensayos rutinarios de la producción y en diversos puntos del manejo; y ejecución de acciones correctivas si ello es necesario.

Deberán efectuarse, con la frecuencia necesaria, inspecciones y ensayos que permitan efectuar los ajustes que posibiliten las menores variaciones en el producto terminado. Las desviaciones en relación con ensayos previos requieren tomar acciones correctivas inmediatas. Los ensayos de aceptación del agregado se efectuarán en muestras tomadas al azar en los plazos indicados en las especificaciones a fin de confirmar el cumplimiento de éstas.

El transporte del agregado de la cantera a la obra y su manejo deben garantizar que se obtenga degradación, contaminación o segregación mínimas y que el agregado cumpla con las especificaciones de obra al ser empleado. Las muestras deben ser tomadas de acuerdo a lo especificado en la Norma ASTM D 75, debiendo representar la naturaleza y condiciones del material.

Se puede emplear métodos estadísticos para evaluar los resultados de los ensayos. Ello puede proporcionar un valor cuantitativo de la variación en las características del material o del grado de control mantenido, y también puede indicar las tendencias en la información.

13.2. INSPECCION VISUAL RUTINARIA

Las inspecciones visuales rutinarias permiten identificar condiciones que pueden influir en la operación de la planta o la calidad del producto resultante. Deben realizarse diariamente por el supervisor o un especialista en control de calidad.

El personal de la planta de tratamiento del agregado debe ser entrenado para detectar cambios en el material o problemas mecánicos en la planta. Los reportes diarios deben emplearse para documentar aquellos items que requieren modificaciones o cambios operacionales.

En la inspección de la cantera es importante comprobar la contaminación del material; el tamaño de la capa intemperizada; las zonas de roca de pobre calidad; la litología local; los métodos de excavación, dosificación y mezclado de los diferentes estratos.

En la inspección de la planta de producción deberán verificarse los aspectos relacionados con el proceso y con el sistema de manejo del agregado.

13.3. ENSAYOS RUTINARIOS DE CONTROL

Estos ensayos se efectúan para comprobar propiedades del agregado durante el proceso de producción, permitiendo alertar al productor sobre posibles problemas potenciales. Las muestras de agregado grueso son tomadas de la faja que conduce el material a las pilas de almacenamiento. Una cuidadosa remoción del material de una zona de la faja asegurará una muestra representativa. El muestreo se efectuará a intervalos determinados, debiendo combinarse las muestras individuales para obtener la muestra final. Las muestras del agregado fino se obtendrán, preferentemente, de pilas de almacenamiento parcialmente drenadas, empleando un tubo de muestreo insertado en diversas ubicaciones alrededor del cono de la pila.

Las muestras empleadas en los ensayos rutinarios de control de humedad deberán ser tomadas de la balanza de pesado del agregado. Es importante contar con plataformas de trabajo, dispositivos de muestreo, y recipientes adecuados, a fin de garantizar una selección de las muestras representativa del agregado.

13.4. ENSAYOS DE ACEPTACION

Los ensayos de aceptación deberán realizarse sobre muestras representativas seleccionadas al azar, para determinar el cumplimiento de las especificaciones y la aceptación de los agregados. Se podrá aplicar evaluación estadística para mostrar la variabilidad del producto y la bondad del proceso de control.

En el control de la granulometría, característica con más frecuencia evaluada, los ensayos deberían ser efectuados en cada turno de la planta dosificadora del concreto, en muestras tomadas de las tolvas que la abastecen.

Cuando el agregado es adquirido, el comprador deberá solicitar que se efectúen ensayos en una muestra seleccionada del material que está siendo cargado de la pila del productor. A partir de ese momento el comprador asume la responsabilidad por las variaciones en la granulometría que pudieran producirse entre el punto de cargado del material y el momento de su empleo.

Es importante indicar que por muy exacto que sea el proceso de control, los resultados de los ensayos de granulometría pueden variar por lo que el concepto de uniformidad debe considerarse como un criterio relativo.

Las especificaciones de obra deberán incluir tolerancias de aceptación de resultados de ensayos cuyos valores puedan estar fuera de los límites establecidos. Ello debido a que la variabilidad de los datos de los ensayos puede ser inherente al material o debida a fallas en el proceso de control; o puede estar asociada a errores en los procesos de muestreo y ensayo.

13.5. REGISTROS E INFORMES

Los registros de resultados e informes sobre los mismos deberán ser tan simples como sea posible. Se recomienda cartas de control y esquemas sumarios. Debe recordarse que los ensayos de control de calidad del agregado tienen poca importancia salvo que la información sea analizada periódicamente.

El valor promedio y la desviación estándar del porcentaje que pasa un tamaño de Malla especificado deberán determinar la ubicación del valor promedio y el grado de control con relación a los límites indicados en las especificaciones. Ello puede ser efectuado para un período selectivo o acumulativo.

Las cartas de control son importantes para visualizar los datos de manera tal que las variaciones puedan ser efectivamente vistas. Un promedio de cinco a diez ensayos consecutivos permitirá apreciar la tendencia de los resultados, la cual es útil para ajustarlos dentro de determinados valores promedio.

Los conceptos estadísticos también pueden ser aplicados a otros resultados de ensayos de agregados, siempre que las muestras hayan sido tomadas al azar y no sobre una base selectiva.

14. ALMACENAMIENTO DE LOS AGREGADOS

Los agregados en proceso de deterioro o contaminación no deberán ser empleados. En el almacenamiento en obra de agregados de buena calidad deberán tomarse las siguientes precauciones:

- a. Se almacenarán en pilas o silos de manera de impedir la segregación de los mismos, su contaminación con otros materiales, o su mezclado con agregados de características diferentes. Para garantizar que estas condiciones se cumplen deberá realizarse ensayos, en el punto de dosificación, a fin de determinar la conformidad del agregado con los requisitos de las especificaciones.
- b. No se empleará agregados total o parcialmente congelados, debiendo evitarse esta condición durante el almacenamiento.
- c. La zona de almacenamiento deberá ser lo suficientemente extensa y accesible para facilitar su acomodo y traslado al sitio de mezclado. Las pilas de agregado se formarán en capas horizontales o ligeramente ataludadas de no más de un metro de espesor. El agregado se dejará drenar a fin de obtener un contenido de humedad relativamente uniforme antes de su utilización.
- d. Durante la descarga del material para la formación de las pilas, deberá evitarse cualquier procedimiento que permita que éste ruede por los taludes de la pila y segregue.

- e. El equipo pesado deberá mantenerse alejado de las pilas a fin de evitar roturas o contaminación del material.

Es recomendable almacenar el agregado en tolvas, debiéndose tener en consideración lo siguiente:

- a. Las tolvas deben ser metálicas y tener la menor sección horizontal posible. El fondo de las tolvas debe ser ataludado hacia el centro, con ángulos no menores de 50° respecto a la horizontal a fin de facilitar la salida del material.
- b. Las tolvas deberán llenarse con el material cayendo verticalmente; debiendo ser mantenidas tan llenas como sea posible a fin de evitar el fraccionamiento del agregado y reducir la posibilidad de cambios en su granulometría durante el proceso de descarga.

En las áreas de almacenamiento de uso continuo es recomendable:

- a. Construir o habilitar una base compacta, de preferencia de concreto, a fin de evitar la contaminación de la parte inferior de la pila de agregado.
- b. Construir muros separadores. o dejar una distancia adecuada entre pilas de material, a fin de evitar el mezclado de agregados diferentes.

15. MUESTREO DE LOS AGREGADOS

15.1. OBJETO DEL MUESTREO

En el proceso de control de la calidad del concreto la toma de muestras de los agregados constituye una operación de primera importancia. Según su razón de ser y el empleo a dársele al agregado, el muestreo puede efectuarse en el yacimiento, en la planta de tratamiento o en la obra.

Como es conocido por los Contratistas, en trabajos en los que hay carencia de proveedores, se requiere la explotación eventual de yacimientos. En estos casos, para elegir las canteras más adecuadas, determinar la potencia aprovechable y seleccionar los diferentes procedimientos de beneficio, se deben tomar muestras de calicatas extraídas a distancias y profundidades definidas, de acuerdo con el volumen de material requerido.

Si lo que se desea es conocer la calidad de un producto que se ofrece en el mercado se toma la muestra en la planta de producción, tomando la muestra de manera intermitente en tanto se carga el material a los vehículos.

Si las muestras se toman de los silos, serán separadas tomándolas, preferentemente de la parte superior y de la boca de descarga. Si el procedimiento empleado es el de muestreo en obra, a fin de controlar directamente la producción del concreto, las muestras de agregado se tomarán durante la descarga de los vehículos de transporte, en las partes superior, media e inferior de la tolva. El

muestreo de los agregados se efectuará de acuerdo con los métodos que a continuación se señala, excepto si otro procedimiento es indicado en las especificaciones:

- a. El agregado se muestreará de acuerdo a lo indicado en la Norma ASTM D 75 ó a la Norma NTP 400.010
- b. La frecuencia de la toma de muestra se efectuará de acuerdo a lo indicado en las especificaciones del proyecto o lo indicado por la Supervisión.
- c. Las muestras pueden ser tomadas de fajas transportadoras, flujo de agregados, o pilas de almacenamiento, siendo preferibles las dos primeras.
- d. En las muestras tomadas de fajas transportadoras se seleccionará al azar de la unidad que está siendo muestreada tres grupos aproximadamente iguales, los mismos que son combinados para formar una muestra única de tamaño igual o mayor que el mínimo recomendado. La faja transportadora deberá estar parada mientras se toman las muestras.
- e. Cuando la muestra se toma de un chorro de agregado que fluye, ya sea de una tolva o del punto de descarga de la faja, se seleccionan tres incrementos aproximadamente iguales. Cada uno de ellos se toma de la totalidad de la sección transversal del material que está siendo descargado.
- f. En la medida que ello es posible es recomendable no tomar muestras de pilas de agregado, especialmente cuando se prepara una muestra para determinar las propiedades del agregado que dependen de la granulometría de la misma. Si es obligatorio tomar la muestra de la pila debe diseñarse un programa de muestreo para el caso específico bajo consideración.
- g. Las exigencias del muestreo son más amplias cuando se necesita evaluar un yacimiento o dar conformidad al material beneficiado por un proveedor. En la producción diaria del concreto, el número de ensayos que se efectúa es más reducido y de variable periodicidad, la que muchas veces según las modificaciones del material que se observan durante la inspección.
- h. Las pruebas de rutina están destinadas a dar información sobre problemas potenciales en el proceso de control de calidad.

15.2. NUMERO DE MUESTRAS

Cuando se aprecian diferencias sustantivas en los materiales, ya sea en tamaño, textura o color, deberá ensayarse independientemente cada una de las muestras que se obtengan, las que se denominan «muestras representativas simples».

Cuando no se observan diferencias en el material, las muestras simples se mezclan debidamente de manera que representen la condición media del agregado, denominándose «muestra representativa compuesta».

El número de muestras a ser tomadas en obra para su envío al laboratorio dependen de cuán crítica puede ser la variación en las propiedades a ser

evaluadas, siendo recomendable seguir los criterios recomendados por la Norma. La unidad de material representada por una muestra puede variar ampliamente, siendo usualmente de 50 toneladas.

Para su envío al Laboratorio, las muestras representativas pueden reducirse hasta llegar al volumen mínimo adecuado, según los procedimientos de ensayo. La mínima cantidad de la muestra representativa varía con el tamaño máximo nominal del agregado, siendo una recomendación tentativa la siguiente:

TAMAÑO MAXIMO	KILOS
Nº 8	10
Nº 4	10
3/8"	10
1/2"	15
3/4"	25
1"	50
1 1/2"	75
2"	100
2 1/2"	125
3"	150
3 1/2"	175

Las porciones a ser ensayadas son tomadas de la muestra por cuarteo u otro procedimiento adecuado siguiendo lo indicado en la Norma ASTM C 702 «Reducing Field Samples of Aggregate to testing Size».

El recipiente en que se remita la muestra de agregado al laboratorio deberá estar completamente limpio, a fin de evitar contaminación del material y desviación en los resultados. El recipiente deberá ser impermeable para prevenir pérdida de finos o de humedad, o contaminación.

La muestra deberá ser debidamente identificada; incluyéndose clase y procedencia del agregado; cantidad representada por la muestra; ubicación y otras condiciones de muestreo; remitente y razón de ensayo; y clases de ensayos deseadas.

16. ENSAYO DE LOS AGREGADOS

16.1. ASPECTOS GENERALES

La Supervisión podrá ordenar, en cualquier etapa de la ejecución del proyecto, ensayos de certificación de la calidad de cualquiera de la agregados empleados.

Los ensayos normalizados se efectuarán en un laboratorio autorizado o seleccionado por la Supervisión. Los resultados de los ensayos se anotarán en el Registro anexo al Cuaderno de Obra, con copia a la Supervisión. Formarán parte de los documentos entregados al propietario con el Acta de Recepción de Obra.

El agregado se ensayará de acuerdo a lo indicado en la Norma ASTM C 33 y normas complementarias, o en las Normas NTP correspondientes. Las mismas muestras podrán ser empleadas para el análisis granulométrico y para la determinación del material más fino que la Malla Nº 200

Tamaños separados del análisis por tamices podrán ser empleados en la preparación de muestras para los ensayos de abrasión y de estabilidad de volumen. Para la determinación de todos los otros ensayos así como para la evaluación de la reacción álcali-agregados, cuando ello se requiera, se empleará muestras de ensayo independientes.

TABLA

Tamaño Nominal	Porcentajes que pasan por las siguientes mallas							
	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº 4	Nº 8
2"	95-100	-	35-70	-	10-30	-	0.5	-
1 1/2"	100	95-100	-	35-70	-	10-30	0.5	-
1"	-	100	95-100	-	25-60	-	0.1	0.5
3/4"	-	-	100	90-100	-	20-55	0.1	0.5
1/2"	-	-	-	100	90-100	40-70	0.15	0.5
3/8"	-	-	-	-	100	85-100	10-30	0.1

16.2. NORMAS DE ENSAYO

Las Normas a ser utilizadas en los ensayos más usuales son:

- Análisis por tamices para la determinación de la granulometría de los agregados fino y grueso, de acuerdo a ASTM C 136 ó NTP 400.012
- Material más fino que la Malla Nº 200 en el agregado determinado por lavado, de acuerdo a ASTM C 117
- Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino, de acuerdo a ASTM C 40 ó NTP 400.013

- Efectos de las impurezas orgánicas presentes en el agregado fino sobre la resistencia del mortero, de acuerdo a ASTM C 87 ó NTP 400.024
- Estabilidad de volumen del agregado mediante el empleo de sulfato de sodio o sulfato de magnesio, de acuerdo a ASTM C 88 ó NTP 400.016
- Lentes de arcilla y partículas desmenuzables en el agregado, de acuerdo a ASTM C 142 ó NTP 400.015
- Partículas livianas en el agregado, incluído carbón y lignito, de acuerdo a ASTM C 123 ó NTP 400.023
- Peso de la escoria, de acuerdo a ASTM C 29
- Resistencia a la degradación del agregado grueso de tamaño menor o mayor por abrasión o impacto, de acuerdo a ASTM C 131 ó ASTM C 535; ó NTP 400.019 ó NTP 400.020
- Reactividad alcalina potencial de combinaciones cemento-agregado (Método de la barra de mortero) de acuerdo a ASTM C 227
- Reactividad potencial de los agregados (Método Químico) de acuerdo a ASTM C 289
- Cambio potencial de volumen de combinaciones cemento-agregado, de acuerdo a ASTM C 342.
- Reactividad alcalina potencial de rocas carbonatadas a ser empleadas en agregados para concreto, de acuerdo a ASTM C 586
- Horsteno, de acuerdo a ASTM C 123 si se desea identificar partículas con gravedad específica menor de 2.40, y de acuerdo a ASTM C 295 si se desea identificar cuales de las partículas presentes son horsteno.
- Peso unitario y vacíos en el agregado, de acuerdo a ASTM C 29 ó C 29M; ó NTP 400.017
- Peso específico y absorción del agregado grueso de acuerdo a ASTM C 127 ó NTP 400.021
- Peso específico y absorción del agregado fino de acuerdo a ASTM C 128 ó NTP 400.022
- Terminología relacionada con los agregados, de acuerdo a ASTM C 125
- Guía para el examen petrográfico de agregados para el concreto.
- Resistencia del concreto a procesos rápidos de congelación y deshielo, de acuerdo a ASTM C 666
- Equivalente de arena en el agregado fino de acuerdo a ASTM D 2419
- Especificación para tamices a ser empleados en ensayos, de acuerdo a ASTM E 11.
- Dureza del agregado grueso, de acuerdo a ASTM 851

16.3. REACTIVIDAD POTENCIAL

Se han propuesto diferentes métodos para determinar la reactividad potencial del agregado en presencia de álcalis. Ninguno de ellos proporciona información cuantitativa sobre el grado de reactividad a ser esperada o tolerada en servicio.

Por lo tanto, la evaluación de la reactividad potencial de un agregado deberá basarse sobre el criterio y la interpretación de los resultados de ensayos, así como de los resultados del examen de estructuras de concreto las cuales contienen una combinación de los agregados fino y grueso y del cemento a ser empleados en la nueva obra. Los resultados de los ensayos que a continuación se indica pueden ayudar a efectuar la evaluación.

- a. ASTM C 295.- Se conoce que ciertos materiales son reactivos con los álcalis del cemento. Dichos materiales incluyen las siguientes formas de sílice: ópalo, calcedonia, tridimita, y cristobalita; vidrios volcánicos intermedios a ácidos (ricos en sílice) tales como aquellos que pueden presentarse en la riolita, andesita o dacita; ciertas zeolitas tales como la heulandita; y ciertos constituyentes de algunas filitas. La determinación de la presencia y cantidad de dichos materiales por examen petrográfico es útil en la evaluación de la reactividad alcalina potencial. Algunos de estos materiales pueden convertir a un agregado en potencialmente reactivo cuando están presentes en cantidades tan pequeñas como 1% y aún menores.
- b. ASTM C 289.- En este ensayo los agregados representados por puntos que se encuentran a la derecha de la línea de la Figura 2 del Método ASTM C 289 generalmente deberán ser considerados como potencialmente reactivos.
- c. ASTM C 227.- Los resultados de este ensayo, cuando son efectuados empleando un cemento de alto contenido de álcalis, proporcionan información de la posibilidad que ocurran reacciones dañinas. El contenido de álcalis del cemento deberá ser mayor de 0.6% y preferentemente mayor de 0.8%, expresado como óxido de sodio.

Las combinaciones de agregado y cemento las cuales han producido excesivas expansiones en este ensayo generalmente deberán ser consideradas como potencialmente reactivas. Aunque la línea demarcatoria entre combinaciones no reactivas y reactivas no está claramente definida, la expansión se considera excesiva si excede 0.05% en tres meses ó 0.10% en seis meses.

Las expansiones mayores de 0.05% a los tres meses no deberán ser consideradas excesivas si la expansión a los seis meses permanece por debajo del 0.10%. Los resultados de los ensayos de tres meses deberán considerarse únicamente cuando no se dispone de resultados de seis meses.

- d. ASTM C 342.- Este ensayo se utiliza para investigar la expansión potencial de combinaciones cemento-agregado sometidas a variaciones de temperatura y saturación de agua durante el almacenamiento en condiciones prescritas en el ensayo. Este ensayo ha sido encontrado útil

en la selección de agregados del tipo denominado «arena-grava», los cuales generalmente contienen muy poco material grueso; generalmente 5% a 10% retenido sobre la malla N° 4. Las combinaciones cemento-agregado ensayadas por este procedimiento en las que la expansión iguala o excede 0.200% a la edad de un año pueden ser consideradas no satisfactorias para ser empleadas en concretos expuestos a una amplia variación de temperaturas y grados de saturación con agua. El problema puede reducirse mediante el empleo de reemplazo parcial de la combinación «arena-grava» con caliza como agregado grueso.

- e. REACTIVIDAD POTENCIAL DE AGREGADOS CARBONATADOS.- La reacción de la dolomita presente en determinadas rocas carbonatadas con los álcalis del cemento está asociada con la expansión dañina de concretos que contienen tales rocas como agregado grueso.

Las rocas carbonatadas capaces de tal reacción poseen textura y composición características.

1. La característica de la textura es que cristales relativamente grandes de dolomita están esparcidos en una matriz de grano fino de calcita y arcilla.
 2. La característica de la composición es que la porción carbonato consiste de cantidades importantes de dolomita y calcita y que el residuo insoluble en ácido contiene un porcentaje significativo de arcilla. Excepto en áreas determinadas, tales rocas son de ocurrencia relativamente infrecuente lo que permite que una parte significativa del material presente en una cantera pueda ser considerado como conveniente para ser empleado en la preparación de agregado para concreto.
- f. El Método de Ensayo ASTM C 586 ha sido exitosamente empleado en (1) investigación y (2) apreciación preliminar de las canteras para determinar la presencia de materiales que pueden ser potencialmente expansivos cuando son empleados en el concreto.

CAPITULO

05**EFFECTOS DEL AGREGADO
SOBRE LAS PROPIEDADES
DEL CONCRETO**

INSTITUTO DE LA CONSTRUCCIÓN Y GERENCIA

1. INTRODUCCION

Los agregados, los mayores constituyentes de la unidad cúbica de concreto, han dejado de ser el material inerte de relleno al reconocerse, como resultado de profundas investigaciones y experiencia de obra, que ellos son críticos para el comportamiento del concreto.

Además de actuar como un material de relleno de bajo costo, los agregados pueden impartir al concreto determinados beneficios o perjuicios los cuales serán analizados en este trabajo. Una adecuada selección y empleo de los mismos puede dar un concreto de las propiedades requeridas, lo contrario puede resultar en un concreto no satisfactorio.

El importante rol que tienen los agregados en el concreto en muchos casos no es considerado debido a su bajo costo si se lo compara con el del material cementante. El propósito de este trabajo es ayudar al Proyectista y/o Contratista en una adecuada especificación y selección de agregados que permitan al concreto alcanzar las propiedades que de él se desean.

Igualmente tiene por propósito ayudar al usuario en la evaluación de la influencia de las propiedades del agregado sobre el concreto, incluyendo la identificación de aspectos del procesamiento y manejo del agregado que pueden tener influencia sobre la uniformidad y calidad de aquel.

Los tipos de agregados de peso normal indicados en este trabajo están cubiertos en las Normas ASTM ó NTP. Otros tipos de agregados pueden requerir de investigaciones especiales antes de ser empleados.

2. CRITERIOS DE SELECCION

La selección de los agregados deberá basarse en criterios en los que los límites aceptables están basados en el uso a dar a los materiales, las técnicas de ensayo, y las consideraciones económicas.

Un registro de servicios detallado es una ayuda importante en la toma de decisiones, siendo más valioso cuando está referido a estructuras en las que las proporciones de concreto y las condiciones de exposición son similares a aquellas que se espera en obra.

El análisis petrográfico del agregado permite determinar si el de las estructuras existentes y el propuesto para ser empleado son lo suficientemente similares como para hacer útil el registro de servicios disponible. El examen petrográfico de una nueva cantera puede igualmente proporcionar información importante sobre su aceptación para ser empleados en el concreto.

El agregado puede variar en su composición debido a factores geológicos involucrados en la formación, deformación, y composición mineralógica de la cantera. Otras diferencias en la composición del agregado pueden ser debidas a los procedimientos empleados en la trituración, separación por tamaños y limpieza.

Lo indicado puede dar lugar a variaciones importantes en las propiedades físicas y químicas del agregado. Estas diferencias entre agregados procedentes de diferentes canteras, al igual que las variaciones en el agregado de una misma cantera, pueden afectar el comportamiento del concreto al estado fresco.

Las propiedades físicas del agregado que pueden afectar las proporciones y comportamiento de la mezcla fresca incluyen la granulometría, tamaño máximo, perfil y textura superficial, peso unitario, absorción, gravedad específica, y limpieza.

Por ejemplo, si se limita la cantidad de material que pasa la malla de 3/4" (9.5 mm) en el agregado grueso, se mejoran las propiedades del concreto relacionadas con la trabajabilidad, facilidad de bombeo, vibración y acabado. En el agregado fino, la cantidad de material sobre la Malla N° 50 (30 μ m) tiene influencia en el acabado.

La presencia de cantidades excesivas de materia orgánica o sales solubles puede afectar propiedades del concreto al estado fresco tales como el asentamiento, tiempo de fraguado, contenido de aire y demanda de agua.

Aunque el concreto puede variar significativamente en sus propiedades se puede preparar, en la mayoría de los casos, concretos satisfactorios empleando un amplio rango de agregados siempre que una adecuada selección de los materiales y proporciones de mezcla permitan obtener concretos que tengan las propiedades deseadas tanto en el estado fresco como en el endurecido.

Las mezclas de prueba son necesarias para lograr el mejor empleo de los materiales disponibles, a menos que se tenga adecuada información en base a experiencias previas.

3. PROPORCIONES DE LA MEZCLA

La granulometría y perfil del agregado tienen influencia sobre las proporciones necesarias para obtener trabajabilidad adecuada en la mezcla de concreto fresco y, al mismo tiempo, proporcionar al concreto endurecido las propiedades requeridas con una razonable economía.

La cantidad de agua necesaria para obtener la consistencia o trabajabilidad deseadas depende del tamaño máximo del agregado grueso, del perfil y textura

superficial de los agregados fino y grueso, así como de la granulometría de los mismos.

Hay diferencias significativas en los requerimientos de agua de la mezcla empleando agregado fino de diferentes canteras. En mezclas de concreto comparables, las arenas angulares y rugosas requieren mayores volúmenes de agua de mezclado y cemento portland para mantener la relación agua-cemento.

El incremento de la angularidad y rugosidad del agregado grueso puede, igualmente, incrementar los requerimientos de agua y el contenido de mortero de un concreto para una trabajabilidad dada; sin embargo, sus efectos no son tan importantes como el perfil y textura del agregado fino.

Igualmente, si hay partículas de agregado chatas y elongadas presentes pueden hacer al concreto demasiado aspero para determinados procedimientos de colocación, dando por resultado vacíos, cangrejeras, o dificultades en el proceso de bombeo. Se puede considerar que:

- a. El perfil de las partículas de agregado puede ser evaluado visualmente o mediante el empleo de ensayos. En las especificaciones no se indica la forma de evaluación. El examen visual del perfil del agregado y la estimación de sus efectos sobre los requisitos del concreto requieren de experiencia.
- b. Se puede obtener resultados numéricos mediante la clasificación de las partículas por su longitud, espesor y ancho, a fin de llegar a la conclusión de la cantidad de partículas chatas y elongadas presentes.
- c. El examen visual o el procedimiento numérico son los más factibles para el agregado grueso dado que (1) en las partículas chatas la relación del ancho al espesor es mayor que un valor especificado, y (2) una partícula de agregado elongada es aquella en la que la relación de la longitud al ancho es mayor que un valor especificado. Generalmente las partículas chatas y elongadas están relacionadas con el agregado triturado, aunque ellas pueden presentarse en gravas naturales provenientes de lechos de roca muy delgados.

Un procedimiento para evaluar el perfil, redondez y textura de las partículas de agregado implica determinar su velocidad de flujo a través de un orificio o la cantidad de vacíos del material suelto después que ha caído en un recipiente. Los vacíos son calculados a partir del volumen conocido del recipiente y la gravedad específica del agregado.

Ensayos de concretos preparados con arena natural y grava procedentes de fuentes distintas, han permitido encontrar diferencias importantes en los requerimientos de agua y en la resistencia. La demanda de agua correlaciona

bien con los vacíos y el ensayo de flujo a través de un orificio tanto para la arena como para la grava. Para las arenas, con los vacíos al estado suelto variando en un rango del 39% al 50%, la demanda de agua para concretos preparados con una grava controlada puede variar en 30 kg/m³ y la resistencia en compresión variar en 140 kg/cm², habiendo sido las muestras preparadas con un contenido de cemento de cerca de 300 kg/m³.

En los mismos ensayos, para el caso de gravas, los vacíos en el agregado grueso compactado por varillado varían entre 33% a 42%, y la demanda del agua para concreto preparado con arena controlada, varía en cerca de 20 kg/m³. Cuando arenas y gravas de la misma cantera se emplearon juntas, la demanda de agua pudo tener una variación del orden de 45 kg/m³ y la resistencia varió alrededor de 175 kg/m³. Si las mezcla se prepararon para una relación agua-cemento constante, el contenido de cemento tuvo un rango importante, pero las diferencias en la resistencia fueron mucho menores.

Para una arena determinada se puede obtener una demanda de agua mayor que la previsible a partir del contenido de vacíos si ella contiene arcilla en sus fracciones más finas. Igualmente su resistencia es menor que la esperada. Aunque el trabajo experimental se efectuó para arenas y gravas naturales, puede esperarse algún tipo de interrelación cuando se emplea agregado grueso de piedra partida, o una combinación de estos materiales.

La granulometría y el perfil del agregado grueso influyen en la cantidad de mortero necesaria para proporcionar un concreto trabajable.

4. TRABAJABILIDAD

4.1. CONCEPTOS GENERALES

Se define a la trabajabilidad como a la facilidad con la cual una cantidad determinada de materiales puede ser mezclada para formar el concreto; y luego éste puede ser, para condiciones dadas de obra, manipulado, transportado y colocado con un mínimo de trabajo y un máximo de homogeneidad.

El concreto deberá ser lo suficientemente trabajable para que con los encofrados, cantidad y espaciamiento del refuerzo, procedimiento de colocación, y técnicas de consolidación utilizados, se pueda llenar completamente todos los espacios alrededor del refuerzo y permitir que la masa fluya en las esquinas y contra la superficie de los encofrados a fin de lograr una masa homogénea sin una inconveniente separación de los ingredientes, o presencia de aire entrampado, burbujas macroscópicas, o bolsas de agua en el concreto.

La trabajabilidad del concreto está determinada, entre otros factores, por las características, granulometría, y proporción de los agregados fino y grueso, por

cuanto dichos factores regulan la cantidad de agua necesaria para producir un concreto trabajable.

En relación con lo anterior es conveniente recordar que el procedimiento para la selección de las proporciones de la mezcla indicado en la recomendación ACI 211.1 señala que el volumen suelto de agregado grueso estimado para un metro cúbico de concreto depende del peso unitario seco varillado el cual, a su vez, depende de la granulometría y perfil de las partículas de agregado que influyen en el porcentaje de vacíos, y de la gravedad específica de las partículas. Adicionalmente, el factor agregado grueso es dependiente del tamaño máximo de éste y del módulo de fineza del agregado fino.

Así, cuanto más fina es la arena menos cantidad de ella es requerida y más agregado grueso puede ser empleado para una trabajabilidad comparable.

4.2. ACCION DEL AGREGADO FINO

Para que el concreto tenga trabajabilidad adecuada las partículas de agregado grueso deben estar espaciadas de manera tal que puedan moverse con relativa facilidad durante los procesos de mezcla y colocación. Igualmente se conoce que el agregado fino actúa como un lubricante del agregado grueso, ayudando a colocar el material de tamaño mayor uniformemente distribuido en la masa del concreto.

De todos los porcentajes de agregado fino que pueden emplearse en una mezcla con características dadas habrá uno, considerado el óptimo, definido como aquella cantidad de material para la cual resulta el más bajo contenido de agua pero que proporciona la trabajabilidad requerida, con un margen de seguridad adecuado para prevenir dificultades por variación en las condiciones de trabajo o en las características de los materiales.

De lo anterior es evidente que la granulometría del agregado fino tiene influencia sobre la trabajabilidad, siendo deseable que no menos del 10% y de preferencia no menos del 15% de aquel pase el Tamiz N° 50. Igualmente se recomienda para el porcentaje acumulativo que pasa el tamiz N° 100 valores del 2% al 10%.

La Norma ASTM C 33 complementa estos requisitos con el que no más del 45% del agregado fino sea retenido por dos tamaños consecutivos de los tamices N° 100, N° 50, N° 30, N° 16, y N° 8. Igualmente que el modulo de fineza del agregado sea mantenido entre los valores de 2.3 y 3.1

Esta última consideración se basa en el hecho que cuanto menor es el módulo de fineza, dentro de los límites indicados, mayor es el valor lubricante del agregado fino, pudiendose emplear menor cantidad de éste y mayor cantidad de agregado total en la mezcla sin que ésta deje de ser trabajable.

4.3. ACCION DEL AGREGADO GRUESO

En relación con el perfil del agregado grueso, está demostrado que la piedra partida, cuando se la compara con agregado de perfil redondeado, requiere mayor cantidad de agregado fino para compensar el perfil angular de las partículas, en orden a obtener una mezcla comparable en trabajabilidad a aquellas en las que se emplea grava.

Los cambios de angulosidad del agregado tienen un efecto más importante sobre la trabajabilidad que los que pueden presentarse en el espesor de aquel y, en general, un incremento en la angulosidad conduce a una reducción en la trabajabilidad.

El empleo de partículas de perfil chato y alargado obliga, por su mayor área superficial, a diseñar mezclas más ricas en agregado fino y, por tanto, a emplear mayores cantidades de cemento y agua. Si este tipo de partículas se encuentran en el conjunto en un porcentaje moderado, no mayor del 5%, no tienen efecto importante sobre la trabajabilidad.

Altos porcentajes de confitillo, piedra de 3/8" a 3/16", producen un incremento en los vacíos entre las partículas de agregado el cual, si no se modifica la dosificación de la mezcla, da por resultado una importante disminución en la trabajabilidad al ser el mortero insuficiente para llenar el exceso de vacíos y cubrir con pasta la mayor área superficial.

Si bien, aparentemente, no existe una relación entre la textura superficial del agregado y la trabajabilidad del concreto es evidente que, para un mismo contenido de pasta, cuanto menos rugosa sea la superficie del agregado mayor será la facilidad de deslizamiento. Igualmente, la limpieza del agregado, por su menor demanda de agua, ha de favorecer a la trabajabilidad de la mezcla.

Existe relación entre la capacidad de absorción del agregado y la trabajabilidad dado que los agregados altamente porosos, al tomar más agua de la mezcla, tienden a aumentar su consistencia y disminuir su trabajabilidad.

Aunque la trabajabilidad del concreto es función de las características del encofrado que lo va a recibir y del contenido de acero del mismo, es evidente que el agregado juega un papel importante en el logro de ésta.

4.4. OTRAS CONSIDERACIONES

La trabajabilidad requerida depende en gran medida del tipo de construcción así como del equipo que está siendo empleado para conducir y consolidar el concreto. Por ejemplo, la trabajabilidad necesaria para trabajar con encofrados deslizantes es diferente que aquella requerida para colocar el concreto en una

zona de gran congestión de acero o en una viga postensionada.

Un aspecto importante de la trabajabilidad, especialmente si se emplea mezclas de consistencia plástica o fluída, es la tendencia de la mezcla a segregar, con separación de las partículas gruesas de la fase mortero del concreto y la colocación de estas partículas en el perímetro o al pié del concreto colocado.

Las granulometrías discontinuas, las cuales reducen la cantidad de agregado en los tamaños que corresponden a la arena gruesa y en los tamaños menores del agregado grueso (especialmente si partículas de perfil angular están presentes en dichos tamaños), producen mezclas muy trabajables cuando la consolidación es por vibración y el asentamiento no es alto. Si las mezclas preparadas con agregado de granulometría discontinua son fluídas, se puede presentar una tendencia del mortero a separarse del agregado grueso.

En mezclas ricas, el cemento tiende a producir suficiente cohesión, aún si hay insuficiencia de finos en el agregado, pudiendo obtenerse concretos con muy buenas propiedades si se emplea agregados fino y grueso limpios. En concretos pobres, la trabajabilidad puede ser mejorada y la cohesión incrementada con la presencia de arcilla y limo muy finos en el agregado. Especialmente si existe insuficientes finos.

La incorporación de aire, los aditivos, o las adiciones minerales, pueden ser empleadas en la mezcla con la función específica de mejorar la trabajabilidad y cohesión.

La falta de un método de ensayo hace difícil, por no decir imposible, evaluar la trabajabilidad sobre bases objetivas. Usualmente los problemas de trabajabilidad sólo serán aparentes durante un proceso de colocación el cual requiera cambios en los procedimientos o el equipo, o un ajuste en las proporciones de la mezcla, para producir una trabajabilidad acorde con las condiciones imperantes.

5. CONSISTENCIA

5.1. CONSIDERACIONES GENERALES

La consistencia es una propiedad que define la humedad de la mezcla por el grado de fluidez de la misma; entendiéndose por ello que cuanto más húmeda es la mezcla mayor será la facilidad con la que el concreto fluirá durante su colocación.

La consistencia está relacionada pero no es sinónimo de trabajabilidad. Una mezcla trabajable para pavimentos puede tener una alta consistencia que la hace difícil de trabajar en columnas o placas. Inversamente, una mezcla cuya

consistencia la hace adecuada para vigas o columnas puede ser excesivamente trabajable para estructuras masivas.

La consistencia de una mezcla es función de su contenido de agua y de la granulometría y características físicas del agregado, las que determinan la cantidad de agua necesaria para alcanzar una consistencia determinada.

Usualmente la consistencia de una mezcla se define por el grado de asentamiento de la misma. Corresponden los menores asentamientos a las mezclas más secas y los mayores a las consistencias fluídas.

5.2. IMPORTANCIA DEL AGREGADO

Para un mismo contenido de pasta, el empleo de agregados de perfil esférico tiende a disminuir la consistencia. Igualmente, el empleo de partículas de agregado grueso de textura superficial suavizada permite obtener mezclas menos consistentes.

Las partículas recubiertas de polvo, o con costras o incrustaciones superficiales, aumentan la consistencia debido a la mayor demanda de agua con la consiguiente disminución en la trabajabilidad al tomar el agregado agua de la mezcla.

Los agregados secos o altamente porosos pueden aumentar la consistencia, haciendo la mezcla más seca, por reducción en la cantidad de agua disponible para la mezcla.

5.3. IMPORTANCIA DE LA GRANULOMETRIA

Agregados adecuadamente graduados permiten seleccionar proporciones de fino y grueso que den una consistencia adecuada. Algunos criterios a ser considerados en la selección de la granulometría del agregado pueden ser los siguientes:

- a. Desde el punto de vista de la consistencia no existen granulometrías ideales.
- b. El efecto de la granulometría sobre la consistencia no es constante ya que depende de los contenidos de cemento y agua de la mezcla.
- c. La granulometría seleccionada debe dar la consistencia elegida con el menor contenido de agua.
- d. Si la granulometría del agregado se modifica disminuyendo la superficie específica, la consistencia de la mezcla tiende a disminuir.
- e. Si se modifica la granulometría del agregado pero se mantiene la superficie específica, la consistencia no es afectada.

5.4. GRANULOMETRIA DEL AGREGADO FINO

En relación con la granulometría del agregado fino deberá tenerse en consideración lo siguiente:

- a. Las arenas muy finas pueden obligar a incrementar la relación agua-cemento, lo que puede significar consistencias más altas y, a igualdad de éstas, menores resistencias.
- b. El efecto del agregado fino sobre la consistencia es mayor que el del agregado grueso debido a su mayor superficie específica.
- c. En mezclas de alto contenido de material cementante, la cantidad de agregado fino puede reducirse significativamente sin pérdida importante de la consistencia.

5.5. GRANULOMETRIA DEL AGREGADO GRUESO

El efecto de la granulometría del agregado grueso sobre la consistencia es menor que el del fino, debido a su menor superficie específica.

Los requisitos de agua de la mezcla, y por tanto la influencia de aquella sobre la consistencia, tienden a disminuir conforme se incrementa el tamaño máximo nominal del agregado grueso si su granulometría está dentro de las indicadas en la Norma ASTM C 33.

6. SEGREGACION

6.1. CONCEPTO

La segregación es definida como la descomposición mecánica del concreto fresco en sus partes constituyentes cuando el agregado grueso tiende a separarse del mortero.

Esta definición es entendible si se considera que el concreto es una mezcla de materiales de diferentes tamaños y gravedades específicas, por lo que se generan al interior del mismo fuerzas las cuales tienden a separar los materiales componentes cuando la mezcla aún no ha endurecido. El resultado de la acción de estas fuerzas es definido como segregación.

6.2. PAPEL DEL AGREGADO

Bajo determinadas condiciones las partículas más gruesas pueden tender a separarse del mortero, ya sea porque pueden rodar más rápidamente o porque pueden asentarse a mayor velocidad que las partículas más finas.

Una causa de la segregación puede ser el empleo de agregado grueso cuya gravedad específica difiere apreciablemente de la que tiene el agregado fino. Otra puede ser el empleo de agregado grueso cuyo tamaño máximo es grande en relación con las dimensiones del elemento estructural.

Los concretos pesados, los cuales son preparados con agregado grueso de alta densidad, pueden alcanzar pesos unitarios del orden de 4,500 kg/m³. En estos concretos el riesgo de segregación es mayor.

7. EXUDACION

7.1. CONCEPTO

La exudación es definida como la elevación de una parte del agua de la mezcla hacia la superficie, generalmente debido a la sedimentación de los sólidos. El proceso se inicia momentos después que el concreto ha sido colocado y consolidado en los encofrados y continua hasta que se inicia el fraguado de la mezcla, se obtiene máxima consolidación de sólidos, o se produce la ligazón de las partículas.

7.2. PAPEL DEL AGREGADO EN LA EXUDACION

La exudación de la mezcla de concreto está influenciada por las proporciones de la mezcla y por las características de los materiales, contenido de aire, empleo de aditivos y adiciones y, especialmente, por la angularidad y granulometría del agregado fino.

Cuando la exudación es excesiva, debe darse atención a la granulometría y angularidad del agregado fino. El empleo de arenas muy finas, las mezclas de arenas, y un control más cuidadoso son factores que pueden contribuir a la reducción de la exudación. Una forma de controlar la exudación es el empleo de agregado fino adecuadamente graduado, con presencia de los tamaños menores en proporciones adecuadas.

Otra forma de contribuir a controlar la exudación es el empleo de una combinación adecuada de arenas gruesas y finas, a fin de incrementar la superficie específica y disminuir el volumen de exudación.

8. COHESIVIDAD

8.1. CONCEPTO

Se define a la cohesividad como aquella propiedad del concreto fresco gracias a la cual es posible controlar el peligro de segregación durante la etapa de colocación de la mezcla, al mismo tiempo que contribuye a prevenir la aspereza

de la misma y facilitar su manejo durante el proceso de compactación del concreto.

8.2. PAPEL DEL AGREGADO

El efecto del agregado sobre las propiedades cohesivas del concreto depende de factores tales como el tamaño máximo del agregado grueso, la granulometría combinada de los agregados fino y grueso, el porcentaje de agregado fino en relación al agregado total, y la cantidad de partículas de arcilla fina presentes en el agregado.

La falta de cohesividad puede incrementar el riesgo de segregación en mezclas de muy baja trabajabilidad, o en mezclas preparadas con agregado grueso de diámetro grande.

Los incrementos en el porcentaje de agregado fino en la mezcla pueden mejorar la cohesividad. En mezclas muy pobres es importante una adecuada participación en la granulometría de las partículas que corresponden a los tamaños menores. La cohesividad tiende a ser mayor si el perfil de las partículas de agregado grueso tiende a ser redondeado y la textura suavizada.

9. TIEMPO DE FRAGUADO

9.1. INFLUENCIA DEL AGREGADO

El tiempo de fraguado del concreto no es usualmente afectado por el agregado. Sin embargo, la presencia en la superficie de éste de sales solubles o materia orgánica pueden afectar esta propiedad en la medida que ellas pueden actuar como acelerantes o retardadores de fragua.

10. CONTENIDO DE AIRE

10.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Una cantidad significativa de material que pase la malla N° 200 (74 μ m), especialmente en la forma de arcilla, puede reducir el contenido de aire en el concreto y obligar a que se emplee más aditivo incorporador de aire para obtener los mismos resultados.

Esta arcilla puede resultar del empleo de agregados fino y grueso «sucios» y es ampliamente variable, causando problemas en el control del contenido de aire, en las variaciones en los requerimientos de agua, en el asentamiento y en la resistencia.

El incremento de los tamaños menores del N° 100 ó N° 200 en el agregado fino requiere un aumento en el dosaje del aditivo incorporador de aire para obtener

el contenido de aire requerido y producir burbujas pequeñas y un mejor sistema aire-vacíos con un bajo factor de espaciamento. Inversamente, un incremento de material en las mallas N° 30 á N° 50 deberá disminuir la cantidad de aditivo incorporador de aire requerida para obtener el mismo contenido de aire.

La angularidad de la arena no ha mostrado tener un efecto significativo sobre el dosaje de aditivo necesario en contenidos de aire menores del 8%.

La materia orgánica presente en algunos agregados requiere un cambio en el dosaje de los aditivos incorporadores de aire, pudiendo su presencia dar por resultado burbujas de aire grandes y un sistema aire-vacíos desfavorable.

El empleo conjunto de un aditivo reductor de aire con el aditivo incorporador de aire ha sido recomendado, aunque existen grandes dificultades para mantener el contenido de aire deseado. Así los aditivos reductores de aire son especialmente empleados para obtener concretos sin el aire incorporado debido a la presencia de materia orgánica.

11. PESO UNITARIO

Se define como densidad del concreto a la relación del volumen de sólidos al volumen total de una unidad cúbica. Puede también entenderse como el porcentaje de un determinado volumen del concreto que es material sólido.

El peso unitario del concreto es el peso varillado de una muestra representativa del concreto. Se expresa en kilos por metro cúbico.

La gravedad específica y la cantidad de cada agregado deberán afectar el peso unitario resultante de la mezcla fresca. Con agregados de alta porosidad el peso unitario del concreto puede variar dependiendo de si la absorción ha sido satisfecha por prehumedecimiento del agregado antes de la dosificación.

Las variaciones en las propiedades del agregado pueden afectar el peso unitario y la densidad del concreto en forma diferente. Se puede tener modificaciones en el peso unitario del agregado las cuales incrementen o disminuyan el peso unitario del concreto sin afectar la densidad del mismo.

El peso unitario de los concretos livianos, preparados ya sea con agregado grueso natural o artificial de baja gravedad específica puede estar en valores de 480 a 1600 kg/m³. El peso unitario de los concretos pesados, preparados ya sea con agregado grueso natural o artificial de alta gravedad específica, puede elevarse hasta los 5,000 kg/m³.

12. TEMPERATURA DEL CONCRETO

La temperatura del concreto al ser mezclado es influenciada por la temperatura y calor específico de los materiales constituyentes. Por ello, el agregado al estar presente en la mezcla en el volumen más importante, puede tener un efecto sobre la temperatura del concreto.

En climas cálidos el riego de las pilas de agregado reduce la temperatura de éste y por ende la del concreto. En aquellos casos en que es necesario un concreto muy frío, el agregado grueso puede ser enfriado por inmersión en agua fría o por rociado de las pilas de agregado, de acuerdo a la recomendación ACI 305R.

En climas fríos el calentamiento del agregado puede ser necesario para obtener la temperatura deseada en el concreto, de acuerdo a las recomendaciones del ACI 306R. Los agregados congelados no deberán ser empleados en las mezclas de concreto.

13. FACILIDAD DE BOMBEO

El concreto preparado con agregado muy angular o de pobre graduación es más difícil para bombear a causa de la alta fricción interna. El perfil de las partículas de agregado grueso deberá tener un efecto modesto sobre la facilidad de bombeo y la presión en la línea. Las propiedades del agregado fino juegan un papel importante en el proporcionamiento de mezclas bombeables.

Las Especificaciones ACI 211.1 y 304 indican que, para concretos a ser bombeados, la cantidad de agregado grueso puede ser disminuída en un 10%. Ello permite que la relación mortero-agregado grueso se incremente, con lo que se conseguirá una mezcla más trabajable para bombeo desde que es el mortero fluido el medio bombeable en el cual el agregado grueso está suspendido.

En que medida es necesario efectuar correcciones en las proporciones de la mezcla o en la granulometría del agregado depende de las proporciones originales, el empleo de aditivos o adiciones, el diámetro de la línea de bombeo, y las características y condición de la bomba.

El método ACI 211.1 de proporcionamiento de las mezclas de concreto emplea el peso unitario seco varillado del agregado grueso, el cual es afectado por el perfil de las partículas, granulometría, y gravedad específica del agregado grueso. Pesos unitarios secos varillados bajos pueden resultar del empleo de partículas de perfil angular, granulometrías gruesas, o bajo peso específico del agregado.

Empleando el concepto del peso unitario seco varillado se tiene por resultado que se utilizará menos agregado grueso cuando el es angular, requiriéndose una relación mortero-concreto más alta para la misma trabajabilidad.

La recomendación 211.1 del ACI no reconoce diferencias satisfactorias en el perfil de las partículas de agregado fino y su influencia sobre la trabajabilidad y la demanda de agua, aunque considera las diferencias en la granulometría expresadas a través del concepto de módulo de fineza.

Para algunos agregados finos, un control muy estricto de los mismos puede ser necesario para producir un concreto bombeable. Ello puede incluir una mejora en el perfil, incrementar la cantidad de tamaños más finos, emplear mezclas de agregado fino, empleo de contenidos de cemento más altos o su combinación con cenizas u otras puzolanas, a fin de mejorar la trabajabilidad y disminuir la exudación.

Finalmente es conveniente indicar que los concretos con exudación excesiva son más difíciles de bombear y pueden llegar a no ser bombeables si la presión de bombeo separa el agua fuera del concreto.

14. ACABADO DEL CONCRETO

La angularidad y granulometría del agregado, el volumen de exudación, y las proporciones de la mezcla del concreto son factores que pueden influir en el acabado. En aquellos casos en que se presentan problemas en el éste, las propiedades del material y las proporciones de la mezcla deben ser revisadas a fin de determinar que es aquello que se puede hacer para mejorar la situación.

Posibles remedios para mejorar el acabado del concreto incluyen el empleo de fino adicional, el uso de agregados finos combinados, más cemento, más puzolana, el empleo de algunos aditivos, el uso de aire incorporado, ajustes en la granulometría de los agregados fino y/o grueso, o cambios en las proporciones de la mezcla.

Si el problema es de deslizamiento, pueden ayudar aspectos tales como menor contenido de finos en la arena, menor contenido de cemento en la mezcla, menor contenido de puzolana, ajustes en los aditivos, o reducción en el contenido de aire. Si el problema es de exudación excesiva, su reducción puede ser lograda aplicando las recomendaciones ya indicadas. El agua exudada puede ser removida por dragado o cojines de vacío.

Si el problema es ya sea agregado fino o grueso en el rango de 3/8" al N° 8 que deja superficies irregulares cuando el badilejo es pasado sobre el concreto, el volumen de estos tamaños puede ser excesivo.

Igualmente, este problema puede ser atribuido a una gran cantidad de partículas chatas y elongadas en el rango de los tamices de 3/8" al N° 4. La reducción del volumen de estos tamaños o la eliminación de éstas partículas mejora tanto la trabajabilidad como las características de acabado.

15. CONGELACION

15.1. CONCEPTOS GENERALES

La desintegración del concreto por acción alterna de heladas y deshielos, es debida a la congelación y expansión del agua en los poros de la pasta y/o el agregado.

La resistencia del concreto a la acción de las heladas depende principalmente de:

- La calidad de la pasta;
- La naturaleza de los agregados;
- La estabilidad de volumen de los agregados, definida como su habilidad para resistir cambios de volumen cuando están sujetos a procesos de congelación;
- La granulometría del agregado, dado que cuanto mejor es ésta más compacto e impermeable es el concreto;
- La estructura de poros, porosidad y absorción del agregado.

Un concreto que contiene un buen agregado no será resistente a los procesos de congelación si la pasta es de calidad inadecuada. Igualmente, un concreto que tiene una pasta resistente a las heladas puede no ser totalmente resistente a éstas si contiene partículas de agregado no estables cuando están en un estado de saturación crítica.

15.2. ESTADO DE SATURACION CRITICA

Se considera que una partícula de agregado está críticamente saturada cuando hay un número insuficiente de espacios porosos sin llenar para permitir el acomodo de la expansión del agua que acompaña a su proceso de congelación. El agregado que puede absorber agua hasta llegar a estar críticamente saturado es potencialmente vulnerable a los efectos del proceso de congelación.

Para cada velocidad de congelación, hay un tamaño crítico de partículas por encima del cual ellas deberán fallar bajo la acción de ciclos repetidos de congelación y deshielo si están críticamente saturadas.

Este tamaño depende de:

- La estructura de los poros;
- La permeabilidad de las partículas; y
- La resistencia a la tensión de las partículas.

En agregados gruesos de grano fino, con un sistema de poros de textura fina y baja permeabilidad, el tamaño crítico puede estar en el rango de los agregados de tamaño normal.

Para agregados gruesos de grano grueso, con un sistema de poros de textura gruesa o materiales con un sistema capilar interrumpido por numerosos macroporos, el tamaño crítico puede ser tan grande como para no tener consecuencias, aun cuando la absorción pudiera ser alta. En tales casos los esfuerzos de tensión no son lo suficientemente altos como para destruir el concreto.

Si los agregados potencialmente vulnerables están secos cuando se emplean y además están sometidos a un secado periódico en servicio, nunca llegarán a estar críticamente saturados. En este aspecto se debe reconocer la importancia de la incorporación de aire en concretos expuestos a procesos de congelación.

15.3. POROSIDAD DEL AGREGADO

Diversas propiedades relacionadas a la estructura de poros dentro de las partículas de agregado, tales como absorción, porosidad, tamaño y distribución de los poros, o permeabilidad, pueden ser indicadores de problemas potenciales de durabilidad cuando son empleados en concreto el cual puede estar saturado y congelar en servicio.

En general el problema se presenta en partículas de agregado grueso con altos valores de porosidad o absorción, causados principalmente por poros de tamaño medio en el rango de 0.1 a 5 μm , los cuales son más fácilmente saturados y contribuyen al deterioro del concreto.

Los grandes poros presentes en el agregado generalmente no llegan a estar llenos de agua y, por tanto, no presentan daños por congelación. El agua presente en los poros muy finos puede no congelar fácilmente.

15.4. OTROS FACTORES CONTRIBUYENTES

Por su estructura interna, el agregado fino puede estar relacionado con el deterioro del concreto debido a la acción de procesos de congelación. Cuando menor es el porcentaje de absorción del agregado fino, menor su contribución en el proceso destructivo.

La presencia de cantidades importantes de arcilla y finos en el agregado puede disminuir la resistencia y, por lo tanto, la durabilidad, especialmente si se requiere mayor empleo de agua para mantener la trabajabilidad. Los finos que contienen arcilla son más críticos que aquellos provenientes de rocas. El exceso de finos puede disminuir, igualmente, el contenido de aire incorporado al concreto si no se efectúa ajustes en el dosaje del aditivo.

15.5. AFLORAMIENTO

Cuando el conjunto del agregado contiene pocas partículas con características desfavorables en su sistema capilar, la congelación puede producir, en vez de una desintegración general, el fenómeno conocido como afloramiento, en el que las partículas de agregado grueso cercanas a la superficie desprenden, al expandirse, la capa superficial de mortero dejando oquedades sobre la superficie del elemento estructural.

15.6. AMPOLLADURAS

Las ampolladuras se caracterizan por la rotura de una pequeña porción de la superficie del concreto debido a presión interna, produciendo una elevación típica de forma cónica en la superficie de éste sobre la partícula de agregado. Estas ampolladuras pueden desarrollarse sobre cualquier superficie expuesta directamente a la humedad y a ciclos de congelación y deshielo. Los esquistos de bajo peso específico, las calizas que contienen arcilla y los materiales pizarrosos presentan este comportamiento.

Ampolladuras ocasionales pueden no justificar el rechazo del elemento estructural. Debe recordarse que las ampolladuras pueden igualmente ocurrir debido a la reacción álcali-sílice.

15.7. AGRIETAMIENTO D

Los daños que son debidos a la acción del proceso de congelación y deshielo en partículas de agregado críticamente saturadas se manifiestan, usualmente, por desintegración general, afloramientos, ampolladuras, o el fenómeno conocido como agrietamiento D.

El agrietamiento D ocurre en losas sobre el suelo expuestas a humedad y congelación, especialmente en pavimentos y pistas de aeropuerto. En estos casos se manifiesta en forma de grietas muy finas espaciadas muy próximas y paralelas a las juntas, así como a lo largo de grietas abiertas y en las esquinas libres de las losas de pavimentos.

En general, el deterioro se inicia en la parte inferior de la losa en el que es más fácilmente alcanzada la saturación crítica de las partículas inconvenientes de agregado. Cuando las grietas D son observadas en la superficie el deterioro en la parte inferior de la losa ya está bien avanzado.

Casi todas las ocurrencias de agrietamiento D están asociadas con rocas sedimentarias, incluyendo calizas, dolomitas, esquistos y areniscas. Puede ocurrir que las partículas que causan ampolladuras también causen agrieta-

miento D cuando están presentes en grandes cantidades, pero las partículas que causan agrietamiento D no necesariamente causan ampolladuras.

En ambos casos, la reducción del tamaño de las partículas es un procedimiento efectivo de disminución del problema, y los ensayos de congelación y deshielo del concreto que contiene el agregado grueso en estudio permiten detectar e identificar muchos agregados potencialmente no durables bajo la acción de procesos de congelación.

15.8. ENSAYOS DE DETERMINACION

El examen petrográfico del agregado permite identificar los tipos de partículas presentes que pueden romperse en un proceso de congelación y deshielo. El conocimiento del porcentaje de material que está por encima del tamaño crítico previamente determinado como capaz de producir daños por congelación y deshielo es útil, especialmente cuando la apariencia es importante.

Los resultados de ensayos de congelación y deshielo en el agregado grueso presente en el concreto, pueden ser empleados para un estudio comparativo de los resultados. Estos pueden variar entre laboratorios, e igualmente el comportamiento del agregado verse afectado por el grado de saturación de los agregados antes de su incorporación en el concreto, el tipo y tiempo de curado de éste antes del proceso de congelación, y si el concreto es mantenido en condición saturada durante los ciclos de congelación.

El Método de la Norma ASTM C 666 y el Procedimiento CRD-C-114 del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, trabajan con equipos automáticos de congelación y deshielo en los que los especímenes de concreto son sometidos a un número determinado de ciclos por día. El comportamiento del concreto es evaluado por cambios de peso, disminución en el módulo de elasticidad dinámico, incremento en la longitud, como indicadores de daño. Un factor de durabilidad es computado del módulo de elasticidad dinámico relativo y los resultados de los ensayos comparados con los valores iniciales antes de la congelación.

El Método de la Norma ASTM C 682 implica la evaluación del agregado en el concreto mediante el empleo de un largo período de humedecimiento seguido de un corto ciclo de congelación. Se considera que ha ocurrido daño cuando una dilatación o incremento de la longitud es apreciado por encima de aquel que es normal en contracción cuando el concreto es enfriado por congelación. El denominado «período de inmunidad a la congelación» es el número de semanas de humedecimiento necesarias para permitir que ocurra la dilatación crítica.

Se ha desarrollado un importante número de ensayos sobre agregados no

confinados, con la intención de establecer criterios sobre estabilidad de volumen, resistencia a la congelación y deshielo, e indicación general de calidad. Estos métodos no son tan adecuados para una buena correlación con el comportamiento en obra frente a los procesos de congelación y deshielo como aquellos en los que se emplea el agregado en el concreto. Dos de estos métodos son el ASTM C 88 en el cual se emplea ciclos de humedecimiento y secado al horno utilizando una solución de sulfato de sodio o magnesio; y el Método AASHTO T 103, en el que un conjunto de partículas de agregado son sometidas a un ensayo de congelación y deshielo.

En muchos casos los resultados de los ensayos no confinados son empleados como un índice de calidad, pero los límites pueden no ser adecuados si el registro de servicios indica que la cantera de abastecimiento es conforme, o si tienen un buen comportamiento en ensayos de congelación y deshielo en el concreto efectuados bajo cuidadoso control de laboratorio.

La medida del residuo insoluble y del índice de poros IOWA pueden igualmente ser de ayuda en el caso de algunos tipos de agregados arcillosos carbonatados.

Como conclusión existe acuerdo en que ninguno de los Métodos de Ensayo propuesto puede ser aplicado en todos los casos. Igualmente no existe una total correlación entre los resultados de laboratorio y los de obra, debiéndose los resultados ser tomados como una guía de trabajo en obra y no como determinantes para aceptar o rechazar un agregado.

16. HUMEDECIMIENTO Y SECADO

La influencia del agregado sobre la durabilidad del concreto sometido a procesos de humedecimiento y secado está controlada por el sistema de poros de aquel. El esponjamiento diferencial, acompañado de la ganancia de humedad de partículas de agregado con gran absorción capilar y un sistema de poros de textura fina, puede ser suficiente para causar daños en la pasta que lo rodea, dando por resultado el desarrollo de ampolladuras.

El esfuerzo desarrollado en el proceso de humedecimiento y secado es proporcional al módulo de elasticidad del agregado, pudiendo éste ser un factor que contribuya al desarrollo de ampolladuras.

La arcilla presente en el agregado, la cual puede ser detectada mediante el ensayo ASTM C 42, es debilitada por el humedecimiento y puede degradar debido a procesos repetidos de humedecimiento y secado.

17. CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO

Los procesos de calentamiento y enfriamiento inducen esfuerzos en cualquier material no homogéneo. Si el rango de variación de la temperatura es grande puede dar por resultado daños importantes. En general se considera que para los agregados comúnmente empleados y los cambios en la temperatura ambiente usuales, dicha acción de calentamiento no debería ser un factor crítico en el concreto.

Sin embargo, grandes diferencias en los valores del coeficiente de expansión térmica o de difusividad térmica, entre la pasta y el agregado, pueden dar esfuerzos dañinos en concretos sometidos a cambios de temperatura normales.

Es importante recordar, en el análisis de las posibles causas de daño, que al interpretar los resultados de los ensayos y las observaciones de obra, es difícil separar los efectos térmicos de otros tales como los debidos a cambios de humedad.

Aunque la práctica usual es no limitar el coeficiente de expansión del agregado para condiciones de exposición normales, aquellos casos en que el agregado puede tener coeficientes extremadamente altos o bajos pueden requerir de estudio antes de ser empleados en determinados tipos de estructuras.

Usualmente los concretos en cuya preparación se ha utilizado agregados con un bajo módulo de elasticidad resistirán los esfuerzos debidos a cambios de temperatura mejores que aquellos agregados con un alto módulo de elasticidad.

18. ACCION DEL FUEGO

El tipo de agregado tiene influencia importante sobre la resistencia al fuego de las estructuras de concreto, siendo los más recomendables aquellos que han estado sometidos a la acción del calor durante su formación.

La falla del concreto debida a la acción del fuego es debida, entre otras razones, a la acción opuesta entre la pasta, la cual tiende a contraerse debido a la pérdida de humedad, y el agregado el cual, de acuerdo a su composición mineralógica, se expande con el incremento de temperatura. Esta doble acción origina agrietamiento y descascaramiento, con la subsecuente exposición del acero de refuerzo a la acción del fuego.

Los concretos comprendidos dentro de los preparados con agregados normalmente empleados en obra, muestran pequeñas diferencias en su resistencia al fuego cuando ellos están secos. Los estudios de laboratorio y obra han demostrado que aquellos concretos preparados utilizando agregados livianos tienen una mejor resistencia al fuego que los preparados con agregado de peso normal.

Se ha apreciado una mayor resistencia a la acción del fuego, cuando se utiliza como agregado grueso escorias de alto horno, agregados calcareos, o agregados de origen ígneo, los cuales se comportan mejor que los agregados silíceos de origen sedimentario o metamórfico. Ello se debe a que los materiales más livianos reducen la conductividad térmica del concreto aislandolo mejor de la fuente de calor. Igualmente, las escorias de alto horno son más resistentes al fuego debido a que son livianas y tienen estabilidad mineral en altas temperaturas.

Los agregados carbonatados son generalmente más resistentes al fuego que determinados agregados silíceos. La dolomita calcina entre 600 y 700 C y la calcita presente en las calizas a 900C en una atmósfera al 100% de bióxido de carbono. Los agregados que contienen cuarzo, tales como el granito, las gravas silíceas, la arenisca, y la cuarzita, son más susceptibles a daños por el fuego. A aproximadamente 570C el cuarzo experimenta una súbida expansión de 0.85% debida a la transformación del cuarzo alfa en cuarzo beta. Esta expansión da lugar a que el concreto se astille y pierda resistencia.

Es importante indicar que conforme se forma la capa calcinada, ella aísla al concreto de la fuente de calor y reduce la velocidad con la cual el interior del concreto podría calentarse.

19. PROPIEDADES TERMICAS

Durante mucho tiempo los investigadores han sostenido que las propiedades térmicas del concreto y sus ingredientes parecen tener alguna relación no bien definida sobre la durabilidad del concreto, dado que podrían desarrollarse esfuerzos internos peligrosos cuando el cambio en el volumen de los agregados, debido a variaciones de temperatura, es sustancialmente diferente del de la pasta, o cuando existen grandes diferencias en el coeficiente de expansión entre las partículas de agregado.

Se han efectuado estudios de concretos y morteros sujetos a cambios lentos y rápidos de temperatura en agua y aire, empleando diferentes tipos de agregados y proporciones de mezcla. Los agregados se seleccionaron de manera de proporcionar un amplio margen en los coeficientes térmicos, y preparando mezclas para concretos con y sin aire incorporado. Se ha podido establecer lo siguiente:

- a. Los cambios rápidos de temperatura no son mucho más destructivos que los cambios lentos. La diferencia de cambios de volumen entre los ingredientes debido a acción térmica no es la causa principal de desintegración.
- b. La resistencia del concreto a los cambios de temperatura parece estar más directamente relacionada al coeficiente térmico del concreto en sí mismo que a las diferencias entre los coeficientes térmicos de los

- ingredientes, fallando con mayor rapidez los concretos de mayor coeficiente térmico.
- c. El deterioro del concreto durante los cambios de temperatura parece deberse a deformaciones resultantes de diferencias de temperatura dentro de la masa, más que a diferencias en el coeficiente térmico.
 - d. Los agregados gruesos que tienen coeficientes térmicos diferentes del mortero en el cual están embebidos causan cambios en el coeficiente térmico de éste aproximadamente en proporción al volumen de agregado grueso empleado. Igualmente, el agregado fino afecta el coeficiente térmico del mortero en proporción a su volumen en la mezcla.

20. ABRASION

La resistencia del concreto a la abrasión y/o al impacto localizados es una propiedad que depende en gran medida de la calidad de la pasta y del agregado que está cerca de la superficie recibiendo impactos localizados y esfuerzos abrasivos.

En aquellos casos en los que la capa de desgaste no es grande, la presencia de un agregado fino duro y resistente en una pasta de buena calidad puede ser necesaria para proporcionar a la superficie la dureza necesaria. Ejemplo de ello son los pisos industriales en los que la exposición del agregado no es conveniente, determinadas estructuras hidráulicas en las que la cavitación es un factor a ser considerado, y los pavimentos.

La dureza del agregado es necesaria para resistir rayaduras, desgaste y tipos de pulido por fricción en servicio dado que es la más importante característica individual que controla el desgaste de los agregados.

Las Normas ASTM C 131 ó C 535, ésta última para agregados mayores de 1 1/2", generalmente conocidas como Normas para El Ensayo de Los Angeles, son empleadas como un ensayo de calidad para determinar la resistencia a la abrasión, al impacto, o la capacidad de molienda del agregado grueso. El ensayo implica impacto y tiende a romper agregados duros y frágiles, los cuales generalmente no romperían en servicio.

Es conocido que no hay una buena correlación entre el desgaste en el Ensayo de Los Angeles y el del concreto en servicio. Este ensayo puede proporcionar un medio de identificación de materiales obviamente inferiores los cuales tienden a degradar el agregado durante la producción, en el manejo, o ya en servicio.

Debe tenerse presente que en el ensayo de Los Angeles un bajo valor, puede no garantizar una buena resistencia a la abrasión de la superficie del concreto. Inversamente, un alto valor en los resultados del ensayo de Los Angeles puede no ser un indicio de una buena resistencia a la abrasión del concreto.

Para concretos en los que la resistencia a la abrasión es importante, los ensayos de abrasión de los concretos que contienen el agregado propuesto deberán ser efectuados por un procedimiento de ensayo adecuado. Los métodos ASTM C 418, C 779, y C 994 proporcionan un conjunto de procedimientos para determinar el grado de abrasión en el concreto seco; y el Método CRD-C 63 proporciona un método de ensayo a ser empleado para concretos ser utilizados debajo del agua.

21. MATERIALES INCONVENIENTES

El agregado no debe contener materiales que puedan hacerlo descomponerse o cambiar de volumen cuando está expuesto a la acción del intemperismo. Entre dichos materiales se encuentran el carbón, la piritita y las lentes de arcilla.

La presencia de partículas de carbón en el agregado reduce la resistencia del concreto a la acción destructiva de las heladas.

Las arcillas están sujetas a procesos de dilatación y contracción por absorción y deshidratación, y cuando ellas están presentes como elementos constituyentes de las rocas, como en el caso de las calizas, esta capacidad de absorción incrementa la susceptibilidad de la roca a la desintegración por acción del intemperismo.

Las partículas que, en general, se consideran peligrosas para el agregado grueso son las partículas blandas, las delgadas y desmenuzables, los esquistos, las arcillas esquistas, las pizarras, las areniscas y calizas arcillosas, el horsteno poroso y deteriorado, las partículas recubiertas, las partículas laminadas, el carbón y el lignito, etc.

Todas las partículas mencionadas en el acápite anterior pueden atacar al concreto en dos formas diferentes, por fallas bajo pequeños cambios de volumen, y por expansión considerable con la subsecuente fuerza destructora.

Igualmente, el agregado es contaminado por la presencia de limo, arcilla, mica, carbón, humus y otras materias orgánicas, todas y cada una de las cuales pueden incrementar los requisitos de agua, facilitar la disolución física, volver al agregado susceptible a la acción del intemperismo, inhibir el desarrollo de adherencia máxima entre el cemento hidratado y el agregado, o reaccionar químicamente con los ingredientes del cemento.

Las fracciones extremadamente finas presentes en el agregado, que pasan el Tamiz N° 200, son comunmente clasificadas como «limo» o «arcilla y limo» y no deben ser permitidas, de acuerdo a las recomendaciones de la Norma ASTM C 33, en porcentajes mayores del 3% al 5%. Esta limitación es debida a su tenden-

cia a incrementar los requisitos de agua de la mezcla, con lo que contribuye a disminuir la resistencia y durabilidad.

En relación con lo indicado en el acápite anterior, se consideran como una excepción determinados materiales finamente granulados incluyendo las microsílices, las cenizas, las escorias de alto horno finamente granuladas, las puzolanas, la piedra pómez, y la tierra de diatomeas. Todas ellas algunas veces son empleadas, finamente molidas como adiciones minerales dado que pueden incrementar la trabajabilidad, resistencia y durabilidad del concreto a través de su acción puzolánica.

Debe considerarse aquellas partículas que se expanden causando destrucción del concreto. Ellas incluyen principalmente calizas, arcillas expansivas y horsteno poroso. Tales materiales, cuando se congelan en condición saturada o, en algunos casos, simplemente cuando están expuestos al agua, incrementan en volumen con el desarrollo de presiones suficientes como para causar destrucción del concreto.

Otra categoría de sustancias incluye partículas tales como areniscas blandas, ocre y lentes de arcilla. Su contribución a la destrucción del concreto resulta de la incapacidad de las partículas para mantener su integridad. Dependiendo del porcentaje con que están presentes en el agregado, el deterioro puede ser general o, mas a menudo, el daño puede evidenciarse inicialmente por descascaramiento superficial del concreto.

Otras partículas dañinas son las muy blandas entre las que se encuentran los lentes de arcilla, esquistos, carbón y lignito. En las pequeñas cantidades en las que generalmente se presentan pueden no tener efecto fundamental sobre la durabilidad, pero atentan contra la apariencia por descascaramiento superficial.

22. ATAQUE POR ACIDOS Y SALES

22.1. ATAQUE POR ACIDOS

En general la resistencia al ataque por ácidos está más íntimamente relacionada con la pasta que con el agregado. Sin embargo, en determinados casos, pueden requerirse agregados resistentes a los ácidos.

Entre las sustancias que actúan sobre los agregados se encuentran los ácidos libres, o las aguas con ácidos libres. Estos ácidos disuelven los carbonatos presentes en el agregado.

Los agregados silicosos (granito, cuarzita, etc) son en general resistentes al ataque por ácidos. Lo contrario se produce con los agregados carbonatados (calizas y dolomitas) los cuales, bajo determinadas condiciones, reaccionan con los ácidos.

La pasta reacciona igualmente con los ácidos y, bajo condiciones de acidez media, un concreto preparado con agregados carbonatados es más tolerante a los ácidos que cuando es preparado con agregados silicosos. Bajo estas condiciones, el efecto de sacrificio de los concretos preparados con agregados carbonatados puede ser extendido a la vida del concreto.

En aquellos casos en que el concreto está expuesto en forma rutinaria a un medio ácido severo, puede emplearse un revestimiento de protección adecuado, o requerirse un concreto preparado con cemento especial y agregados resistentes a los ácidos.

Algunos sulfitos, tales como el sulfito de hierro, la pirita y la marcasita, se oxidan por acción del ataque atmosférico, produciéndose herrumbre y pérdida de adherencia del mineral afectado. Tales reacciones pueden generar ácidos y dar origen a reacciones que resulten en incrementos de volumen.

22.2. ATAQUE POR SALES

Sales químicas, tales como sulfatos, cloruros, carbonatos, fosfatos, nitratos, pueden presentarse en los agregados en gran variedad de formas. Algunas de ellas reaccionan químicamente impidiendo o modificando el proceso normal de fragua del cemento.

Otras de las sales que pueden estar presentes son indeseables debido a su baja resistencia o a que tienden a disolverse, o por que pueden, si están finamente pulverizadas, aumentar el porcentaje indeseable de polvo en el agregado.

La presencia de tales sales también puede contribuir a incrementar la exudación de la mezcla, o la eflorescencia de las mismas hacia la superficie del concreto deteriorando la apariencia del mismo.

23. REACCION ALCALI-AGREGADO

23.1. ASPECTOS GENERALES

A partir de 1940 se comenzó a asociar las expansiones excesivas que causaban deterioro prematuro del concreto con las reacciones químicas entre los óxidos de sodio y potasio, presentes en forma de álcalis en el cemento, y determinados elementos minerales presentes en algunos agregados.

Los estudios permitieron determinar, el mecanismo fundamental de la reacción álcali-agregados que parecía estar asociado con la formación de unidades de expansión por hinchazón osmótica del gel sílice, la misma que era producida por interacción química de rocas silíceas con los álcalis liberados por hidratación del cemento.

Dichas unidades de expansión ejercen presión cuando el concreto está húmedo, pero muy raras veces originan rajaduras cuando el concreto se seca, aparentemente debido a que éste tiene una adecuada resistencia en compresión pero muy baja en tensión.

Dicha expansión, producida por reacción química álcali-agregados, origina deterioros que se caracterizan por grandes expansiones internas; rotura, generalmente de forma indefinida y de gran tamaño; exudaciones gelatinosas y depósitos amorfos blanquecinos en la superficie y dentro de la masa de concreto, especialmente en los vacíos y zonas adyacentes a partículas de agregado deterioradas así como en zonas periféricas de reactividad, alteración o infiltración en las partículas de agregado.

Entre las sustancias reactivas más conocidas se encuentran los silicatos minerales, el ópalo, la calcedonia, la tridimita, la cristobalita, la zeolita, la heulandita, la riolita vitrea, la dacita, la andesita, el bióxido de silicio, así como las rocas volcánicas de medio y alto contenido de sílice.

Algunos laboratorios opinan que alguna otra reacción, generalmente mencionada como reacción cemento-agregado, parecía ser la responsable del agrietamiento que aparecía en los concretos preparados con determinados agregados, mezcla de arena y grava. Esta opinión se basa en el hecho que aparentemente, en algunos casos, no existe una correlación satisfactoria entre el bajo contenido de álcalis del cemento y la expansión y rotura que se presentan en las estructuras de concreto. Una explicación es que una reacción álcali-agregado inicial es el punto de partida de un proceso que permite al óxido de magnesio presente en el cemento producir en el concreto una expansión excesiva.

Otra explicación sugiere que las unidades de expansión que se originan por la reacción álcali-agregado, cuando se presentan en concretos preparados con cemento de bajo contenido de álcalis, pueden no ser suficientes para producir expansión, pero ellas ejercen suficiente presión en el secado como para producir minúsculas grietas en la pasta. Tales grietas permiten al agua llegar fácilmente a los granos de periclase - óxido de magnesio en forma nativa - cuando el concreto está húmedo, reaccionando ésta con el agua y produciendo expansión y rotura del concreto.

Es evidente que en este mecanismo la única reacción cemento-agregado es la reacción álcali-ágregado, y aunque la periclase es la causante de la expansión y rotura del concreto es indudable que dicha reacción no se produciría sin la presencia de minúsculas grietas en la pasta, las cuales son originadas por la reacción álcali-agregado.

23.2. AGREGADOS REACTIVOS

El empleo de algunos agregados puede dar por resultado un proceso químico en el cual determinados constituyentes del agregado pueden reaccionar con los álcalis del cemento. Se acepta que todos los agregados son reactivos, en algún grado, cuando son empleados en concretos, y algunas evidencias de reacción han sido identificadas petrográficamente en muchos concretos que tienen un comportamiento satisfactorio. Por ello, sólo cuando los productos de la reacción son lo suficientemente importantes para causar expansión y agrietamiento del concreto, se considera que la reacción es peligrosa.

La condición de humedad y el rango de temperaturas del concreto en servicio pueden influir en la reactividad y sus efectos. En la mayoría de los casos no es necesario considerar que el agregado es reactivo si este tiene un registro de servicios satisfactorio.

Las tres principales reacciones dañinas entre los agregados y los álcalis del cemento que hasta la fecha se han identificado como que pueden dar expansión anormal del concreto a la cual se asocian agrietamiento, ampolladuras o pérdida de resistencia son:

- Reacción álcali-sílice
- Reacción cemento-agregado
- Reacción álcali-carbonatos.

23.3. REACCION ALCALI-SILICE

El deterioro del concreto debido a la reacción expansiva entre los constituyentes silíceos de algunos agregados y los óxidos de sodio y potasio del cemento se ha presentado en algunas localidades de los Estados Unidos, no habiendo un registro debidamente comprobado en el Perú.

Las manifestaciones típicas del deterioro del concreto debido a esta reacción son expansión; agrietamiento; exudación del gel producto de la reacción álcali-sílice a través de las grietas, con formación de una jalea o costras duras sobre la superficie; anillos de reacción sobre las partículas de agregado en el interior del concreto y, ocasionalmente, ampolladuras. Algunas de estas manifestaciones también pueden ocurrir por otras causas tales como el ataque por sulfatos. Deberá emplearse la identificación petrográfica para determinar las causas de la reacción.

El material potencialmente reactivo presente en las rocas incluye el ópalo, la calcedonia, el cuarzo microcristalino o criptocristalino, el cuarzo cristalino inténsamente fracturado o esforzado, y los vidrios de latita o andesita, o los productos de desvitrificación de estos vidrios. Todos estos materiales son altamente silíceos.

Algunos de los tipos de rocas que pueden contener minerales identificados como potencialmente reactivos son el horsteno, las calizas y dolomitas silicosas, las areniscas, las cuarzitas, las riolitas, las dacitas, las andesitas, los esquistos y las filitas. Sin embargo, estos tipos de rocas no necesariamente tienen alguno de los minerales reactivos.

Los principales factores que gobierna la reactividad expansiva de los agregados son:

1. La naturaleza, cantidad y tamaño de las partículas de material reactivo, y
2. La cantidad de álcalis solubles y agua disponible.

La forma más práctica para evitar la expansión del concreto resultante de la reacción álcali-sílice es evitar el empleo de agregados reactivos. Algunas veces ello no es posible. Cuando este agregado debe ser empleado, ello deberá hacerse únicamente después de ensayos que determinen su grado de reactividad. Debe recordarse que la condición de humedad y el rango de temperatura del concreto en servicio pueden influir en la reactividad.

Hasta donde es conocido, se pueden establecer límites adecuados al contenido de álcalis del cemento, se puede considerar el empleo de una puzolana efectiva, o emplear ambas alternativas para reducir la reacción potencial, tal como está detallado en el Capítulo 5 del ACI 201.2R.

La evaluación de los agregados para determinar el daño potencial debido a la reacción álcali-sílice requiere de un juicio adecuado basado en el registro de servicios de la fuente de abastecimiento del agregado, y el posible empleo de algún procedimiento de laboratorio.

Entre los procedimientos de laboratorio se recomienda el ASTM C 295 para el examen petrográfico; el ASTM C 227 para medir la expansión de barras de mortero preparadas con el agregado y cemento a ser empleados, y el método del análisis químico de acuerdo a ASTM C 289.

En algunos casos, uno o más de los ensayos pueden indicar reactividad potencial, pero si la fuente de abastecimientos tiene un buen registro de servicios por un largo período en condiciones ambientales similares, y si el agregado en tales concretos es petrográficamente similar al agregado bajo evaluación, él puede ser empleado si se utiliza con cemento de bajo contenido de álcalis.

El empleo de determinadas puzolanas, cementos combinados, o cemento de escorias, puede ser suficiente para eliminar el riesgo de reacción álcali-agregado peligrosa, pudiendo determinarse la posibilidad de reacción empleando el método descrito en ASTM C 441.

Es importante recordar, que hasta la fecha este tipo de reacción no ha sido detectada en el Perú, sin que ello signifique que no deban realizarse los estudios

pertinentes si el cemento sobrepasa los límites de álcalis indicados en las especificaciones.

23.4. REACCION CEMENTO-AGREGADO

La reacción cemento-agregado es el nombre que se da a una reacción álcali-sílice especial en aquellos casos en que ésta se presenta aún cuando se emplee un cemento de bajo contenido de álcalis. Este es un tipo de reacción en el que el movimiento de humedad y secado posterior pueden originar una concentración de álcalis en área localizadas del concreto.

Agregados integrales compuestos de arena-grava, los cuales se presentan en los Estados Unidos en el sistema de los ríos de los Estados de Kansas, Nebraska, Iowa, Missouri y Wyoming, están involucrados en deterioro del concreto atribuido a este tipo de reacción que en el Perú no ha sido detectada.

Los agregados a menudo no tienen constituyentes similares y presentan diversas tendencias en su expansión. La principal manifestación de ésta reacción es agrietamiento en forma de mapeo. Para evitar este tipo de reacción sólo deberá emplearse agregados con un buen registro de servicios.

Con este tipo de agregados deberá limitarse los álcalis en el cemento, aunque no siempre ésta sea la medida más adecuada. Dos técnicas que pueden ayudar son el empleo de una puzolana efectiva o el reemplazo parcial con agregado grueso conformado por caliza no reactiva.

23.5. REACCION ALCALI-ROCAS CARBONATADAS

Agregados conformados por calizas carbonatadas son susceptibles de reaccionar con los álcalis del cemento. Se encuentran en algunas pocas localidades de los Estados Unidos y Canada.

Todas las rocas carbonatadas que tienen una reactividad expansiva se caracterizan por los siguientes aspectos:

1. Son dolomíticas pero contienen una cantidad apreciable de calcita.
2. Contienen arcilla y/o limo.
3. Tienen una matriz de grano extremadamente fino.
4. Tienen una textura característica consistente de pequeños rombos de dolomita aislados, diseminados en una matriz de arcilla o limo y calcita finamente dividida.

Las investigaciones sobre este tipo de reacción han determinado que algunos tipos de arcilla juegan un papel importante en el mecanismo de expansión, ya

sea porque absorben agua con posterior hinchazón actuando activamente durante el proceso de desdolitización, o actuando como una membrana semipermeable en el desarrollo de presiones osmóticas; o ya sea porque su presencia como un material intersticial entre los rombos dolomíticos debilita la adherencia entre ellos.

Se han efectuado investigaciones sobre esta reacción, proponiendo medidas de control para el empleo de rocas expansivas. Estas medidas incluyen adecuada selección de las canteras para eliminar las rocas peligrosas, o restringir el volumen y empleo de cementos con alto contenido de álcalis.

24. OTRAS REACCIONES QUIMICAS

Otras reacciones químicas que involucran al agregado y pueden conducir a la destrucción del concreto endurecido, incluyen la hidratación de minerales anhidros, el cambio de base y volumen en arcillas y otros minerales, los constituyentes solubles, la oxidación e hidratación de los compuestos solubles, y las reacciones que involucran sulfitos y sulfatos. Los materiales que pueden dar origen a tales reacciones pueden ser detectados por los ensayos estandarizados de agregados y, especialmente, por el examen petrográfico.

Los óxidos de calcio y magnesio pueden contaminar el agregado cuando es transportado en vehículos en los cuales se ha conducido previamente material refractario a base de caliza o dolomita.

Es conocido que la oxidación e hidratación de compuestos ferrosos que pueden estar presentes en arcillas ferrosas o sulfitos de hierro (tales como la pirita o la marcasita) presentes en calizas y esquistos pueden causar ampolladuras y manchas en el concreto. Las partículas de hierro metálico presentes en escorias de altos hornos pueden oxidar si están expuestas o muy cerca de la superficie del concreto, dando por resultado decoloración y ampolladuras menores.

Los sulfatos pueden estar presentes en una variedad de tipos de agregados, ya sea como un componente original o como resultado de la oxidación de sulfitos originalmente presentes. Los sulfatos presentes en agua pueden atacar a los aluminatos y el hidróxido de calcio en la pasta, causando expansión y deterioro general. El yeso es el más común de los sulfatos presente en los agregados en forma de un revestimiento de la arena y grava, como un componente de las rocas sedimentarias, o por formación de las escorias expuestas largo tiempo al ambiente.

Otras sales solubles en agua, tales como los cloruros y sulfatos, pueden presentarse en agregados naturales y contribuir a las eflorescencias o a la corrosión de los elementos metálicos embebidos.

Algunas zeolitas y arcillas están sujetas a cambios de base que pueden influenciar en la reacción álcali-agregado con posibilidad de originar expansión del concreto.

Es recomendable que entre las medidas rutinarias que se efectúan para comprobar si el contenido total de cloruros excede los límites indicados en ACI 201.2R ó ACI 318, se emplee el método de la Federal Highway Administration de los Estados Unidos para determinar la cantidad de cloruro soluble en agua presente en los agregados y el concreto a las edades de 28 y 42 días.

25. RESISTENCIA

25.1. ALCANCE

La resistencia es el máximo esfuerzo que puede ser soportado por el concreto sin romperse. La resistencia en compresión se utiliza como índice de la calidad del concreto. En pavimentos suele utilizarse la resistencia en flexión. La resistencia al corte no se utiliza.

Por su propia naturaleza, la resistencia del concreto no puede ser mayor que la de sus agregados. Sin embargo, la resistencia a la compresión de los concretos convencionales dista mucho de la que corresponde a la mayoría de las rocas empleadas como agregado, las mismas que se encuentran por encima de los 1,000 kg/cm². Por esta razón no se ha profundizado el análisis de la influencia del agregado en la resistencia del concreto.

Lo expresado anteriormente es de fácil comprobación, si se observa la fractura de los especímenes de concreto sometidos a ensayos de compresión. En ellos, la rotura se presenta en el mortero o en la zona de adherencia con el agregado grueso y, por excepción, en los agregados descompuestos o alterados.

Pocas veces se determina la resistencia a la compresión de los agregados; en estos casos, se evalúa la resistencia de la roca en probetas talladas para la prueba. Los resultados obtenidos no son indicativos, por la influencia intrínseca de los posibles planos de debiles de la roca y lo incierto de extrapolar valores a la partículas fragmentadas.

Eventualmente, se emplea un ensayo de aplastamiento o truturación, colocando la muestra de granulometría normalizada dentro de un molde cilíndrico y sometiéndolo a compresión por intermedio de un émbolo en la máquina de prueba. La calificación del agregado se efectúa por análisis granulométrico, para definir el porcentaje fragmentado en el ensayo. Por las limitaciones del método, su uso ha quedado restringido a los agregados ligeros.

Aunque la durabilidad es tanto o más importante que la resistencia, ésta se emplea para la aceptación del concreto. Otras propiedades, dependiendo de las características y ubicación de la obra, pueden ser más importantes que aquellas.

Abrams indicó, en 1918, que en un conjunto dado de materiales y condiciones de trabajo, el factor determinante de la resistencia era la relación agua-cemento de diseño, en la que se excluye el agua absorbida por el agregado. En esta teoría las resistencias son mayores con la disminución de la relación agua-cemento.

Posteriormente se demostró por Gilkey y Walker que la resistencia era función de cuatro factores:

- Relación agua-cemento
- Relación cemento-agregado
- Granulometría, dureza, resistencia, perfil y textura superficial del agregado
- Tamaño máximo del agregado

El concepto anterior se ha complementado por Powers con las teorías sobre grado de hidratación, relación gel-espacio y resistencia por adherencia pasta-agregado.

A la fecha se acepta que la resistencia a la compresión que puede ser desarrollada a una edad determinada por una mezcla de materiales dados varía en función de:

- La marca, tipo, antigüedad, superficie específica y composición química del cemento.
- La calidad del agua.
- La dureza, resistencia, perfil, textura superficial, porosidad, limpieza, granulometría, tamaño máximo y superficie específica del agregado.
- Las adiciones minerales empleadas.
- Los aditivos químicos empleados.
- La resistencia de la pasta
- La relación del agua libre de la mezcla al material cementante.
- La relación material cementante-agregado.
- La relación del agregado fino al agregado grueso.
- La relación de la pasta a la superficie específica del agregado.
- La resistencia por adherencia pasta-agregado
- La porosidad de la pasta.
- La permeabilidad del concreto.
- El grado de hidratación del cemento.
- La relación gel-espacio.
- La presencia intencional en la pasta de fibra metálica, de vidrio o plástica.
- Las condiciones del proceso de puesta en obra.

A continuación se analizará la influencia de diversas propiedades del agregado sobre la resistencia del concreto.

25.2. INFLUENCIA DE LA DUREZA DEL AGREGADO

La dureza de un agregado está dada por su resistencia al desgaste por erosión o abrasión. Ella depende de los elementos constituyentes del agregado.

Se define como partículas blandas a las que fallan en los procesos de abrasión, desgaste o frotamiento, debido a la trituration de los granos que las componen.

La dureza se clasifica de acuerdo a la Escala de Mohs, teniendo los valores más altos los piroxenos, anfíboles, vidrios volcánicos, feldespato y cuarzo. Por su dureza son recomendables en concreto el cuarzo, la cuarzita, las rocas densas de origen volcánico y las silicosas.

Los agregados de dureza baja pueden incrementar los requerimientos de agua, con modificación de la relación agua-cemento y disminución de la resistencia, al aumentar la cantidad de finos de la mezcla por destrucción durante el mezclado.

La dureza del agregado se determina mediante el Ensayo de Abrasión de Los Angeles, de acuerdo a ASTM C 131. Este ensayo puede no ser determinante en caso de concreto para estructuras, pero si lo sería en pavimentos y obras hidráulicas. El ensayo es obligatorio en los dos últimos casos, pero no lo es si se trata de estructuras de concreto armado para edificaciones, salvo aquellas partes de éstas que puedan estar sujetas a procesos de abrasión.

25.3. INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA DEL AGREGADO

La resistencia a la compresión del agregado deberá ser tal que permita desarrollar totalmente la resistencia potencial de la matriz cementante. Usualmente el problema no existe dado que el valor mínimo de resistencia a la trituration de las rocas promedio varía de 700 a 3500 kg/cm².

Si los granos constituyentes del agregado no están bien cementados, o están compuestos de partículas débiles, puede presentarse problemas. Granitos compuestos de cristales duros de cuarzo y feldespato pueden mostrar baja resistencia debido a pobre interconexión de los granos. Debido a una perfecta interconexión de éstos, los gabros y diabasas pueden poseer mayor resistencia y mejores propiedades elásticas.

La información sobre resistencia del agregado se obtiene usualmente a partir de:

- Ensayos de trituración en muestras de la roca originaria.
- Ensayos de capacidad de trituración de la masa de agregado.
- Ensayos de comportamiento del agregado en el concreto.

El método más simple es emplear el agregado en mezclas de concreto las cuales han dado una resistencia determinada con un agregado previamente ensayado. Si la resistencia en compresión es menor y muchas partículas aparecen fracturadas después de la rotura del espécimen, la resistencia del agregado empleado es menor que la de la mezcla en que es empleado.

25.4. INFLUENCIA DE LA TEXTURA SUPERFICIAL

La textura superficial del agregado depende de la dureza, tamaño del grano y porosidad de la roca original, así como de las fuerzas que han actuado sobre la superficie de las partículas para suavizarlas o darles rugosidad.

La importancia de la textura superficial en la resistencia del concreto radica en que la mayor o menor rugosidad del agregado define en forma importante la capacidad de adherencia de éste con la pasta, siendo ella mayor conforme el agregado es más rugoso.

La adherencia pasta-agregado es función de fenómenos físico-químicos complejos y de la posibilidad de penetración de la pasta en los poros del agregado. Ambos procesos establecen un grado de unión pasta-agregado el cual es, entre otros factores, función de la rugosidad superficial del agregado.

La textura rugosa de agregados que provienen de roca triturada da resistencias por adherencia mayores que las que se obtendría por el empleo de agregados de textura suave. Esta ventaja puede perderse si el agregado está recubierto por el polvo proveniente del proceso de trituración.

El efecto sobre la disminución de la resistencia de las partículas de textura suave puede compensarse por la reducción en la relación agua-cemento debida al incremento en la trabajabilidad y reducción en la demanda de agua de este tipo de agregados.

La textura superficial del agregado influye sobre la resistencia del concreto por su efecto sobre la resistencia por adherencia pasta-agregado. Los mayores efectos son sobre la resistencia en flexión y las altas resistencias.

Las partículas cuya superficie se encuentra altamente intemperizada o descompuesta deben ser rechazadas, dado que al desprenderse la cáscara superficial del núcleo sano se producen dos acciones inconvenientes: por una parte se reduce la adherencia pasta-agregado con la consiguiente disminución en la resistencia del concreto; por otra parte el material desprendido de la

superficie del agregado tiende a aumentar las partículas más finas con el consiguiente incremento en la demanda de agua, el incremento en la relación agua-cemento y la disminución de la resistencia.

25.5. INFLUENCIA DEL PERFIL DEL AGREGADO

El contenido de vacíos de la masa de concreto disminuye conforme se incrementa la cantidad de partículas de perfil redondeado, facilitando el acomodo del agregado en el concreto.

El agregado de perfil angular requiere más agua por su mayor superficie específica, pero puede dar la misma resistencia para un factor cemento determinado si es adecuadamente dosificado. En concretos de alta resistencia el agregado de perfil angular produce resistencias en compresión más altas que el redondeado de granulometría y calidad comparables.

Por su menor superficie específica y menor demanda de cemento y agua, el agregado de perfil redondeado parecería ser más adecuado que el de perfil angular. Sin embargo, el mayor contenido de cemento requerido es compensado por las mayores resistencias resultantes de una mayor adherencia entre el agregado y la pasta, así como de una mayor ligazón en la textura del concreto endurecido.

Las partículas de perfil elongado o laminado son objetables debido a su efecto adverso sobre la resistencia al incrementar la demanda de agua y sobre el costo al obligar a emplear un contenido de cemento más alto.

La relación agua-cemento del mortero, para una consistencia dada, tiene relación con el perfil del agregado fino, requiriendo el perfil redondeado menos agua para obtener una resistencia determinada.

25.6. LIMPIEZA DEL AGREGADO

La presencia de limo, arcilla, mica, carbón, humus, materia orgánica, o sales en la superficie del agregado puede disminuir la resistencia del concreto debido a que:

- Se incrementan los requisitos de agua;
- Se facilita la acción del intemperismo;
- Se inhibe el desarrollo de una máxima adherencia entre la pasta y el agregado;
- Se modifica la hidratación normal del cemento;
- Se facilita la reacción química del agregado con los componentes de la pasta.

25.6.1. MATERIA ORGANICA

Si el agregado tiene materia orgánica ella podría interferir en la hidratación del cemento y en el desarrollo de resistencia del concreto. La materia orgánica es más frecuente en el agregado fino y puede eliminarse mediante lavado adecuado.

Si el agregado fino tiene alto contenido de materia orgánica hay disminución importante en la resistencia inicial del concreto, pudiendo el efecto desaparecer a los 28 días si la acción de la materia orgánica sobre la resistencia es sólo temporal.

Es conveniente comprobar, por ensayos de resistencia en morteros preparados con el agregado en estado natural y lavado, el efecto potencial de la materia orgánica sobre la resistencia.

25.6.2. MATERIALES FINOS

La arcilla presente como revestimiento superficial puede interferir con una buena adherencia pasta-agregado, reduciendo la resistencia.

El limo y el polvo de roca, además de producir los mismos efectos que la arcilla, debido a su alta fineza y gran superficie específica incrementan la demanda de agua de la mezcla, elevando la relación agua-cemento y disminuyendo la resistencia.

25.6.3. REVESTIMIENTOS

Los revestimientos se forman por deposición de sustancias minerales sobre la superficie del agregado, especialmente del grueso. Los revestimientos pueden ser de arcilla, limo, carbonato de calcio, óxido de hierro, ópalo, yeso, fosfatos solubles, sulfatos, etc.

Los revestimientos pueden interferir con una buena adherencia pasta-agregado. Igualmente pueden reaccionar químicamente modificando el fraguado y las resistencias inicial y/o final del concreto.

25.6.4. PARTICULAS NO ESTABLES

Los esquistos, las partículas de baja densidad, las lentes de arcilla, y el carbón, suelen ser considerados elementos inestables que pueden originar ampollamiento y descascaramiento del concreto. Si están presentes en cantidades que estén sobre el 2% al 5% en peso del agregado pueden afectar la resistencia del concreto.

El carbón puede hincharse por absorción de oxígeno y agua incrementando su volumen y desarrollando esfuerzos de tensión. En forma de partículas muy finas puede alterar el proceso de endurecimiento. La mica, el yeso y los sulfatos en presencia de los productos de hidratación pueden dar reacciones que modifiquen la resistencia.

La pirita y la marcasita reaccionan con el oxígeno y el agua para dar sulfatos ferrosos que posteriormente se descomponen para formar el hidróxido ferroso, mientras el ion sulfato reacciona con el aluminato de calcio del cemento. Estas reacciones pueden dar lugar a ampollamiento, descascaramiento y destrucción del concreto.

25.7. INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRIA

La granulometría del agregado influye sobre el agua necesaria en la mezcla. Características granulométricas inadecuadas requieren más agua y obligan a aumentar el factor cemento para no perder resistencia.

Modificaciones en la granulometría en relación con la empleada para la selección de las proporciones de la mezcla, al cambiar la superficie específica, hacen variar la demanda de agua para mantener la consistencia y tienden a modificar la resistencia del concreto.

La granulometría, perfil y cantidad total de agregado fino influyen sobre la resistencia por su efecto sobre los requerimientos de agua. Ello obliga a ajustar las proporciones de la mezcla para compensar cambios en el agregado fino.

Igualmente, siendo la resistencia función de la relación vacíos-cemento, y ésta de la granulometría del agregado es evidente que la resistencia del concreto está afectada por la granulometría.

25.8. EFECTOS DEL AGREGADO FINO

La resistencia del mortero es afectada por la fineza del agregado, siendo mayor conforme el agregado es más fino. Ello posiblemente debido al alto contenido de pasta de dichos morteros más que a una relación directa entre fineza y resistencia.

La resistencia se reduce conforme la cantidad de agregado fino se incrementa, debido a que la cantidad de pasta por unidad de volumen de mortero decrece. El efecto de la fineza es indirecto dado que él determina la cantidad de agregado grueso requerido.

Se ha determinado que las arenas naturales, al requerir menos agua que las manufacturadas, permiten obtener más altas resistencias. Igualmente que la resistencia en flexión del concreto es afectada en forma diferente a la resistencia en compresión debido a las propiedades del agregado fino.

25.9. EFECTOS DEL AGREGADO GRUESO

Los agregados a base de grava producen resistencias adecuadas en elementos en compresión pura debido a la mayor facilidad de acomodo del agregado y a la consiguiente menor demanda de agua por unidad cúbica de concreto, que permite obtener una menor relación agua-cemento para la misma consistencia, y por tanto una mejor resistencia en compresión.

En elementos en flexión y flexocompresión, la grava presenta desventajas en relación al agregado de perfil angular y textura rugosa, dado que se obtiene una menor resistencia por adherencia presentándose superficies en las que el mortero tendrá menores posibilidades de ligarse bien.

El agregado fino producido por rotura del grueso durante el proceso de transporte, si está en el orden del 4% en peso, no tiene efecto importante sobre la resistencia en compresión del concreto.

25.10. INFLUENCIA DEL TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO

Desde 1918 con Abrams se pensó que, alcanzada una compactación total, una relación agua-cemento dada debería dar resistencias uniformes. Se estimaba que las propiedades del agregado sólo eran importantes en la medida de su influencia sobre la relación agua-cemento requerida.

Como consecuencia se consideró que, para materiales determinados, la resistencia se incrementaba conforme la relación agua-cemento disminuía, lo que era favorecido por el empleo de agregados de tamaño mayor y bien perfilados.

Igualmente se consideró que podía obtenerse una reducción en el contenido de agua incrementando el tamaño máximo del agregado grueso lo que reducía la superficie específica total y la demanda de agua, e incrementaba la resistencia por adherencia al haber una mayor cantidad de pasta disponible por unidad de superficie del agregado.

La tesis anterior fue cuestionada cuando se encontró que los beneficios a ser obtenidos por el empleo de agregado grueso de tamaño mayor no se conseguían cuando las resistencias en compresión estaban por encima de 200 kg/cm².

Estudios sobre interrelación entre el tamaño máximo del agregado y la resistencia han permitido concluir que:

- a. Empleando agregado que varía de 3/4" a 2 1/2", el cual difiere en características físicas y minerales, se encuentran reducciones en el agua conforme se incrementa el tamaño. Sin embargo no se logra encontrar el correspondiente incremento en la resistencia, la cual alcanza su máximo para los tamaños intermedios y luego disminuye.
- b. Variaciones en el agregado fino y tamaño de las probetas, para agregados gruesos de diferente granulometría y propiedades físicas, confirman que las máximas resistencias obtenibles corresponden a tamaños intermedios del agregado y que el tamaño de las probetas no es fuente de error.
- c. Ensayos con mezclas sobre y poco arenosas confirman que, independientemente que los requisitos de agua se incrementaban al aumentar el porcentaje de fino y reducirse el tamaño máximo del grueso, incrementos en el tamaño máximo del agregado por encima de un valor intermedio no mejoran la resistencia del concreto.

De los estudios se acepta que los cambios en el tamaño máximo tienen dos influencias opuestas:

- a. Conforme el tamaño máximo del agregado se incrementa los requisitos de agua de la mezcla se reducen, disminuyendo la relación agua-cemento y tendiendo a mejorar la resistencia dentro de un determinado rango de valores; y
- b. La inclusión de partículas mayores es dañina para la resistencia debido a una disminución en la resistencia por adherencia y en la sección transversal de agregado que resiste al corte.

Como conclusión puede decirse que para incrementos en el tamaño de las partículas hasta 3/4" el efecto de la reducción de agua predomina y la resistencia del concreto se incrementa. Por encima de 3/4" se compensa la ventaja de la reducción de agua por los tamaños mayores del agregado los cuales causan reducción de la resistencia.

Ensayos posteriores han mostrado que el tamaño del agregado grueso ejerce gran influencia sobre la resistencia independientemente de la relación agua-cemento, siendo menor la resistencia para una relación agua-cemento dada conforme el tamaño máximo del agregado se incrementa.

Para iguales factor cemento y asentamiento el efecto del tamaño máximo del agregado puede compensarse por la reducción en el agua de la mezcla, la cual siempre acompaña a incrementos en el tamaño del agregado.

En los concretos con aire incorporado la resistencia se reduce progresivamente conforme el tamaño máximo del agregado se incrementa por encima de 3/4" y,

en muchos casos, por encima de 3/8". Aún las mezclas más pobres no muestran ventajas por el empleo de agregado mayor de 3/4".

La experiencia indica que, independientemente de las variaciones en características y composición mineral, existe en todos los casos un valor crítico el cual corresponde a los tamaños intermedios de agregado grueso, más allá del cual no hay ganancia de resistencia.

Igualmente se reconoce que la disminución de la resistencia es porcentualmente más pronunciada en los concretos con agregado de tamaño mayor y alto factor cemento. Igualmente, los concretos con aire incorporado muestran mayores reducciones en la resistencia para los tamaños mayores de agregado. La edad de la muestra tiene poco efecto sobre los resultados.

Hay un incremento en los cambios de volumen derivado del empleo de agregado grueso de tamaño menor. La contracción por secado está relacionada a la cantidad de agua de la mezcla y refleja los mayores volúmenes requeridos por el agregado grueso de tamaño menor. Sin embargo, para los agregados de 3/4" a 2 1/2" las diferencias en la contracción por secado son demasiado pequeñas como para ser de significación práctica en concretos con resistencia en compresión hasta de 280 kg/cm².

Se ha planteado la posibilidad que los efectos observados sean el resultado de esfuerzos internos desarrollados en el concreto, después del endurecimiento inicial, por contracción progresiva. La magnitud de estos esfuerzos está relacionada, proporcionalmente, al tamaño máximo de las partículas de agregado.

Los esfuerzos internos pueden ser tan grandes que un concreto con alto contenido de cemento y baja relación agua-cemento pueda fallar bajo la aplicación de esfuerzos externos menores que aquellos que pueden ser resistidos por un concreto de mayor relación agua-cemento y menor tamaño de agregado el cual, teóricamente, debería ser más débil.

Para concretos cuya resistencia en compresión a los 28 días es mayor de 350 kg/cm² la teoría de Abrams no se cumple. En estos concretos el tamaño máximo del agregado debería estar en el orden de 1/2", debiéndose limitar el tamaño máximo a 3/8" para concretos por encima de 450 kg/cm² a los 28 días.

Las principales conclusiones de los trabajos de Abrams, Gilkey, Walker y posteriores investigadores serían:

- a. Diversos tamaños de agregado plantean diferentes relaciones entre resistencia y relación agua.
- b. Para una relación agua dada, la resistencia del concreto será menor conforme el tamaño máximo del agregado se incrementa.

- c. La relación entre la resistencia y el tamaño máximo del agregado varía dependiendo de las características del agregado.
- d. La ventaja de los menores tamaños de agregado en la relación agua-resistencia, puede o no ser suficiente para dejar de lado los efectos de su mayor demanda de agua.
- e. Desde el punto de vista de la resistencia el óptimo tamaño máximo de agregado variará con su tipo, dureza, perfil, textura superficial, limpieza y mineralogía; así como con el factor cemento.

Finalmente puede indicarse que es dable llegar a la conclusión que al igual que el tamaño del agregado, otras características del mismo son de importancia para la resistencia del concreto. Aún en las mezclas pobres, donde los agregados de tamaño mayor dan la más alta resistencia, la ventaja, siendo importante, es secundaria en relación a las diferencias en resistencia entre agregados del mismo tamaño y diferente origen, o propiedades físicas, químicas y mecánicas diversas.

25.11. RESISTENCIA POR ADHERENCIA PASTA-AGREGADO

La adherencia entre la pasta y el agregado, si las condiciones de éste son adecuadas y la pasta es de buena calidad, tiende a estar por encima de los límites de la resistencia que puede ser obtenida por un conjunto determinado de materiales.

La capacidad de adherencia entre la pasta y el agregado está influenciada por la textura superficial, composición mineral, tamaño, perfil, y limpieza del agregado.

Generalmente la pasta se adhiere mejor a una superficie rugosa que a una suavizada. La textura superficial es más importante para el agregado grueso que para el fino.

Los revestimientos superficiales pueden interferir con una buena adherencia entre la pasta y el agregado. Los revestimientos removidos durante el proceso de mezclado incrementan el porcentaje de fino y por tanto la demanda de agua para mantener la consistencia.

Los revestimientos que permanecen sobre la superficie del agregado después de los procesos de mezcla y colocación no tienen efecto especial, salvo que por su naturaleza interfieran con la adherencia, o su composición química pueda producir reacciones dañinas con los álcalis del cemento. Los revestimientos arcillosos deberán perjudicar la adherencia, en tanto que los revestimientos de polvo no adherido incrementarán la demanda de agua como una consecuencia del incremento de finos.

Una posible explicación de la relación entre la capacidad de adherencia y el tamaño del agregado es que en la pasta el proceso de endurecimiento puede

ser acompañado por cambios dimensionales, los cuales pueden ser lo bastante grandes como para dar origen a considerables esfuerzos internos en la película de pasta en contacto con la superficie de los agregados, ya que estos se oponen a la tendencia de la pasta a moverse. Así, cuanto mayor es la superficie, mayor es el esfuerzo desarrollado y menor la capacidad de adherencia.

Igualmente, un aumento en el contenido de pasta tenderá a incrementar los efectos que la relación capacidad de adherencia-tamaño máximo del agregado puedan tener sobre el concreto. Ello podría ser la razón por la que los agregados de tamaño mayor dan lugar a una reducción en la resistencia más pronunciada en concretos con alto factor cemento.

26. CONTRACCION

Si bien la pasta tiene una mayor contracción potencial, el agregado presente en la mezcla tiene un efecto importante sobre la contracción por secado del concreto al reducir la contracción de la pasta debido a su capacidad de restricción.

La contracción del concreto es una fracción de la de la pasta debido a esta capacidad de restricción del agregado, pudiendo llegar a ser la contracción del concreto la quinta o décima parte de la de la pasta. La magnitud de la contracción del concreto bajo condiciones de secado dadas depende de:

- a. La contracción potencial de la pasta y del agregado;
- b. El volumen total de pasta en la unidad cúbica del concreto;
- c. La cantidad de agregado presente en la unidad cúbica de concreto; y
- d. Las propiedades del agregado, especialmente su módulo de elasticidad.

En la mezcla el agregado está rodeado de pasta por lo que al contraerse ésta coloca a aquel bajo compresión, produciéndose fuerzas de tensión que si son mayores que la resistencia de la pasta pueden producir agrietamiento y dificultad en la medida de la contracción. Ello puede dar lugar a que si se emplea agregados con alto módulo de elasticidad se obtengan concretos con menor contracción que aquellos que tienen módulo de elasticidad menor.

Los factores asociados con el agregado los cuales pueden afectar la contracción por secado del concreto son los siguientes:

- a. La rigidez, compresibilidad, o módulo de elasticidad del agregado. Cuanto mayor es el módulo de elasticidad del agregado mayor será la restricción ofrecida a la contracción de la pasta y menor la contracción del concreto.
- b. La granulometría, perfil, tamaño y limpieza de las partículas de agregado. Todos ellos factores que tienen influencia sobre la cantidad de pasta y agua requeridas por el concreto y la cantidad de agregado empleado en éste.
- c. Propiedades del agregado, tales como textura y porosidad, las cuales afectan la adherencia entre la pasta y el agregado.

- d. Arcilla en la superficie o interior del agregado, por su contribución a la contracción del agregado por secado y al incremento en la demanda de agua de la mezcla.
- e. Altos valores de absorción del agregado los cuales pueden favorecer la contracción por secado del concreto.

Los agregados que contienen cuarzo o feldespato, así como las calizas, dolomitas y algunos basaltos, se clasifican como que producen baja contracción. Los granitos producen valores intermedios de contracción. Los agregados que contienen areniscas, esquistos, pizarras, hornablenda, gravasa, o algunos tipos de basaltos, se asocian a concretos de alta contracción.

Debe recordarse que las propiedades de un tipo de agregado dado pueden variar en función de las características físicas, químicas y físico-químicas de la cantera, lo que puede originar importantes variaciones en la contracción de concretos preparados con un tipo dado de agregado proveniente de diferentes canteras. El perfil, la textura superficial, la granulometría, el tamaño máximo, y el porcentaje de agregado fino, influyen en la cantidad de agua empleada en la mezcla y por tanto son factores que inciden en la magnitud por secado del concreto.

Si es necesario conocer la contracción por secado potencial del concreto preparado con un agregado dado, se requieren ensayos bajo condiciones cuidadosamente controladas. La magnitud de la contracción obtenida depende del procedimiento de ensayo y del espécimen ensayado. Si es necesario conocer la contracción por secado potencial del concreto preparado con un agregado dado, debe efectuarse ensayos de contracción por secado bajo condiciones cuidadosamente controladas. La magnitud de la contracción obtenida depende del procedimiento de ensayo y del espécimen ensayado.

Las diferentes propiedades del agregado que influyen en la cantidad de agua empleada en la mezcla son un factor importante en la magnitud de la contracción por secado del concreto que es factor del contenido de agua de éste. Entre estas propiedades se incluyen el perfil, la textura superficial, la granulometría, el tamaño máximo, y el porcentaje de agregado fino.

27. PROPIEDADES TERMICAS

Las propiedades del agregado las cuales tienen efecto sobre las características térmicas del concreto, haciendo que las de éste dependan de las de aquel, son su calor específico, el coeficiente de expansión termal, la conductividad térmica y la difusividad térmica. Se ha determinado que el coeficiente de expansión térmica puede ser calculado aproximadamente como el promedio de los valores del peso de los materiales constituyentes en proporción a los volúmenes presentes en la unidad cúbica de concreto.

Igualmente se ha demostrado que cada uno de los materiales que componen el concreto contribuye a la conductividad y calor específico del producto resultante en proporción a la cantidad de material presente en la unidad cúbica de concreto. La difusividad térmica es afectada en igual forma. El coeficiente de expansión térmica de los agregados comunmente empleados varía con la composición mineralógica de éstos, especialmente con la cantidad de cuarzo que la roca contiene. Cuanto más cuarzo mayor el coeficiente de expansión térmica.

La pasta tiene un coeficiente de expansión térmica aproximadamente 1.5 veces mayor que el cuarzo y desde que éste tiene el más alto coeficiente de expansión térmica de los minerales comunes, deberá preferirse los agregados que tienen un bajo coeficiente de expansión térmica en aquellos casos en que pueden presentarse esfuerzos térmicos diferenciales a través de una sección de concreto. La conductividad térmica del concreto varía con su peso unitario. Cuanto más alto el peso unitario del agregado mayor el valor de la conductividad térmica. La pasta tiene una conductividad térmica menor que la mayoría de los agregados. Cuanto más agregado se emplee en la mezcla mayor el valor de la conductividad térmica.

El factor más importante que influye sobre el coeficiente de expansión térmica del concreto es el tipo de agregado. La grava, la cuarzita y la escoria espumosa tienen alto coeficiente de expansión térmica. La caliza tiene bajo valor y el granito un valor intermedio. El coeficiente de expansión térmica del concreto refleja el del agregado que interviene en su preparación.

28. PESO UNITARIO

El peso unitario del concreto depende de la gravedad específica del agregado, de la cantidad de aire de la mezcla, de las proporciones de ésta, y de las propiedades del agregado que determinan los requerimientos de agua.

Desde que la gravedad específica de la pasta es menor que la de los agregados normales, el peso unitario del concreto se incrementa con disminución en el contenido de pasta.

29. MODULO DE ELASTICIDAD

El módulo de elasticidad del concreto depende del módulo de elasticidad y relación de Poisson del agregado. Tanto en compresión como en tensión la curva esfuerzo-deformación para las rocas tiene una relación prácticamente lineal, indicando que el agregado es razonablemente elástico. Por otra parte, el mortero tiene una relación esfuerzo-deformación curvada cuando los esfuerzos

exceden del 30% de la resistencia última. Ello es debido al comportamiento no lineal de la pasta y a la formación de grietas de adherencia y deslizamiento en la interface agregado-pasta. Debido a ello no hay una relación simple entre los módulos de elasticidad del concreto y el agregado.

Las investigaciones han permitido determinar que el módulo de elasticidad del concreto es una función del módulo de elasticidad de sus constituyentes y que, para una pasta dada, el módulo de elasticidad del agregado tiene un efecto menor sobre el módulo de elasticidad del concreto que aquel que puede ser estimado a partir de las proporciones volumétricas del agregado en el concreto.

En general, conforme el módulo de elasticidad del agregado se incrementa ocurre lo mismo con el del concreto, por lo que conforme el volumen de agregado se incrementa el módulo de elasticidad del concreto deberá aproximarse al del agregado. En general se recomienda que cuando el módulo de elasticidad del concreto puede ser conocido en forma bastante segura, se realicen ensayos en concreto en vez de calcular el módulo de elasticidad a partir de las propiedades del agregado.

30. ESCURRIMIENTO PLASTICO

Los estudios de laboratorio indican que el escurrimiento plástico del concreto aumenta con incrementos en el módulo de fineza del agregado.

Se ha encontrado que:

- a. Hay pequeña diferencia en el escurrimiento plástico de concretos preparados con agregado redondeado o angular.
- b. El concreto preparado con agregado poroso tiene un escurrimiento plástico mayor.
- c. El concreto preparado con arenisca tiene un mayor escurrimiento plástico que aquel preparado con granito.

31. CAPACIDAD DE FRICCION SUPERFICIAL

La capacidad de deslizamiento de los pavimentos está relacionada con la tendencia de algunos tipos de agregados a pulirse conforme la superficie del concreto se desgasta por el tráfico. El coeficiente de fricción, o capacidad de deslizamiento de la superficie del concreto, está influenciado por las propiedades del agregado utilizado. La textura del acabado de la superficie y la dureza del agregado fino son importantes. El agregado grueso se involucra si la pérdida de material superficial es tan alta como para dejar expuesta una apreciable cantidad de aquel.

El pulido es una forma especial de desgaste en la que el tamaño del abrasivo es muy pequeño, tal como la típica arenilla de los pavimentos la cual se presenta con tamaños entre 10 y 40 micrones, y la acción es de naturaleza tal que la textura superficial es gradualmente suavizada y pulida. En climas húmedos la resistencia de la superficie de los pavimentos al deslizamiento depende, en general, de su microtextura y, adicionalmente, de la macrotextura cuando está involucrada una velocidad significativa.

La macrotextura es controlada por las operaciones de acabado, siendo importante retirar el exceso de agua que pueda encontrarse entre el neumático y el pavimento. La microtextura es controlada por la granulometría del agregado fino y la textura y características de pulido de la pasta.

La mayoría de los minerales presentes en los agregados se pulen gradualmente cuando están expuestos en la superficie de los pavimentos, puliéndose los minerales blandos más rápido que los duros. Una excepción son los agregados compuestos de materiales desmenuzables o vesiculares los cuales, por el proceso de desgaste, tienden a tener piezas rotas las cuales están sometidas a nuevos procesos de desgaste. Estos materiales pueden originar un mayor desgaste pero, al mismo tiempo, proporcionar un mayor nivel de fricción en un largo período.

Se ha encontrado que el agregado grueso a base de gravas ricas en sílice y caliza, y los agregados finos ricos en sílice, proporcionan buena resistencia al deslizamiento en todos los casos. El empleo de agregado fino calcareo da baja resistencia al deslizamiento. Los agregados carbonatados se pulen, en general, más rápidamente que otros tipos de agregados.

Las más altas resistencias al deslizamiento en el largo plazo se han obtenido para agregados cuya superficie era continuamente renovada por el tráfico. Igualmente se ha determinado que el agregado fino tiene mayor efecto que el grueso sobre la resistencia al deslizamiento. Se ha sugerido un contenido mínimo del 25% de partículas ricas en sílice en el agregado fino a fin de asegurar al mortero adecuadas propiedades friccionales.

Los agregados compuestos de minerales que presentan una alta dureza Mohr pueden resistir el pulido y mantener mayores niveles de resistencia al deslizamiento que aquellos agregados compuestos preferentemente de minerales con menor rango de dureza. Cuanto más duros y angulares son los granos minerales y más uniforme su distribución en la matriz, mayor es el aporte de los agregados a la resistencia al deslizamiento.

32. EFECTOS DEL PROCESAMIENTO Y MANEJO DE LOS AGREGADOS

32.1. GENERALIDADES

Las características del agregado no son generalmente modificadas por el procesamiento del mismo, aunque la cantidad de partículas inconvenientes puede ser reducida. Las características que pueden ser controladas incluyen granulometría, contenido de humedad, limpieza, remoción de partículas livianas y, en algún grado, perfil de las partículas. El costo determina el grado en que el procesamiento puede ser orientado a producir el mejor compromiso entre la economía y las propiedades deseadas en el agregado.

La medida en la cual deberán aplicarse al agregado especificaciones exactas depende de cuán crítico es el uso final que se espera dar al concreto. Para concretos comerciales usuales es a menudo necesario especificar alta calidad y control rígido. Si el concreto estará sometido a altos esfuerzos o ambientes agresivos, la alta calidad y el control severo son requisitos obligatorios.

El procesamiento de los agregados en la cantera debe permitir lograr, además de las propiedades especificadas en las Normas o requeridas en obra, alcanzar granulometría y limpieza adecuadas; y remoción de constituyentes peligrosos. El proceso para obtener agregados con propiedades adecuadas empieza en la fase de explotación de la cantera, estando el producto terminado influenciado por la efectividad del trabajo de operación de la misma.

32.2. PROCESAMIENTO

32.2.1. GENERALIDADES

El contenido de humedad de la capa de material que está sobre el depósito puede tener efecto sobre las operaciones de procesado. En la excavación o limpieza de arenas y gravas, es necesaria una adecuada remoción de dicha capa y excavar hasta alcanzar la ubicación, altura y espesor del material que tiene las propiedades deseadas. Puede requerirse la mezcla de materiales excavados de diferentes partes de la cantera para obtener un agregado de las propiedades especificadas.

32.2.2. TRITURACION

En el procesamiento la primera fase es la trituración primaria. El tamaño del alimentador debe ser controlado para permitir que los finos puedan ser separados y las piezas de roca demasiado grandes puedan ser retiradas.

Los tamaños intermedios deben ser conducidos a trituración secundaria y

subsecuentes etapas a fin de beneficiar determinados productos por un triturado selectivo de las partículas blandas e inconvenientes, las cuales pueden ser removidas en posteriores etapas de tamizado. El triturado puede ser requerido para la producción de agregados a partir de material proveniente de lechos no consolidados o depósitos de grava. Cuando los depósitos contienen pedrones grandes las operaciones necesarias son similares a las utilizadas para lechos de roca.

Si el tamaño máximo en los depósitos es de 3" ó menor, es conveniente introducir en el triturador partículas mayores a fin de asegurar un alto contenido de partículas trituradas. Las plantas pueden contar con dos circuitos de producción de agregado grueso, uno para grava triturada y el otro para grava sin triturar.

32.2.3. TAMIZADO

Cuando la piedra o grava han sido reducidas al rango de tamaños deseado, es necesario separarlas en agregado fino, que corresponde a los tamaños menores que el Tamiz N° 4 y agregado grueso, generalmente dos ó más rangos de tamaños tal como son descritos en la Norma ASTM C 33 o en la Norma NTP 400.037. Los tamices operados a una velocidad uniforme, producen una graduación más consistente. La velocidad ideal es aquella que distribuye las partículas de un ancho determinado con una altura uniforme a través de la malla.

Las plantas vibradoras no son 100% eficientes dado que nunca logran una separación completamente limpia de todas las partículas lo suficientemente pequeñas para pasar la abertura de los tamices, pero su eficiencia debe ser optimizada para asegurar uniformidad de manera que todas las partículas tengan la oportunidad de pasar a través de las aberturas, permitiendo que se logre un producto uniforme.

La razón de ello se explica cuando se analiza la recomendación ACI 318 que requiere uniformidad en la calidad del concreto a fin que la resistencia promedio del concreto producido exceda a la resistencia especificada empleada en el diseño estructural. La uniformidad del concreto depende en gran parte de la del agregado.

32.2.4. LAVADO

El procesamiento puede requerir lavado del agregado para remover sales, arcilla u otros revestimientos, los cuales pueden interferir en la estabilidad química o en la capacidad de adherencia pasta-agregado.

El lavado es más necesario para las gravas provenientes de depósitos que contienen arcillas, que para agregados que provienen de lechos de roca. Algunas capas sedimentarias están entremezcladas con arcilla o esquistos y requieren de un lavado vigoroso para remover dichos materiales.

Las Normas ASTM C 33 y NTP 400.037 especifican límites para el material más fino que la Malla N° 200. Estos límites son menos restrictivos cuando el material es principalmente polvo proveniente de la fractura de las rocas durante el proceso de trituración. La presencia de este material puede obligar a incluir lavado en el proceso de producción de piedra partida.

32.2.5. CLASIFICACION POR AGUA

El control de la granulometría y la remoción de excesos de material fino en el agregado fino es generalmente lograda mediante clasificación por agua. Ello no es posible para los tamaños mayores de 1/4" dado que la separación no es tan eficiente como el tamizado. La granulometría puede ser controlada con considerable seguridad por remezclado adecuado.

32.2.6. RETAMIZADO

La mayoría de las etapas del procesamiento básico se cumplen en la planta de producción en cantera. En obra, cuando los ensayos indican que el manejo ha cambiado en forma importante las características del agregado, puede efectuarse un retamizado en la planta dosificadora a fin de reducir el material objetable.

32.2.7. BENEFICIO

Las mejoras en la calidad de un material mediante la remoción de constituyentes indeseables se conoce como «beneficio». El éxito del proceso depende de las diferencias en propiedades tales como dureza, densidad y elasticidad entre los constituyentes deseables e indeseables. Determinados trituradores de impacto son adaptables a una trituración «selectiva». El material inconveniente, blando y desmenuzable, es degradado produciendo un exceso de finos el mismo que es removido por tamizado o clasificación por agua. Si el depósito es de calidad marginal y el único disponible dentro de una distancia de transporte adecuada, una trituración selectiva puede ser el único procedimiento disponible para lograr un material adecuado.

32.2.8. CONTROL DEL PERFIL DE LAS PARTÍCULAS

El perfil de las partículas del agregado partido depende principalmente del equipo de trituración empleado y puede ser mejorado por la incorporación de un triturador adicional entre el primario y el final.

32.2.9. MANEJO DE LOS AGREGADOS

El más cuidadoso control en el proceso de fabricación de los agregados en la cantera puede ser malogrado debido a abusos en el manejo, almacenamiento, cargado, transporte a la obra, cargado en los silos de almacenamiento, y

dosificación. Siempre puede presentarse variabilidad entre lotes o aún en el mismo lote. Para definir y corregir excesiva variabilidad en el material debe establecerse y seguirse un programa estadístico de muestras en diferentes etapas de los proceso de producción y utilización hasta la dosificación final en la mezcladora.

Un inadecuado procesamiento de los agregados puede dar por resultado segregación, con alteración de la granulometría del agregado; contaminación, con incorporación de sustancias dañinas; falta de un adecuado y permanente contenido de humedad en el agregado al momento de la dosificación, con complicaciones en la producción de un concreto uniforme; todos ellos aspectos que atentan contra el logro de las propiedades deseadas en el concreto.

Las principales recomendaciones de este Acápito son:

- a. La segregación puede ser minimizada cuando los agregados son separados en tamaños individuales y dosificados separadamente.
- b. El exceso de material menor que el tamaño mínimo seleccionado para cada fracción deberá ser mantenido en la menor cantidad prácticamente posible.
- c. En el agregado fino se deberá, para minimizarlas, controlar las variaciones en el contenido de humedad y la granulometría.
- d. Debe evitarse una excesiva variación en la cantidad de partículas menores que la malla N° 200, dado que éstas tienen efecto importante sobre el contenido de agua de la mezcla, la pérdida de asentamiento, resistencia y contracción por secado.
- e. Si es necesario mezclar agregado fino de dos canteras diferentes, ambos deberán ser almacenados separadamente y emplearse un método de control adecuado para garantizar una mezcla uniforme.
- f. En relación con el contenido de humedad del agregado fino se tendrá en consideración lo siguiente:
 1. Deberá mantenerse un contenido de humedad estable en el agregado fino. Aquel depende de la granulometría, perfil, y textura superficial de las partículas; así como de las técnicas de drenaje del agregado almacenado.
 2. Todos los agregados producidos o manejados por métodos hidráulicos, así como los agregados lavados, deberán ser colocados en pilas o en silos a fin que drenen antes de ser dosificados.
 3. Las partículas bien graduadas, redondeadas y suavizadas, que tienen una buena práctica de almacenamiento y drenaje, pueden obtener un contenido de humedad estable cuando son drenadas por lo menos 12 horas.
 4. Las partículas pobremente graduadas, chatas y angulares, con pobre drenaje en las pilas de almacenamiento, pueden requerir de una semana o más para obtener un contenido de humedad estable.

- 5. Las fluctuaciones debidas al clima pueden ser compensadas por ajustes en el contenido de humedad del agregado cuando éste es dosificado.
- 6. El empleo de compensadores de agregados para ajustes rápidos de la dosificación en peso pueden minimizar la influencia de las variaciones de humedad sobre propiedades tales como asentamiento, contracción, relación agua-cemento y resistencia.
- g. Las pilas de almacenamiento deberán ser construídas en capas horizontales o ligeramente inclinadas. Las pilas cónicas o cualquier procedimiento de cargado que involucre la posibilidad de rodado del agregado por las paredes del talud deberá ser evitado. El equipo deberá ser mantenido lejos de las pilas a fin de evitar degradación y contaminación.
- h. Los silos de almacenamiento deben ser mantenidos tan llenos como sea posible, a fin de minimizar la rotura y cambios en la granulometría del material cuando éste es descargado.
- i. Los agregados deberán ser muestreados a intervalos regulares. Se recomienda mantener un promedio de cinco a diez ensayos de granulometría previos a fin de emplearlo para efectuar los ajustes necesarios en las proporciones de la mezcla.

33. EFECTOS DEL COSTO DEL AGREGADO

En general, para concretos usuales de peso entre 2200 y 2500 kg/m³, el costo con que el agregado contribuye al costo total de la unidad cúbica de concreto puesta en obra es relativamente bajo a pesar de su importante participación porcentual en ésta. El costo de los agregados está, usualmente, gobernado por su disponibilidad, el costo de procesamiento, y la distancia de transporte.

Sin embargo, existen otros factores que si son adecuadamente considerados pueden tener un mayor impacto económico, por su influencia sobre las propiedades del concreto, que el costo directo de los agregados. Entre dichos factores están la limpieza y durabilidad del agregado, su perfil, la granulometría; así como su influencia sobre los requisitos de cemento y agua, la durabilidad y resistencia; y los efectos sobre la facilidad de colocación y acabado. Una cuidadosa apreciación de los factores mencionados en los anteriores acápites y de su efecto sobre las propiedades del concreto; así como de su interrelación cuando son empleados en la dosificación de la mezcla de concreto puede influir significativamente en el costo final del concreto ya colocado.



CAPITULO

06

AGUA

INSTITUTO DE LA CONSTRUCCIÓN Y GERENCIA

1. CONCEPTOS GENERALES

El agua presente en la mezcla de concreto reacciona químicamente con el material cementante para lograr:

- a. La formación de gel
- b. Permitir que el conjunto de la masa adquiera las propiedades que:
 - En estado no endurecido faciliten una adecuada manipulación y colocación de la misma; y
 - En estado endurecido la conviertan en un producto de las propiedades y características deseadas.

Como requisito de carácter general y sin que ello implique la realización de ensayos que permitan verificar su calidad, Se podrá emplear como aguas de mezclado aquellas que se consideren potables, o las que por experiencia se conozca que pueden ser utilizadas en la preparación del concreto.

Debe recordarse que no todas las aguas que son adecuadas para beber son convenientes para el mezclado y que, igualmente, no todas las aguas inadecuadas para beber son inconvenientes para preparar concreto. En general, dentro de las limitaciones que en las diferentes secciones se han de dar, el agua de mezclado deberá estar libre de sustancias colorantes, aceites y azúcares.

Adicionalmente, el agua empleada no deberá contener sustancias que puedan producir efectos desfavorables sobre el fraguado, la resistencia o durabilidad, apariencia del concreto, o sobre los elementos metálicos embebidos en éste.

Previamente a su empleo, será necesario investigar y asegurarse que la fuente de provisión no está sometida a influencias que puedan modificar su composición y características con respecto a las conocidas que permitieron su empleo con resultados satisfactorios.

2. REQUISITOS DE CALIDAD

El agua que a de ser empleada en la preparación del concreto deberá cumplir con los requisitos de la Norma NTP 339.088 y ser, de preferencia, potable. No existen criterios uniformes en cuanto a los límites permisible para las sales y sustancias presentes en el agua que va a emplearse. A continuación se presenta, en partes por millón, los valores aceptados como máximos para el agua utilizada en el concreto.

Cloruros	300 ppm.
Sulfatos	300 ppm.
Sales de magnesio	150 ppm.
Sales solubles totales	500 ppm.
pH	mayor de 7
Sólidos en suspensión	1,500 ppm.
Materia orgánica	10 ppm.

La Norma Peruana NTP 339.088 considera aptas para la preparación y curado del concreto, aquellas aguas cuyas propiedades y contenidos de sustancias disueltas están comprendidos dentro de los siguientes límites:

- El contenido máximo de materia orgánica, expresada en oxígeno consumido, será de 3 mg/l (3ppm)
- El contenido de residuo insoluble no será mayor de 5 gr/l (5000 ppm)
- El pH estará comprendido entre 5.5 y 8.0
- El contenido de sulfatos, expresado como ion SO_4 , será menor de 0,6 gr/l (600) ppm
- El contenido de cloruros, expresado como ion Cl, será menor de 1 gr/l (1000 ppm)
- El contenido de carbonatos y bicarbonatos alcalinos (alcalinidad total) expresada en NaHCO_3 , será menor de 1 gr/l (1000 ppm)
- Si la variación de color es un requisito que se desea controlar, el contenido máximo de hierro, expresado en ion férrico, será de 1 ppm.

El agua deberá estar libre de azúcares o sus derivados. Igualmente lo estará de sales de potasio o de sodio.

Si se utiliza aguas no potables, la calidad del agua, determinada por análisis de Laboratorio, deberá ser aprobada por la Supervisión.

La selección de las proporciones de la mezcla de concreto se basará en resultados en los que se ha utilizado en la preparación del concreto agua de la fuente elegida.

3. UTILIZACION DE AGUAS NO POTABLES

Quando el agua a ser utilizada no cumpla con uno o varios de los requisitos indicados en la Sección 2, se deberá realizar ensayos comparativos empleando el agua en estudio y agua destilada o potable, manteniendo similitud de materiales y procedimientos. Dichos ensayos se realizarán, de preferencia, con el mismo cemento que será usado. Dichos ensayos incluirán la determinación del tiempo de fraguado de las pastas y la resistencia a la compresión de morteros a edades de 7 y 28 días.

El tiempo de fraguado no es necesariamente un ensayo satisfactorio para establecer la calidad del agua empleada ni los efectos de la misma sobre el concreto endurecido. Sin embargo, la Norma NTP 339.084 acepta que los tiempos de fraguado inicial y final de la pasta preparada con el agua en estudio podrán ser hasta 25% mayores o menores, respectivamente, que los correspondientes a las pastas que contienen el agua de referencia.

Los morteros preparados con el agua en estudio y ensayados de acuerdo a las recomendaciones de la Norma ASTM C 109 deben dar, a los 7 y 28 días, resistencias a la compresión no menores del 90% de la de muestras similares preparadas con agua potable. Es recomendable continuar los estudios a edades posteriores para certificar que no se presentan reducciones de la resistencia.

Cuando la concentración de sales, especialmente cloruros, exceda los límites indicados en estas recomendaciones, se efectuarán ensayos de resistencia a la compresión a edades de 180 y 365 días. No se permitirá en concretos reforzados el empleo de aguas que superen los límites de sales especificados.

Ni el olor ni el sabor son índices de la calidad del agua. Tampoco lo son los resultados de los ensayos de estabilidad de volumen.

Podrá utilizarse, previa autorización de la Supervisión, aguas no potables si, además de cumplir los requisitos anteriores se tiene que:

- a. Las impurezas presentes en el agua no alteran el tiempo de fraguado, la resistencia, durabilidad, o estabilidad de volumen del concreto; ni causan eflorescencias, ni procesos corrosivos en el acero de refuerzo.
- b. El agua es limpia y libre de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, álcalis, sales, materia orgánica, o sustancias que pueden ser dañinas al concreto, acero de refuerzo, acabados o elementos embebidos.
- c. La selección de las proporciones de la mezcla se basará en los resultados de ensayos de resistencia en compresión de concretos en cuya preparación se ha utilizado agua de la fuente elegida.

Sobre la base de lo indicado en los acápites anteriores se ha determinado que algunas aguas aparentemente inconvenientes no dan necesariamente un efecto dañino en el concreto. De acuerdo a los criterios expresados y previa realización de los ensayos correspondientes, las siguientes aguas podrían ser utilizadas en la preparación del concreto:

- a. Aguas de pantano y cienaga, siempre que la tubería de toma esté instalada de manera tal que queden por lo menos 60 cms de agua por debajo de ella, debiendo estar la entrada de una rejilla o dispositivo que impida el ingreso de pasto, raíces, fango, barro o materia sólida.
- b. Agua de arroyos y lagos.

- c. Aguas con concentración máxima de 0.1% de SO₄
- d. Agua de mar, dentro de las limitaciones que en la sección correspondiente se indican.
- e. Aguas alcalinas con un porcentaje máximo de 0.15% de sulfatos o cloruros.

4. AGUAS PROHIBIDAS

Está prohibido emplear en la preparación del concreto:

- a. Aguas ácidas
- b. Aguas calcáreas; minerales; carbonatadas; o naturales
- c. Aguas provenientes de minas o relaves
- d. Aguas que contengan residuos industriales
- e. Aguas con un contenido de cloruro de sodio mayor del 3%; o un contenido de sulfato mayor del 1%.
- f. Aguas que contengan algas; materia orgánica; humus; partículas de carbón; turba; azufre; o descargas de desagües.
- g. Aguas que contengan ácido húmico u otros ácidos orgánicos.
- h. Aguas que contengan azúcares o sus derivados.
- i. Aguas con porcentajes significativos de sales de sodio o potasio disueltos, en especial en todos aquellos casos en que es posible la reacción álcali-agregado.

5. LIMITACIONES

Las sales u otras sustancias dañinas que puedan estar presentes en los agregados y/o aditivos, deberán sumarse a la cantidad que pudiera aportar el agua de mezclado a fin de evaluar el total de sustancias inconvenientes que pueden ser dañinas al concreto, el acero de refuerzo, o los elementos metálicos embebidos.

El agua empleada en la preparación del concreto para elementos presforzados, o en concretos que tengan embebidos elementos de aluminio o de hierro galvanizado, incluyendo la porción del agua de la mezcla con la que contribuyen la humedad libre del agregado o las soluciones de aditivos, no deberá contener cantidades de ion cloruro mayores del 0.6% en peso del cemento.

La suma total de las cantidades de ion cloruro presentes en el agua, agregados y aditivos, no deberá nunca exceder, expresada en porcentajes en peso del cemento, de los porcentajes indicados a continuación:

- Concreto presforzado 0.06%
- Concreto armado que tenga elementos de aluminio
o fierro galvanizado embebidos 0,06%
- Concreto armado expuesto a la acción de cloruros 0,10%
- Concreto armado no protegido que puede estar sometido
a un ambiente húmedo pero no expuesto a cloruros 0,15%
- Concreto armado que deberá estar seco o protegido
de la humedad durante su vida por medio de un
recubrimiento impermeable 0,80%

6. AGUA DE MAR

En algunos casos muy excepcionales puede ser necesario utilizar agua de mar en la preparación del concreto. En estos casos debe conocerse el contenido de sales solubles, así como que para una misma concentración los efectos difieren su hay un contacto duradero, con renovación o no del agresivo, o si se trata de una infiltración.

Debe recordarse que mucho menor intensidad tiene el ataque del agua de mar al concreto si se trata de un contacto sin renovación ya que el agente activo se agota y su acción se modifica por la presencia de nuevos productos formados por la reacción, caso en que la reacción tiende a anularse.

El agua de mar sólo podra utilizarse como agua de mezclado en la preparación del concreto con autorización previa escrita del Proyectista y la Supervisión, la misma que debe de figurar en el Cuaderno de Obras. Está prohibido su uso en los siguientes casos:

- Concreto presforzado
- Concretos cuya resistencia a la compresión a los 28 días sea mayor de 175 kg/cm²
- Concretos con elementos embebidos de fierro galvanizado o de aluminio
- Concretos preparados con cementos de alto contenido de óxido de alúmina; o con un contenido de C3A mayor del 5%
- Concretos con acabado superficial de importancia.
- Concretos expuestos o concretos cara vista.
- Concretos masivos.
- Concretos colocados en climas cálidos.
- Concretos expuestos a la brisa marina.
- Concretos con agregados reactivos.
- Concretos en los que se utiliza cementos aluminosos.

En la utilización del agua de mar como agua de mezclado se debe recordar que:

- a. No hay evidencias de fallas de estructuras de concreto simple preparadas con agua de mar.
- b. La utilización del agua de mar en la preparación del concreto no produce variación en el asentamiento; obteniéndose para cualquier dosificación la misma trabajabilidad que se consigue empleando agua potable.
- c. Puede presentarse una aceleración en el fraguado y endurecimiento inicial de la mezcla.
- d. La resistencia a la tracción y compresión en morteros preparados, es mayor durante los primeros días, en relación a los morteros preparados con agua potable.
- e. Su empleo disminuye la resistencia a la compresión a los 28 días aproximadamente en un 12%. A los tres días pueden presentarse valores del 124% al 137%, tendiendo la resistencia a igualarse a los siete días a la de los concretos preparados con agua potable.
- f. A partir de los 7 días la resistencia de los concretos preparados con agua de mar tiende a disminuir, obteniéndose a los 28 días una resistencia a la tracción del 93% y a la compresión del orden del 94%, respecto a los concretos preparados con agua potable.
- g. El efecto del empleo del agua de mar como agua de mezclado sobre la resistencia final del concreto, puede compensarse diseñando la mezcla para una resistencia promedio del 110% de aquella que se desea alcanzar a los 28 días.
- h. La presencia del agua de mar puede provocar corrosión del acero de refuerzo y elementos metálicos embebidos por lo que el recubrimiento de estos debe ser no menor de 70 mm.
- i. El concreto debe ser bien compactado, buscando la máxima densidad y la menor porosidad a fin de impedir reacciones de las sales existentes, asegurando una durabilidad aceptable y satisfactoria.
- j. La utilización de agua de mar como agua de mezclado permite, al incrementar las resistencias iniciales y favorecer el endurecimiento rápido del concreto, un desencofrado o una puesta en servicio más rápidos más rápido
- k. Puede provocar eflorescencias.

Si el agua de mar se emplea como agua de mezclado es recomendable que el cemento tenga un contenido máximo del 5% de aluminato tricálcico (C3A) y la mezcla tenga un contenido mínimo de cemento de 350 kg/m³; una relación agua-cemento máxima de 0.5; consistencia plástica; y un recubrimiento al acero de refuerzo no menor de 70 mm.

Se debe tener cuidado, cuando se usa agua de mar para la mezcla, de asegurar una densidad muy alta lográndola con un concreto bien compactado, para un contenido bajo pero que permita una adecuada trabajabilidad.

Finalmente cabe indicar que ciertas especificaciones y códigos no permiten su

empleo, y otras la restringen. En la mayoría no se hace mención a sus efectos. Así:

- a. Las especificaciones alemanas permiten el uso de toda agua, excepto cuando se emplea cemento aluminoso, y el agua no contiene más del 3% como suma de los contenidos de sodio y magnesio.
- b. El ACI en la recomendación 318 no da especificaciones referentes al empleo del agua de mar como tal.
- c. Igualmente, dentro de las limitaciones indicadas, la Portland Cement Association, permite el empleo del agua de mar tanto en concreto simple como en concreto armado.
- d. El Código Británico permite el empleo del agua de mar en concreto simple, no así en concreto armado, excepto donde la eflorescencia es inconveniente.
- e. El Código Ruso prohíbe el empleo del agua de mar en estructuras marítimas reforzadas en zonas de clima caliente, debido al peligro de corrosión y eflorescencia, el empleo de agua de mar en regiones de otros climas no es objetado.

7. REQUISITOS DEL COMITE 318 DEL ACI

La publicación 318-99 del American Concrete Institute «Building Code Requirements for Structural Concrete», en su Capítulo 3, acápite 3.4, fija cuatro requisitos para el agua de mezclado:

3.4.1.- El agua empleada en el mezclado del concreto deberá estar limpia y libre de cantidades peligrosas de aceites, álcalis, ácidos, sales, materia orgánica, u otras sustancias peligrosas para el concreto o el refuerzo.

3.4.2.- El agua de mezclado para concreto premezclado o para concreto que deberá contener elementos de aluminio embebidos, incluida la porción del agua de mezclado que es contribuida en forma de agua libre sobre el agregado, no deberá contener cantidades peligrosas de ion cloruro.

3.4.3.- No deberá emplearse en el concreto aguas no potables, salvo que las siguientes condiciones sean satisfechas:

3.4.3.1.- La selección de las proporciones del concreto deberá basarse en mezclas de concreto en las que se ha empleado agua de la misma fuente.

3.4.3.1.- Los cubos de ensayo de morteros preparados con aguas de mezclado no potables deberán tener a los 7 y 28 días resistencias iguales a por lo menos el 90% de la resistencia de especímenes similares preparados con agua potable. Los ensayos de comparación de resistencia deberán ser preparados con morteros, idénticos con excepción del agua de mezclado, preparados y

ensayados de acuerdo con la Norma ASTM C 109 «Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar (Empleando especímenes cúbicos de 2» ó 50 mm)».

Estas recomendaciones del Comité ACI 318, merecen del mismo las siguientes observaciones:

R3.4.1.- Casi todas las aguas naturales que son bebibles (potables) y que no tienen olor o sabor pronunciados, son satisfactorias para ser empleadas como aguas de mezclado en la preparación del concreto. Las impurezas, cuando son excesivas pueden afectar no sólo el tiempo de fraguado, la resistencia del concreto, y la estabilidad de volumen (cambios de longitud, sino que también pueden causar eflorescencias o corrosión del refuerzo. Cuando ello sea posible, las aguas con altas concentraciones de sólidos disueltos deberán ser evitadas.

Las sales u otras sustancias peligrosas, con las que contribuyen los agregados o aditivos, deben ser añadidas al volumen que puede ser contenido en el agua de mezclado. Estos volúmenes adicionales deben ser considerados en la evaluación de la aceptación de las impurezas totales que pueden ser peligrosas para el concreto o acero.

8. ALMACENAMIENTO

El agua a emplearse en la preparación del concreto se almacenará, de preferencia, en tanques metálicos o silos. Se tomarán las precauciones que eviten su contaminación. No es recomendable almacenar el agua de mar en tanques metálicos.

9. MUESTREO

El muestreo del agua de mezclado se efectuará de acuerdo en lo indicado en la Norma NTP 339,070 ó ASTM D 75. Se tendrá en consideración que:

- a. La Supervisión determinará la frecuencia de la toma de muestras.
- b. Las muestras remitidas al Laboratorio serán representativas del agua tal como será empleada. Se deberá tener presente que una sola muestra de agua puede no ser representativa si existen variaciones de composición en función del tiempo como consecuencia de las variaciones climáticas u otros motivos.
- c. Si se duda de la representatividad de a muestra, se deberán tomar muestras periódicas a distintas edades y días o, eventualmente, a la misma hora en distintos lugares. Igualmente cuando se presume que puede haber variado la composición del agua.

- d. Cada muestra tendrá un volumen mínimo de cinco litros. Las muestras se envasarán en recipientes cilíndricos de plástico o vidrio incoloro, perfectamente limpios. El cierre será hermético. Los recipientes serán adecuadamente embalados y acondicionados para evitar su rotura.

10. ENSAYO

El agua se ensayará de acuerdo a lo indicado en la Norma NTP 339.088. Iniciado el proceso de construcción no son necesarios nuevos ensayos a intervalos regulares salvo que:

- a. Las fuentes de suministro sean susceptibles de experimentar variaciones apreciables entre la estación seca y la húmeda.
- b. Exista la posibilidad que el agua de la fuente de abastecimiento pueda haber sido contaminada con un volumen excesivo de materiales en suspensión debido a una crecida anormal; o
- c. El flujo de agua disminuya al punto que la concentración de sales o materia orgánica en el agua pueda ser excesiva.

Para el ensayo del agua se tendrán en consideración las siguientes Normas:

- NTP 339.070 Toma de muestras de agua para la preparación y curado de morteros y concretos de cemento portland.
- NTP 339.071 Ensayo para determinar el residuo sólido y el contenido de materia orgánica de las aguas usadas para elaborar morteros y concretos.
- NTP 339.072 Método de ensayo para determinar por oxidabilidad el contenido de materia orgánica en las aguas usadas para elaborar morteros y concretos.
- NTP 339.073 Método de ensayo para determinar el pH de las aguas para elaborar morteros y concretos.
- NTP 339.074 Método de ensayo para determinar el contenido de sulfatos en las aguas usadas en la elaboración de concretos y morteros.
- NTP 339.075 Método de ensayo para determinar el contenido de hierro en las aguas usadas en la elaboración de hormigones y morteros.
- NTP 339.076 Método de ensayo para determinar el contenido de cloruros en las aguas usadas en la elaboración de concretos y morteros.

CAPITULO

07

ADITIVOS Y ADICIONES

1. DEFINICION

Un aditivo es definido, tanto por el Comité 116R del American Concrete Institute como por la Norma ASTM C 125, como «un material que no siendo agua, agregado, cemento hidráulico, o fibra de refuerzo, es empleado como un ingrediente del mortero o concreto, y es añadido a la tanda inmediatamente antes o durante su mezclado».

Los aditivos son materiales utilizados como componentes del concreto o el mortero, los cuales se añaden a éstos durante el mezclado a fin de:

- a) Modificar una o algunas de sus propiedades, a fin de permitir que sean más adecuados al trabajo que se está efectuando;
- b) Facilitar su colocación
- c) Reducir los costos de operación

En la decisión sobre el empleo de aditivos debe considerarse en que casos:

- a) Su utilización puede ser la única alternativa para lograr los resultados deseados.
- b) Los objetivos deseados pueden lograrse, con mayor economía y mejores resultados, por cambios en la composición o proporciones de la mezcla.

2. CONDICIONES DE EMPLEO

Los aditivos utilizados deberán cumplir con los requisitos de las Normas ASTM o ITINTEC correspondientes.

Su empleo deberá estar indicado en las especificaciones del proyecto, o ser aprobado por la Supervisión.

El empleo de aditivos incorporadores de aire es obligatorio en concretos que, en cualquier etapa de su vida, pueden estar expuestos a temperaturas ambiente menores de 0°C. En otros casos, el empleo de estos aditivos sólo es obligatorio cuando puede ser la única alternativa para lograr los resultados deseados.

El empleo de aditivos no autoriza a disminuir el contenido de cemento seleccionado para la unidad cúbica de concreto.

3. RAZONES DE EMPLEO

Entre las principales razones de empleo de aditivos, para modificar las propiedades del concreto no endurecido, se puede mencionar:

- a) Reducción en el contenido de agua de la mezcla;
- b) Incremento en la trabajabilidad sin modificación del contenido de agua; o disminución del contenido de agua sin modificación de la trabajabilidad;
- c) Reducción, incremento o control del asentamiento;
- d) Aceleración o retardo del tiempo de fraguado inicial;
- e) Modificación de la velocidad y/o magnitud de la exudación;
- f) Reducción o prevención de la segregación; o desarrollo de una ligera expansión;
- g) Mejora en la facilidad de colocación y/o bombeo de las mezclas.

Entre las principales razones de empleo de los aditivos para modificar las propiedades de los concretos, morteros o lechada endurecidos se puede mencionar:

- a) Retardo en el desarrollo del calor de hidratación o reducción en la magnitud de éste durante el endurecimiento inicial;
- b) Aceleración en la velocidad de desarrollo de la resistencia inicial y/o final del concreto y en el incremento de la misma;
- c) Incremento en la durabilidad, incluyendo su resistencia a condiciones severas de exposición;
- d) Disminución de la permeabilidad del concreto;
- e) Control de la expansión debida a la reacción álcali-agregados;
- f) Incremento en las adherencias acero-concreto; y concreto antiguo-concreto fresco;
- g) Incremento en las resistencias al impacto y/o la abrasión;
- h) Control de la corrosión de los elementos metálicos embebidos en el concreto;
- i) Producción de concretos o morteros celulares;
- j) Producción de concretos o morteros coloreados.

4. CONSIDERACIONES EN EL EMPLEO DE ADITIVOS

Los aditivos deben cumplir con los requisitos de las Normas seleccionadas y las especificaciones de obra, debiendo prestarse especial atención a las recomendaciones del fabricante y/o distribuidor del aditivo.

Las siguientes Normas ASTM cubren los tipos o clases de aditivos de uso corriente:

- Aditivos incorporadores de aire ASTM C 260
- Aditivos reductores de agua y controladores de fragua ASTM C 494
- Cloruro de Calcio ASTM D 98
- Aditivos a ser empleados en la producción de concretos muy sueltos ASTM C 1017

Los aditivos deben emplearse después de una evaluación de sus efectos en mezclas preparadas con los materiales a ser utilizados bajo condiciones similares a las de obra. Esta evaluación es especialmente importante en los siguientes casos:

- a) El aditivo no ha sido previamente empleado con la combinación de materiales a ser empleados en obra.
- b) Se especifica tipos especiales de cemento y/o se ha de emplear más de un tipo de aditivo.
- c) Los procesos de mezcla y colocación del concreto se han de efectuar a temperaturas que están fuera del rango de temperaturas de concretado normalmente utilizadas.

En aquellos casos en que es necesario emplear aditivos, el Ingeniero debe recordar lo siguiente:

- a) En determinados casos podría ser más conveniente variar el tipo o marca de cemento; la cantidad del mismo; la granulometría del agregado o las proporciones de la mezcla;
- b) Muchos aditivos afectan a más de una propiedad del concreto, pudiendo incidir adversamente sobre una deseable;
- c) El efecto deseado por la incorporación de un aditivo puede ser modificado significativamente por factores tales como el contenido de cemento y agua de la mezcla; por el tipo y granulometría del agregado; y por la forma y tiempo del proceso de mezclado.

Los aditivos que modifican las propiedades del concreto fresco pueden originar problemas si producen rigidización demasiado rápida de la pasta o prolongación excesiva del tiempo de fraguado. Debe estudiarse las causas recordándose que la rigidización temprana de la pasta puede deberse a cambios en la velocidad de reacción entre el silicato tricálcico y la fase sulfato; y que un retardo indebido puede tener su causa en una sobredosis de aditivos o una disminución de la temperatura ambiente con el consecuente retardo en la hidratación de los silicatos cálcicos.

Otro aspecto a ser considerado es el límite en la cantidad de cloruro de calcio que es permitida en la unidad cúbica de concreto al momento de la preparación. Tales límites están indicados en las recomendaciones ACI 318, 201, 222, 226 y en la Norma Técnica Peruana E-060 Ello obliga a conocer el contenido de ion cloruro del aditivo seleccionado y considerar aditivos o procedimientos alternativos.

Generalmente estos límites se expresan como un porcentaje máximo de ion cloruro en peso del cemento. Algunas veces, sin embargo se expresa el ión cloruro en peso del concreto, y otras como ión cloruro «soluble en agua» por peso unitario del cemento o concreto.

Independientemente de como se exprese el límite, es obvio que para evaluar la posibilidad que empleando un aditivo determinado pueda ponerse en riesgo el comportamiento del concreto cuya especificación indica tal límite, es necesario conocer el contenido del aditivo que se está escogiendo, expresado en términos equivalentes a aquellos en los que se da el límite en las especificaciones.

Si empleando la información disponible sobre el aditivo y el dosaje propuesto se llega a la conclusión que los requisitos de las especificaciones deberán ser excedidos, deberá considerarse aditivos o procedimientos alternativos a fin de garantizar que se han de lograr los resultados deseados.

Aunque las especificaciones están referidas principalmente a la influencia del aditivo sobre las propiedades del concreto, deben considerarse otros aspectos del proyecto. Entre ellos se incluye trabajabilidad; cualidades para el bombeo, colocación y acabado; desarrollo de resistencias tempranas; reuso de encofrados; apariencia de superficies terminadas, etc. Estas consideraciones adicionales a menudo son de gran importancia cuando se va a determinar el aditivo y el dosaje del mismo.

Finalmente se debe tener en consideración que el continuo incremento en los costos de los materiales, así como el creciente desarrollo de nuevos y mejores aditivos, obligan a una permanente evaluación en lo que se refiere a los beneficios de su empleo.

5. CONSIDERACIONES ECONOMICAS

La determinación del mayor costo del concreto debido al empleo de aditivos deberá basarse en los resultados obtenidos en concretos preparados en condiciones similares a aquellas que se espera en obra. Este estudio es fundamental cuando las características del concreto y los resultados obtenidos están directamente relacionados con:

- a) Las propiedades de los materiales empleados en la mezcla,
- b) Sus proporciones relativas en ésta,
- c) La temperatura y humedad relativas ambientes, y
- d) Las condiciones de curado.

Al evaluar la posibilidad de emplear un aditivo determinado debe considerarse su efecto sobre el volumen de la tanda; así como las posibles modificaciones en el rendimiento, a fin de poder determinar las causas reales de la variación de las propiedades y el costo de dicha variación.

Si el empleo de un aditivo produce cambios en la cantidad o características de los materiales empleados en la preparación del concreto, éste efecto debe ser

considerado cuando se evalúa la acción del aditivo, los beneficios resultantes, y los mayores costos debidos a su empleo.

Adicionalmente, en todo análisis económico del empleo de un aditivo se debe considerar:

- a) El costo de utilizar un ingrediente extra y el efecto de ello sobre los costos de puesta en obra del concreto;
- b) Los efectos económicos del aditivo sobre la trabajabilidad y consistencia del concreto; así como sobre la magnitud y velocidad de ganancia de resistencia;
- c) La posibilidad de emplear procedimientos menos costosos, o diseños más avanzados;
- d) Todos aquellos aspectos que puedan justificar el mayor costo del concreto debido al empleo del aditivo.

6. CLASIFICACION

Una clasificación de aditivos en función de sus efectos no es fácil debido a que ellos pueden ser clasificados genéricamente o con relación a los efectos característicos derivados de su empleo; pueden modificar más de una propiedad del concreto; así como a que los diversos productos existentes en el mercado no cumplen las mismas especificaciones.

En la clasificación debe considerarse que las múltiples posibilidades derivadas del empleo de aditivos; el constante desarrollo de materiales nuevos o modificaciones de los ya conocidos; y la variación de los efectos con los diferentes materiales integrantes del concreto, son factores que impiden presentar una clasificación demasiado extensa.

Adicionalmente debe indicarse que los aditivos comerciales pueden contener en su composición materiales los cuales, separadamente podrían ser incluídos en dos o más grupos, o podrían ser cubiertos por dos o más Normas ASTM o recomendaciones ACI.

En las clasificaciones que a continuación se presentan, aquellos aditivos que poseen propiedades identificables con más de un grupo son considerados en aquel que identifica a sus efectos más importantes.

De acuerdo a la Norma ASTM C 494, los aditivos se clasifican en:

- . TIPO A .. Reductores de agua.
- . TIPO B .. Retardadores de fragua.
- . TIPO C .. Acelerantes.
- . TIPO D .. Reductores de agua-retardadores de fragua.

- . TIPO E .. Reductores de agua-acelerantes.
- . TIPO F .. Super Reductores de Agua.
- . TIPO G.. Super Reductores de agua-Acelerantes.

Existen otros tipos de clasificaciones de aditivos de acuerdo a los efectos de su empleo o a los tipos de materiales constituyentes. La Recomendación ACI 212 clasifica a los aditivos en los siguientes grupos:

- a) ACELERANTES, los cuales tienen por finalidad incrementar significativamente al desarrollo inicial de resistencia en compresión y/o acortar el tiempo de fraguado. Deberán cumplir con los requisitos de las Normas ASTM C 494 ó C 1017, o de las Normas NTP 339.086 ó 339.087
- b) INCORPORADORES DE AIRE, los cuales tienen por objetivo mejorar el comportamiento del concreto frente a los procesos de congelación y deshielo que se producen en sus poros capilares cuando él está saturado y sometido a temperaturas bajo OC. Estos aditivos deberán cumplir con los requisitos de la Norma NTP 339.086 ó de la Norma ASTM C 260
- c) REDUCTORES DE AGUA Y REGULADORES DE FRAGUA, los cuales tienen por finalidad reducir los requisitos de agua de la mezcla o modificar las condiciones de fraguado de la misma, o ambas. Deberán cumplir con los requisitos de las Normas NTP 339.086 ó 339.087, o de las Normas ASTM C 494 ó C 1017
- d) ADITIVOS MINERALES, ya sean cementantes o puzolánicos, los cuales tienen por finalidad mejorar el comportamiento al estado fresco de mezclas deficientes en partículas muy finas y, en algunos casos, incrementar la resistencia final del concreto. Las puzolanas y las cenizas deberán cumplir con los requisitos de la Norma ASTM C 618. Las escorias de alto horno finamente molidas y las microsilices deberán cumplir con los requisitos de la Norma ASTM C 989. A los aditivos de este grupo en la actualidad se les considera como adiciones.
- e) GENERADORES DE GAS, los cuales tienen por finalidad controlar los procesos de exudación y asentamiento mediante la liberación de burbujas de gas en la mezcla fresca.
- f) ADITIVOS PARA INYECCIONES, los cuales tienen por finalidad retardar el tiempo de fraguado en cimentaciones especiales en las que las distancias de bombeo son muy grandes.
- g) PRODUCTORES DE EXPANSION, los cuales tienen por finalidad minimizar los efectos adversos de la contracción por secado del concreto.

- h) LIGANTES, los cuales tienen por única finalidad incrementar las propiedades ligantes de mezclas mediante la emulsión de un polímero orgánico.
- i) AYUDAS PARA BOMBEO, las cuales tienen por finalidad mejorar la facilidad de bombeo del concreto por incremento de la viscosidad del agua de la mezcla.
- j) COLORANTES, los cuales tienen por finalidad producir en el concreto el color deseado sin afectar las propiedades de la mezcla.
- k) FLOCULANTES, los cuales tienen por finalidad incrementar la velocidad de exudación y disminuir el volumen de ésta, al mismo tiempo que reducen el flujo e incrementan la cohesividad y rigidización inicial de la mezcla.
- l) FUNGICIDAS; INSECTICIDAS Y GERMICIDAS, los cuales tienen por finalidad inhibir o controlar el crecimiento de bacterias y hongos en pisos y paredes.
- m) IMPERMEABILIZANTES, los cuales tienen por finalidad contribuir a controlar las filtraciones a través de las grietas, reduciendo la penetración del agua, en un concreto no saturado, desde el lado húmedo al lado seco.
- n) REDUCTORES DE PERMEABILIDAD, los cuales tienen por finalidad reducir la velocidad con la cual el agua puede circular a través de un elemento de concreto saturado, bajo una gradiente hidráulica mantenida externamente.
- o) CONTROLADORES DE LA REACCION ALCALI-AGREGADO, los cuales tienen por finalidad reducir, evitar o controlar la reacción entre los álcalis del cemento y elementos que puedan estar presentes en los agregados reactivos.
- p) INHIBIDORES DE LA CORROSION, los cuales tienen por finalidad inhibir, retardar o reducir la corrosión del acero de refuerzo y elementos metálicos embebidos en el concreto.
- q) SUPERPLASTIFICANTES, también conocidos como aditivos reductores de agua de alto rango, los cuales tienen por finalidad reducir en forma importante el contenido de agua del concreto manteniendo una consistencia dada y sin producir efectos indeseables sobre el fraguado. Igualmente se emplean para incrementar el asentamiento sin necesidad de aumentar el contenido de agua de la mezcla.

7. PRECAUCIONES EN EL EMPLEO DE ADITIVOS

El empleo de aditivos está sujeto a lo indicado en las especificaciones del proyecto o a la aprobación previa de la Supervisión. Su empleo no autoriza a disminuir el contenido de cementante de la mezcla. Los aditivos empleados deberán cumplir con los requisitos de la Norma NTP 339.086 o de las Normas ASTM indicadas.

Los aditivos empleados en obra deberán ser del mismo tipo, marca, composición, concentración y comportamiento que los utilizados para la selección de las proporciones de la mezcla. Los aditivos deberán cumplir con los requisitos de las especificaciones de obra y de la Norma correspondiente, debiéndose observar las recomendaciones del fabricante.

Los aditivos deberán emplearse únicamente después de evaluar sus efectos, bajo condiciones similares a las de obra, en mezclas preparadas con los materiales a ser utilizados. Esta evaluación es especialmente importante si se especifica tipos especiales de cemento, se emplea más de un aditivo, o los procesos de puesta en obra son efectuados en zonas de altas o bajas temperaturas ambiente.

El tipo y marca de aditivo elegido se mantendrán durante todo el proyecto. Corresponde al Contratista demostrar a la Supervisión que los aditivos seleccionados permiten obtener las propiedades requeridas, siendo ellos capaces de mantener la calidad, composición y comportamiento del concreto en toda la obra.

Los aditivos empleados en forma de solución no estable o suspensión deberán ser incorporados a la mezcla empleando equipo dispersante a fin de garantizar una adecuada distribución. La Supervisión aprobará el procedimiento de incorporación seleccionado.

Siempre que se emplee aditivos, el Proyectista y el Contratista deberán recordar que:

- a) En determinados casos puede ser más conveniente variar el tipo o marca de cemento, la cantidad del mismo, la granulometría del agregado, o las proporciones de la mezcla;
- b) Algunos aditivos tienen efecto sobre más de una propiedad del concreto, pudiendo actuar adversamente sobre una deseable.
- c) El efecto de un aditivo puede ser modificado por los contenidos de cemento y agua de la mezcla; el tipo y la granulometría del agregado; y la forma y tiempo de mezclado.

Los aditivos que modifican las propiedades del concreto fresco pueden originar problemas si producen rigidización demasiado rápida o prolongación excesiva del tiempo de fraguado. Siempre deben verificarse estos aspectos mediante ensayos previos.

En el empleo de aditivos siempre debe considerarse el límite máximo de ion cloruro permitido por la unidad cúbica de concreto, expresado como porcentaje de ion cloruro en peso del cemento, el cual no excederá los valores indicados en la Norma Técnica E.060, o en la Recomendación ACI 318.

Los cloruros de calcio o de sodio, o los aditivos que contengan cloruros que no sean impurezas de los componentes del aditivo, no deberán emplearse en:

- a) Concreto presforzado o postensado.
- b) Concreto con elementos embebidos de aluminio o fierro galvanizado.
- c) Concretos colocados en encofrados de metal galvanizado.
- d) Concretos masivos; y
- e) Concretos colocados en zonas de clima cálido.

La evaluación del costo del concreto debido al empleo de un aditivo dado, debe basarse en los resultados obtenidos en mezclas de características determinadas, preparadas bajo condiciones similares a aquellas que se espera en obra. Ello es especialmente importante cuando las propiedades del concreto y los resultados obtenidos están directamente influenciados por las características del cemento y agregados, sus proporciones en la mezcla, así como por la temperatura y humedad ambiente, así como por el tipo y condiciones de curado.

8. RESPONSABILIDAD DEL CONTRATISTA

El Contratista deberá demostrar a la Supervisión que con los aditivos seleccionados se podrá:

- a) Obtener un concreto de las propiedades requeridas; y
- b) Mantener la calidad, composición, y comportamiento del concreto durante todo el proceso de puesta en obra.

El Contratista deberá entregar a la Supervisión información sobre:

- a) La composición química del aditivo;
- b) La dosificación recomendada y los efectos de las variaciones de la misma;
- c) El contenido de cloruros expresado como porcentaje en peso del ion cloruro;
- d) Las recomendaciones del fabricante, especialmente si se emplea incorporadores de aire.

El Contratista no está autorizado a reducir el contenido de cemento de la unidad cúbica de concreto si emplea aditivos, salvo autorización escrita de la Supervisión.

9. SELECCION DEL PORCENTAJE DE ADITIVO

En la selección de la cantidad de aditivo que debe ser empleada por unidad cúbica de concreto, se deberá tener en consideración:

- a) Las recomendaciones del fabricante;
- b) Las propiedades que se desea obtener;
- c) Las características de los materiales de la mezcla;
- d) El procedimiento de puesta en obra del concreto así como las condiciones ambientales;
- e) Los resultados de los ensayos en laboratorio y obra.

10. PREPARACION DEL ADITIVO

El uso exitoso de los aditivos depende de tener especial cuidado en obra en relación con una adecuada preparación y dosificación de éstos, a fin de evitar modificaciones no deseadas en las propiedades, rendimiento y uniformidad del concreto.

La preparación puede variar en función del tipo de aditivo y la procedencia de éste. Las recomendaciones del fabricante deben seguirse en caso de duda sobre el procedimiento a ser utilizado, pudiendo en algunos casos ser conveniente preparar soluciones estándar uniformes del aditivo para facilitar su empleo.

Si bien la mayoría de los aditivos son vendidos en forma líquida como soluciones estables listas para su empleo, la preparación del aditivo en obra puede significar la elaboración de una solución estándar o su disolución, a fin de facilitar una cuidadosa dosificación o dispersión.

Algunos aditivos químicos son vendidos como sólidos solubles en agua que requieren ser mezclados en obra. Ello puede exigir la preparación de soluciones de baja concentración debido a la dificultad del mezclado. Estas soluciones de baja concentración pueden contener una cantidad significativa de materiales insolubles finamente molidos, o ingredientes activos, los cuales pueden o no ser fácilmente solubles. Es importante tomar precauciones para garantizar que ellos se han de mantener en un estado de suspensión uniforme antes de su dosificación.

11 INCORPORACION A LA MEZCLA

Los aditivos líquidos se incorporan a la mezcla en la planta, o mediante un tanque colocado en el camión mezclador que permite su adición a la mezcla en obra. La incorporación debe hacerse empleando sistemas dispersantes, de preferencia electromecánicos, y la verificación de la cantidad mediante tanques calibrados.

En la incorporación del aditivo a la tanda no sólo tiene importancia la magnitud y velocidad de descarga, sino también el momento en que ésta se produce. Cambios en el momento de la incorporación del aditivo al ciclo de mezclado pueden significar variaciones en las propiedades del concreto y/o en el grado de efectividad del aditivo.

Los requerimientos de agua de la mezcla igualmente pueden ser afectados, recomendándose que se determine en obra un procedimiento para controlar el tiempo y velocidad de adición del aditivo a las tandas y el mismo sea respetado.

A fin de garantizar uniformidad del aditivo en la mezcla durante el ciclo de carga, la velocidad de descarga del aditivo deberá ser regulable.

Dos o más aditivos pueden no ser compatibles en la misma solución. Es importante evitar mezclar aditivos antes de su incorporación a la mezcla, salvo que los ensayos o el fabricante indiquen lo contrario y la Supervisión lo autorice.

En la programación de obra y en las medidas de precaución a ser tomadas, deberá considerarse el que en algunos casos puede ser necesario incorporar aditivos en la mezcladora en momentos diferentes a los programados.

12. EQUIPO DOSIFICADOR

El equipo dosificador debe permitir ciertas tolerancias en la cantidad de aditivo a fin de garantizar un control adecuado de la calidad y comportamiento del concreto. Las variaciones en las propiedades del concreto debidas a las tolerancias deberán ser eliminadas.

El rango en la tolerancia en las dosificaciones en volumen deberá estar dentro del 3% requerido, o media onza fluída (15ml), cualquiera de las dos que sea mayor. El rango en la tolerancia en las dosificaciones en peso deberá estar dentro del 3% de la cantidad requerida.

Las cantidades pesadas no deberán ser menores que 0.3% de la capacidad de la balanza ni exceder del 3% del peso requerido. La correcta aplicación de estos criterios exige que la capacidad de los equipos dispersantes sea seleccionada en función de la dosificadora.

De acuerdo al sistema de dosificación los aditivos pueden ser agrupados en:

- a) Aquellos que se incorporan a la mezcladora en forma líquida y pueden ser dosificados en peso o en volumen; y
- b) Aditivos en polvo, los cuales se dosifican en peso, son añadidos en cantidades muy pequeñas y, a menudo, se incorporan a la mezcla en peso.

Los sistemas de dosificación de aditivos pueden ser manuales, semiautomáticos y automáticos. Existen diversos procedimientos y equipos para la dosificación de aditivos líquidos, algunos de los cuales pueden ser fácilmente empleados con sistemas manuales y semiautomáticos.

13. MANTENIMIENTO Y PROTECCION

Los sistemas de dosificación de aditivos requieren mantenimiento rutinario periódico. Es importante protegerlos del polvo y las temperaturas extremas. Sus componentes deben ser fácilmente accesibles para observación visual y mantenimiento.

Es recomendable que los operarios de la planta conozcan el sistema de dosificación; estén en capacidad de calibrarlo periódicamente; puedan identificar las partes que requieren reemplazo; y sepan aplicar un mantenimiento primario.

En todos los casos la protección no sólo es necesaria en el sistema de entrega del aditivo, a fin de proteger de daños a la tubería y el sistema de medición, sino también en los tanques de almacenamiento y mezclado a fin de garantizar que la solución no se separe o cambie su concentración.

Deberá proporcionarse protección a las soluciones cuando se trabaja en climas de baja temperatura, a fin de evitar modificaciones en el comportamiento de las mismas. La congelación de los aditivos deberá ser evitada y si, por razones de congelación, el tanque de almacenamiento tiene que ser calentado, deberá tenerse cuidado para evitar:

- Sobrecalentamiento del aditivo.
- Formación de gases explosivos.
- Congelación del aditivo y daño del equipo.
- Ambientes de almacenamiento por debajo de la temperatura de congelación.
- Variaciones en la viscosidad del aditivo.
- Descalibración del equipo dispersante.
- Ablandamiento y/o rotura por calentamiento de las tuberías y material plástico.

14. ACELERANTES

14.1 DEFINICION

Se define como aditivos acelerantes a aquellos productos químicos que incorporados a la mezcla permiten:

- a) Reducir el tiempo de fraguado:
- b) Lograr incrementos significativos en la resistencia inicial del concreto:
- c) Reducir los períodos de curado y protección necesarios para alcanzar una resistencia determinada en el concreto; y
- d) Trabajar el concreto en mejores condiciones durante los períodos de baja temperatura ambiente.

14.2. REQUISITOS DE UN ADITIVO ACELERANTE

La definición de un aditivo acelerante no es la misma en las diferentes Normas. Los atributos de un acelerante son descritos en forma diversa, pudiendo incluir:

- Aceleración del fraguado inicial;
- Aceleración del fraguado final;
- Desarrollo temprano de la resistencia;
- Desarrollo rápido de la reacción inicial;
- Desarrollo de una baja resistencia final.

Como el término lo indica, un acelerante deberá incrementar la velocidad de desarrollo de ciertas propiedades características del cemento y/o el concreto, sin que ello signifique que deberá necesariamente afectar a cada una de las diversas propiedades de la misma forma simultáneamente.

Así, en el sentido químico, la aceleración podría ser considerada como un incremento en la velocidad de reacción; en el sentido físico como un incremento en la velocidad de fraguado o en los cambios de volumen; en el sentido mecánico como un incremento en la velocidad de desarrollo de resistencia.

Estos cambios pueden no ocurrir a la misma velocidad y en igual magnitud en la totalidad del período de hidratación. El mismo aditivo puede tener diferentes efectos, o aún opuestos, dependiendo del tiempo y condiciones de experimento, así como del volumen y composición del material.

En general se acepta que la aceleración de la hidratación del cemento deberá significar una correspondiente ganancia en la resistencia. Sin embargo no siempre es así, y los estudios efectuados utilizando porcentajes del 1%, 2% y 3% de cloruro de calcio indican que durante el proceso de hidratación inicial un efecto de hidratación máxima se obtiene con un porcentaje del 3.5%. Sin em-

bargo no ocurre una correspondiente ganancia en la resistencia. De hecho, la experiencia de laboratorio indica que para dicho porcentaje ocurren los menores valores de desarrollo de la resistencia.

El cloruro de calcio el más importante de los acelerantes, es considerado como un acelerante del fraguado del cemento, aunque la literatura inicial lo considerase como un retardador de fragua, dado que la experiencia de laboratorio indica que en determinadas condiciones el cloruro de calcio puede actuar como un retardador. Este es el caso cuando se utiliza cementos de alto contenido de alúmina, cementos a base de calcio-alumino-fluorita, y cementos de escorias.

Es igualmente importante recordar otro aspecto. Aunque la adición de un acelerante puede acelerar el fraguado y endurecimiento del cemento, ello no debe significar que cuando es añadido a los componentes individuales del cemento actúa siempre como un acelerante. Por ejemplo, el cloruro de calcio retarda la hidratación de la fase aluminato tricálcico, aunque actúa como un acelerante de la hidratación de la fase sílice.

El grado de aceleración, determinado a través de cambios en las propiedades químicas, físicas o mecánicas de la pasta, depende igualmente del intervalo considerado para los cálculos. Así, en el período inicial de hidratación de la fase silicato tricálcico, en mezclas con una relación agua-cemento de 0.3, la máxima aceleración en términos de resistencia ocurre con una adición de 2% de cloruro de calcio. Sin embargo, entre los 7 y 28 días, las pastas con 5% de cloruro de calcio parecen obtener las mayores aceleraciones.

Es importante indicar que si un acelerante es definido como un aditivo que incrementa la velocidad de formación de productos de hidratación normales, entonces agentes acelerantes tales como el fluorsilicato de calcio, silicatos alcalinos, aluminatos y carbonatos, todos los cuales producen fraguado acelerado del concreto, deberían ser excluidos de la calificación de acelerantes dado que su acción comprende la formación de compuestos insolubles por reacción química con el hidróxido de calcio formado por la hidratación del cemento.

La determinación del efecto acelerante del aditivo basándose en la velocidad de hidratación requiere de la aplicación de procedimientos adecuados. El método basado en la estimación del contenido de hidróxido de calcio asume que la composición de la fase C-S-H permanece constante. Aunque este procedimiento podría ser adecuado para la hidratación del cemento, es menos seguro en aquellos casos en que hay presencia de cloruro de calcio ya que, en presencia de cantidades importantes de éste, entran más iones Ca en la fase C-S-H, formando un producto que tiene una relación C/S mayor que la normal.

La determinación del grado de hidratación sobre la base del consumo de los compuestos anhidros del cemento puede ser un procedimiento más seguro,

debiendo recordarse que puede tener algunas limitaciones prácticas de seguridad.

El método basado en el contenido de agua no evaporable asume que los productos de hidratación del cemento son prácticamente los mismos en la presencia de un acelerante. Sin embargo, éste método es poco seguro para estimar la magnitud de la hidratación de cementos que contienen grandes cantidades de cloruro de calcio.

Las implicancias anteriores, referidas al efecto acelerante, pueden igualmente extenderse a otros cambios que ocurren durante la hidratación del cemento, tales como área superficial, densidad, reacciones de interconversión, cambios de volumen, resistencia en flexión, módulo de elasticidad, porosidad y escurrimiento plástico.

14.3. VENTAJAS

La aceleración del desarrollo inicial de resistencia permite:

- a) Un desencofrado más rápido.
- b) Acortamiento en el período de protección del concreto.
- c) Rápido acabado o reparación de la estructura.
- d) Compensación de los efectos de las bajas temperaturas sobre el desarrollo de resistencia.

Los beneficios de una reducción en el tiempo de fraguado incluyen:

- a) Operaciones de acabado superficial más rápidas.
- b) Reducción temprana en la presión sobre los encofrados.
- c) Rápido taponeo de fallas debidas a presión hidráulica.

14.4. PRECAUCIONES

Los aditivos acelerantes nunca deberán ser empleados como agentes anticongelantes para el concreto, dado que en las cantidades normalmente empleadas disminuyen el punto de congelación del concreto solamente en una cantidad despreciable, menos de 2°C.

El acelerante más conocido es el cloruro de calcio pero, debido a su tendencia a promover la corrosión del acero, su empleo no es recomendado en determinados casos.

Aditivos acelerantes no corrosivos y sin cloruros, determinados nitratos, formiatos, y nitritos ofrecen alternativas al usuario, aunque pueden ser menos efectivos y son más caros que el cloruro de calcio.

Otros productos químicos que aceleran la velocidad de endurecimiento del con-

creto incluyen la trietanolamida y una variedad de sales solubles tales como cloruros, bromuros, fluoruros, carbonatos, silicatos y tiocianuros.

14.4. CLASIFICACION DE LOS ACELERANTES

14.4.1. GRUPOS DE CLASIFICACION

Las Normas Norteamericanas agrupan a los acelerantes en cuatro grandes grupos:

- a) Sales solubles inorgánicas.
- b) Compuestos solubles orgánicos.
- c) Aditivos de fraguado rápido.
- d) Aditivos sólidos diversos.

14.4.2. SALES SOLUBLES INORGANICAS

Entre las sales solubles inorgánicas que tienen efectos acelerantes del fraguado del cemento portland se encuentran cloruros, bromuros, fluoruros, carbonatos, nitratos, sulfatos, silicatos, aluminatos, e hidróxidos alcalinos. De todas ellas el cloruro de calcio es la sal más empleada por su bajo costo y por su importancia.

Se ha postulado que los acelerantes inorgánicos actúan fundamentalmente por aceleración de la hidratación del silicato tricálcico. Igualmente se indica que en las mezclas de concreto preparadas con cemento portland las cuales contienen cloruro de calcio, el sulfato de calcio se combina con el aluminato de calcio para formar etringita y el cloruro de calcio se combina con el aluminato de calcio para formar cloroaluminato de calcio.

El empleo de cloruro de calcio reduce el tiempo de fraguado al acelerar la hidratación inicial. Como efectos complementarios se tienen un incremento en el calor de hidratación durante el primer día, con incremento o reducción posteriores de acuerdo al tipo de cemento; y un incremento en la resistencia inicial con disminución en la resistencia a los 28 días.

La incorporación de sulfatos de amonio o potasio a la mezcla acelera el proceso de hidratación en las primeras horas, disminuyéndolo posteriormente.

Puede acelerarse la hidratación durante las dos primeras horas si se adiciona hidróxido de sodio a la mezcla.

Algunos de los aditivos de este grupo son empleados para producir morteros o concretos de fragua muy rápida, utilizados para sellado, parchado o reparaciones de emergencia.

14.4.3. COMPUESTOS ORGANICOS SOLUBLES

Entre los compuestos solubles orgánicos se encuentran la trietanolamida y el cloruro de calcio. Comunmente son empleados para compensar los efectos retardantes de los aditivos reductores de agua o proporcionar acelerantes no corrosivos. Estos aditivos afectan la contracción por secado en forma similar al cloruro de calcio.

Se ha reportado propiedades acelerantes para el acetato de calcio, propionato de calcio, y butirato de calcio, pero las sales de los más altos ácidos hidróxido carboxílicos homólogos son retardadores.

La urea, el ácido oxálico, el ácido láctico, y compuestos condensados de aminas y formaldeído son compuestos orgánicos que aceleran el fraguado del cemento portland cuando se emplean en mezclas de baja relación agua-cemento. Se puede experimentar un severo retardo cuando la cantidad de estos compuestos empleada en la mezcla es excesiva.

La trietanolamida es un catalizador cuya función es favorecer la reacción química deseada, sin ser ella modificada o consumida. Se ha comprobado que su presencia en la mezcla tiende a incrementar la resistencia del concreto en todas las edades. La trietanolamida es aparentemente más efectiva cuando se emplea con cementos ricos en aluminato tricálcico, cuya hidratación acelera, aunque retarda la del silicato tricálcico.

La trietanolamida es empleada como un constituyente en determinados aditivos, fundamentalmente porque reduce la excesiva acción retardante de los aditivos reductores de agua. Ello no significa que si es empleada sola deberá acelerar la reacción total del cemento.

La trietanolamida, de acuerdo a la cantidad empleada, puede actuar como un retardador o acelerante en la hidratación del cemento. Cuando la trietanolamida es empleada en porcentajes de 0.01% a 0.05% practicamente no tiene efecto sobre el tiempo de fraguado del cemento. En el rango de 0.1% a 0.5%, puede ocurrir un fraguado muy rápido debido a la formación acelerada de la fase etringita. Sin embargo, en el rango de valores indicados ella actúa como un retardador de la hidratación de la fase silicato tricálcico.

El hecho que la trietanolamida actúa en forma diferente al cloruro de calcio es evidenciado por las experiencias de laboratorio las cuales muestran que las pastas y morteros que contienen trietanolamida en porcentajes de 0.1% a 1% presentan una resistencia en compresión mucho menor que aquellas muestras que no contienen este aditivo.

Independientemente de sus ventajas su empleo es muy pequeño debido a su alto costo, que es un factor determinante en su poco uso aún cuando ella no promueva o favorezca la corrosión del acero de refuerzo.

El formiato de calcio ha sido muy empleado y se cuenta con un conjunto de resultados relacionados con su influencia sobre el concreto. Aunque el formiato de calcio actúa como un acelerador de la hidratación del silicato de calcio, él no es tan eficiente como el cloruro de calcio.

La producción de etringita es mayor en las mezclas que contienen formiato de calcio, dependiendo la efectividad de éste del contenido de sulfatos del cemento y de la relación aluminato tricálcico a sulfatos, poseyendo las mejores condiciones para que el formiato de calcio acelere el desarrollo de resistencia en las edades iniciales los cementos con bajo contenido de sulfatos. Si el valor de la reacción $C3A/SO_3$ es mayor de 4.0, el formiato de calcio tiene un buen potencial para acelerar la resistencia del concreto.

Los resultados de los ensayos en el calorímetro sugieren que para los mismos porcentajes de adición y período inicial de hidratación, el cloruro de calcio desarrolla más calor que el formiato de calcio.

Una extrapolación de laboratorio ha demostrado que, para igual porcentaje de hidratación, la adición de 1% de cloruro de calcio es tan efectiva como la de 2% de formiato de calcio. En general, en los dosajes recomendados por los fabricantes, las resistencias obtenidas con los aditivos que no contienen cloruro de calcio son menores que aquellas obtenidas cuando se emplea 1.5% de cloruro de calcio.

14.4.3. ADITIVOS SOLIDOS DIVERSOS

Este grupo incluye materiales sólidos diversos, tales como los cementos calcio-aluminosos y cementos hidratados finamente molidos. En determinados casos se ha empleado los cementos hidráulicos en lugar de aditivos acelerantes.

Los cementos calcio-aluminosos pueden acortar el tiempo de fraguado de los concretos a base de cemento portland cuando éste interviene en porcentajes de reemplazo del 5% al 20% en peso. En este tipo de mezclas la resistencia al día disminuye; la contracción por secado y la expansión bajo agua son mayores; y la durabilidad del concreto puede ser seriamente afectada.

En algunos países, especialmente Francia se ha reportado experiencias del «sembrado» de concretos de cemento portland con 2% en peso de cemento hidratado finamente molido, preparado en base a pastas de cemento con agua de consistencia normal, lográndose resultados equivalentes a la incorporación de 2% de cloruro de calcio, con la ventaja de eliminar el riesgo de corrosión, incrementar la resistencia a los 90 días y no aumentar la corrosión.

El incremento de resistencia obtenido empleando este tipo de aditivos es debido a que se distribuye en la pasta, en el momento del mezclado, minúsculos cristales ya hidratados, los cuales aparentemente forman núcleos alrededor de los cuales la cristalización es muy rápida. El empleo conjunto de estos cementos hidratados y cloruro de calcio, ambos en 2% en peso del cemento, adiciona sus efectos.

Los silicatos de amonio solubles cuando se emplean en forma de un gel finamente dividido, aceleran el desarrollo de resistencia, presumiblemente debido a una aceleración de la hidratación del silicato tricálcico.

Se ha propuesto el empleo del carbonato de magnesio o del carbonato de calcio finamente molidos para acelerar el tiempo de fraguado de ligantes hidráulicos.

14.4.4. ADITIVOS DE FRAGUA INSTANTANEA

Los aditivos de fragua instantanea están diseñados para promover la fragua muy rápida del aluminato tricálcico y son empleados para producir morteros de fraguado instantaneo o concretos adecuados para operaciones de torcretado, sellado de grietas, u otros fines.

Entre los aditivos empleados para producir la fragua instantanea están la sales ferricas, el fluoruro de sodio, el cloruro de aluminio, el aluminato de sodio, y el carbonato de potasio. Estos productos son disponibles en el mercado en forma líquida o en polvo, para ser mezclados con el cemento.

En el caso del torcreto, los acelerantes empleados se basan en aluminatos, silicatos y carbonatos solubles. Estos materiales son muy causticos y pueden ser dañinos para la salud de los trabajadores.

En las mezclas empleadas en el torcreto, cuando se aplica por procedimiento húmedo, el acelerante de fragua rápido es añadido a la boquilla durante el disparo. La mezcla rigidiza y alcanza, muy rápidamente, su fragua inicial.

14.5. CONSIDERACIONES DE EMPLEO

Los aditivos acelerantes son útiles para modificar las propiedades del concreto, especialmente en climas fríos, a fin de:

- a) Facilitar el inicio de las operaciones de acabado y la aplicación de aislamiento para protección.
- b) Reducir el tiempo requerido para un apropiado curado y protección del concreto.
- c) Incrementar la velocidad de desarrollo inicial de resistencia, permitiendo un rápido retiro de los encofrados y una rápida puesta en servicio de la construcción.

- d) Permitir un más rápido control de las pérdidas debidas a la presión hidrostática; y
- e) Acelerar el tiempo de fraguado del concreto colocado por torcretado.

El empleo de acelerantes en climas fríos usualmente no es suficiente por si mismo para controlar los efectos propios de las bajas temperaturas. Es por ello que las recomendaciones para concretos en bajas temperaturas incluyen usualmente prácticas tales como la incorporación de aire, el calentamiento de los ingredientes, aislamiento adecuado, y aplicación de calor externo.

Los acelerantes deben ser utilizados con precaución en climas cálidos a fin de evitar una rápida evolución del calor debida a la hidratación, fraguado rápido, y un incremento en el agrietamiento por contracción.

Los aditivos acelerantes nunca deberán ser empleados como agentes anticongelantes del concreto.

14.6. EFECTOS SOBRE EL CONCRETO FRESCO

Los efectos de los aditivos acelerantes sobre el concreto no endurecido incluyen los siguientes aspectos:

14.6.1. TIEMPO DE FRAGUADO

Reducción en los tiempos de fraguado inicial y final, la misma que varía con la cantidad de acelerante, la temperatura del concreto, la temperatura y humedad relativa ambiente, y las características de los otros materiales empleados en el concreto.

El empleo de una excesiva cantidad de algunos materiales acelerantes puede originar un fraguado o retardo muy rápido. El empleo de determinados aditivos permite obtener tiempos de fraguado tan cortos como 15 á 30 segundos.

Existen en el mercado norteamericano mezclas de cemento, agregado y acelerante, listas para ser empleadas, las cuales tienen una fragua inicial de uno a cuatro minutos y una fragua final de tres a diez minutos. Estos morteros se utilizan en el sellado de grietas, para parchados y para reparaciones de emergencia. La resistencia final de tales morteros es mucho menor que si no se emplease acelerantes.

La concentración del aditivo es importante. Para adiciones del 6% en peso del cemento, el nitrato de calcio comienza a mostrar propiedades retardantes. El cloruro ferrico es un retardador en adiciones de 2% a 3% en peso, pero actúa como un acelerante en adiciones del 5%. El empleo del cemento calcio aluminoso como aditivo puede causar fragua instantanea dependiendo del dosaje empleado. La temperatura ambiente también puede ser un parámetro importante en el

desarrollo del fraguado. Así por ejemplo, el cloruro de calcio tiene mayor y mejor efecto entre 0C á 5C que a 25C.

14.6.2. INCORPORACION DE AIRE

Cuando se emplea acelerante puede requerirse menor cantidad de aditivo incorporador de aire para obtener la cantidad de aire deseada en la mezcla. En algunos casos pueden obtenerse burbujas de gran tamaño y factores de espaciamiento más altos por lo que puede disminuir el efecto benéfico que se deseaba obtener por la incorporación de aire.

La evaluación del concreto que contiene ambos aditivos deberá ser efectuada a fin de verificar los parámetros de tamaño de las burbujas de aire, factor de espaciamiento y resistencia a los procesos de congelación, empleando lo indicado en las Normas ASTM C 457 y C 666 respectivamente

14.6.3. DESARROLLO DE CALOR INICIAL

El empleo de aditivos acelerantes en la mezcla origina un mayor desarrollo de calor inicial debido a la hidratación del cemento más rápido sin efecto apreciable sobre el calor total de hidratación desarrollado.

14.7. EFECTOS SOBRE EL CONCRETO ENDURECIDO

14.7.1. EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA

Los efectos de los aditivos acelerantes sobre el concreto endurecido incluyen en el caso de la resistencia: Incremento significativo en la resistencia en compresión inicial, que pueden estar en el rango del 100% al 200%, sin cambios importantes en la resistencia final. El efecto en la resistencia a la flexión es menor.

Efecto aún no claramente determinado de diversas sales, que no sean cloruro de calcio, sobre el desarrollo de resistencia, dado que algunas de ellas que aceleran el tiempo de fraguado pueden disminuir la resistencia del concreto aún en edades tan tempranas como el primer día. Algunos silicatos, carbonatos y aluminatos están en la categoría indicada.

Los acelerantes orgánicos del tipo de la trietanolamida y el formiato de calcio parecen ser sensibles, en su acción acelerante, a las características específicas de la mezcla a la cual son añadidos.

La resistencia al día de pastas puras, morteros o concretos, preparados con mezclas de cemento portland y cementos calcio aluminosos, generalmente es menor que la que se obtendría de cualquiera de los dos cementos trabajados independientemente.

Incrementos en la resistencia a los 90 días hasta en un 20% a 25% cuando se utiliza el proceso de «sembrado» del cemento portland con 2% en peso del cemento del producto de la molienda muy fina del cemento hidratado.

14.7.2. CAMBIOS DE VOLUMEN

Los estudios de Laboratorio indican que los aditivos acelerantes producen un incremento en los cambios de volumen tanto en curado húmedo como bajo condiciones de secado. El cloruro de calcio incrementa el escurrimiento plástico y la contracción por secado del concreto.

Los cambios indicados dependen de la longitud del tiempo de curado antes de iniciar las mediciones, el tiempo de los períodos de curado, secado y carga y de la composición del cemento empleado. Los cambios en la magnitud de la deformación son mayores que los cambios en el volumen total de la deformación.

La contracción por secado y el aumento de volumen en agua son mayores para mezclas que contienen conjuntamente cemento portland y cemento calcio aluminoso, y su durabilidad puede ser afectada adversamente por el empleo de un aditivo acelerante.

14.7.3. DAÑOS POR CONGELACION

Los efectos de un aditivo acelerante sobre el concreto endurecido incluyen, en el caso de la durabilidad:

La resistencia al deterioro originado por ciclos de congelación y deshielo, así como al descascaramiento debido al empleo de sales descongelantes, pueden ser incrementadas en las primeras edades en aquellos casos en que se emplea aditivos acelerantes en las mezclas.

La resistencia al ataque de los sulfatos disminuye cuando las mezclas a base de cemento portland contienen cloruro de calcio.

Incremento en la expansión debida a la reacción álcali-agregados si se emplea cloruro de calcio. Esta acción puede ser controlada cuando se emplea agregados no reactivos, cementos de bajo contenido de álcalis, o determinadas puzolanas.

14.4.5. CORROSION DE LOS METALES

Una de las mayores desventajas del cloruro de calcio es su tendencia a favorecer la corrosión de los metales en contacto con el concreto debido a la presencia de ion cloruro húmedo y oxígeno.

Las consideraciones sobre el efecto corrosivo del cloruro de calcio han obligado

a desarrollar aditivos que tengan las propiedades acelerantes de resistencia del cloruro de calcio sin tener su acción corrosiva potencial. Así, se han presentado formulaciones basadas en el formiato de calcio como un inhibidor de la corrosión.

Se ha reportado el empleo de cloruro estañoso, cloruro férrico, tiosulfato de sodio, nitrito férrico y nitrito de calcio, como inhibidores de la corrosión del acero de refuerzo con efecto acelerante sobre el tiempo de fraguado y el endurecimiento.

Es importante recordar que no todos los acelerantes que no contienen cloruro de calcio son necesariamente no corrosivos, siendo ejemplo de ello el tiocianuro. Si el aditivo acelerante contiene este producto deberán efectuarse ensayos sobre corrosión potencial del acero de refuerzo, incluyéndose interrelaciones entre dosajes del aditivo y corrosión del acero.

14.7. RECOMENDACIONES FINALES

En el empleo de aditivos acelerantes en mezclas de concreto deberán tenerse en consideración los siguientes aspectos finales:

- a) Deberán efectuarse los ensayos usuales de control de calidad del concreto. Si se presentan dificultades en los procesos de consolidación o acabado del concreto, deberá comprobarse el porcentaje de acelerante.
- b) La cantidad exacta de aditivo acelerante requerida para obtener la necesaria aceleración del tiempo de fraguado y del desarrollo de resistencia, depende de las recomendaciones del fabricante, de las condiciones locales y de los materiales empleados
- c) Las proporciones de los materiales que integran la mezcla de concreto no se modificarán por el empleo de un aditivo acelerante. Se debe restar el agua en que está disuelto el aditivo de la de la mezcla, a fin de no modificar la relación agua-cemento ni la trabajabilidad y consistencia.
- d) El empleo de un aditivo acelerante, con el consiguiente incremento en la resistencia, no justifica por si mismo la disminución en el contenido de cemento.
- e) Si no se dispone de la información adecuada deberán efectuarse ensayos para evaluar los efectos del acelerante sobre las propiedades del concreto en obra, empleando los materiales y procesos constructivos que se espera utilizar. Se deberá determinar si el aditivo seleccionado contiene o no cloruro de calcio a fin de determinar la capacidad potencial de corrosión.
- e) Los acelerantes deberán cumplir con los requisitos que indica la Norma ASTM C 494 para los tipos C ó E. El cloruro de calcio, sólido o líquido, deberá cumplir también con los requisitos de la Norma ASTM D 98.

15. AIRE INCORPORADO

15.1. CONCEPTO

A diferencia del aire accidentalmente atrapado en la masa de concreto, el aire incorporado es aquel que ha sido intencionalmente añadido a la mezcla mediante el empleo de un aditivo apropiado.

Este acápite está referido a aquellos agentes conocidos como aditivos incorporadores de aire los cuales son añadidos al concreto inmediatamente antes o durante su mezclado, especialmente para resistir la acción de procesos de congelación y deshielo.

Adicionalmente a su función principal, deberá emplearse aditivos incorporadores de aire en aquellos casos en que se emplee agentes químicos descongelantes, especialmente cuando se anticipa el empleo de cloruros de calcio o de sodio para esta función. Los pavimentos, pisos de garajes, y playas de estacionamiento están expuestos a esta condición si se encuentran en zonas de baja temperatura.

El mecanismo de congelación y la forma de acción del aire en el concreto serán analizados en este trabajo, teniendo presentes la influencia de los materiales, el proceso de puesta en obra, y el control de calidad.

15.2. HISTORIA

Los tratadistas han vinculado el empleo de aire incorporado con la construcción de las grandes obras del Imperio Romano al hacer referencia a los escritos de Marco Antonio Polión, arquitecto romano del Siglo 1 A.C., quién especifica que para las argamasas «se preparará una mezcla de cal hidratada, marmolina o polvo de marmol y arena blanca, con agua a la cual se añadirá ya sea grasa de chanco, leche cortada o sangre». Como se conoce, las grasas se incluyen en el grupo de los agentes incorporadores de aire.

Alrededor de 1930 se observó, en la ciudad de Nueva York, que aquellos pavimentos en los cuales se había reemplazado en la mezcla de concreto un saco de cemento portland por uno de cemento natural, mostraban una mayor resistencia al descascaramiento que se producía cuando se empleaban sales para remover el hielo. Esta acción se atribuyó a la presencia del cemento natural.

En 1935, el investigador IRA demostró que los testigos extraídos de pavimentos tenían una mayor resistencia a los procesos de congelación y deshielo cuando la mezcla contenía cemento portland el cual se había mezclado con cemento natural que, a su vez, contenía aproximadamente 0.07% de grasas. La disminución en el peso unitario de estos concretos llevó a la conclusión que las losas más resistentes a la acción del intemperismo contenían un porcentaje mayor

de aire. IRA descubrió en el laboratorio que determinados elementos auxiliares empleados en la fabricación del cemento natural incorporaban aire al concreto y surgió la teoría que el aire incorporado, más que el cemento natural, era el responsable de la mayor resistencia a los agentes intempéricos.

El primer trabajo que relaciona los ensayos de congelación y deshielo con el contenido de aire del concreto se publicó por la Portland Cement Association en 1938. Pero el término «cemento con incorporador de aire» no se empleó hasta 1941, después que la misma entidad creó el Comité encargado de estudiar el comportamiento de los cementos, época en que este tipo de cementos era conocido como «cementos tratados».

En 1940 este Comité establece conceptos fundamentales al señalar que «Tanto la resina vinsol como las grasas reducen el peso unitario del concreto al incorporar aire, distribuido a través de toda la masa en forma de burbujas microscópicas... La reducción en la resistencia a la compresión y en el peso unitario del concreto, resultantes del incremento en la resistencia a la congelación del concreto, puede parecer contradictoria dado que generalmente se acepta que cuanto más denso y resistente es el concreto mayor es su durabilidad. El principio que la durabilidad se incrementa con la resistencia es válido en tanto que los requisitos para fabricar un buen concreto se satisfagan pero, más allá de este punto, la teoría de que la resistencia es un índice de durabilidad no es cierta».

A partir de esa fecha, los estudios sobre los efectos de la incorporación de aire sobre las propiedades del concreto, así como aquellos referidos a los diferentes tipos de agentes incorporadores de aire, han continuado en forma creciente, considerándose a fines del Siglo XX que las teorías sobre la incorporación de aire y sus efectos en las propiedades del concreto son uno de los más importantes avances en la Tecnología del Concreto desde que Abrams, en 1918, formuló la teoría de la relación agua-cemento y su efecto sobre la resistencia.

15.3. ORIGEN DEL AIRE EN EL CONCRETO

El grado de diferenciación entre un concreto con aire y otro sin él depende, en primer lugar, del tamaño y espaciamiento de las burbujas de aire que se incorporan al concreto durante la mezcla y, en segundo lugar, de la velocidad con que dichas burbujas cambian en número y tamaño durante los procesos de manipulación y colocación de la mezcla que preceden al endurecimiento del concreto.

Ello establece una primera premisa, esto es que desde que el sistema de burbujas de un concreto fraguado es solamente el resultado de la calidad de las burbujas presentes al tiempo del endurecimiento, es conveniente conocer el proceso que controla la producción de burbujas y su posterior comportamiento antes que el concreto frague.

De acuerdo a los estudios de Mielenz, el aire presente en los vacíos de la pasta de un concreto no endurecido puede tener su origen en cuatro causas principales:

- a) El aire que originariamente ha estado presente en los espacios intergranulares del cemento y agregados y que no ha sido eliminado por el proceso de mezclado.
- b) El aire que habiendo estado originariamente presente en los espacios intergranulares del cemento y agregados, ha sido posteriormente expelido de los mismos, antes del endurecimiento del concreto, debido movimientos internos del agua sujeta a tensiones hidráulica y capilar.
- c) El aire originalmente disuelto en el agua de la mezcla.
- d) El aire que es incorporado dentro de la masa de concreto durante los procesos de mezcla y colocación.

Se emplee o no un aditivo incorporador de aire, las anteriores son las únicas cuatro fuentes principales de origen de las burbujas de aire presentes en la pasta de concreto.

Debido a que están atrapadas en el conjunto de la masda de agregado y además pueden adherirse a las partículas de éste, así como a las del cemento, una proporción importante de las burbujas de aire generadas por las operaciones de mezcla y colocación permanece dentro del concreto.

Debe recordarse que para una mezcla adecuadamente diseñada, el agregado constituye una estructura granular continua dentro de la cual la pasta y las burbujas de aire están intercaladas. El aire contenido en dichas burbujas sólo puede escapar de esta estructura granular por desplazamiento de los espacios intergranulares debido a la acción de la subpresión durante los procesos de colocación y compactación del concreto.

15.4. AIRE ATRAPADO Y AIRE INCORPORADO

15.4.1. CONCEPTO

El aire presente en la masa del concreto puede variar entre dos extremos en su relación con la estructura granular del concreto:

- a) Por una parte pueden presentarse masas de aire enteramente rodeadas por partículas de agregado, las cuales pueden estar sometidas únicamente a la presión del agua subyacente; y
- b) Por otro lado, pueden presentarse burbujas encerradas dentro de un mortero de cemento y agregado fino, las cuales no están sometidas a otro tipo de presión que no sea la del concreto que está encima de ellas.

Por regla general, el aire contenido en los vacíos de un concreto o mortero no endurecidos estará sometido a una condición intermedia entre esos dos extremos.

15.4.2. AIRE ATRAPADO

El primer tipo de aire al cual se ha hecho referencia es conocido con los nombres de aire atrapado o aire natural.

Es indudable que la expresión «aire natural» es inapropiada en su aplicación dado que no existe evidencia que indique que un tipo particular de burbujas es parte constitutiva natural de una combinación de agregados, cemento y agua, independientemente de la presencia o ausencia de un aditivo incorporador de aire o del grado de compactación de la mezcla.

Igualmente, el término «aire atrapado» resulta inapropiado para designar al que se encuentra dentro del primer caso en la medida que todo aire contenido en los poros de un concreto plástico está literalmente atrapado.

Sin embargo se acepta este último término debido a la difusión que el mismo ha alcanzado.

Las burbujas de aire atrapado se caracterizan porque su diámetro es mayor de un milímetro y su perfil es irregular, esto último debido a que la periferia de las burbujas sigue el contorno de las partículas de agregado que la rodean.

Las burbujas de aire atrapado:

- a) Son más abundantes en mezclas pobres de concretos sin aire incorporado, especialmente si la arena es pobre en las partículas más finas.
- b) En este tipo de burbujas el aire presente en las mismas está bajo la acción de una doble presión impuesta por la acción de las fuerzas capilares y la hidrostática que corresponde al agua de la mezcla.
- c) Son inefectivas para mejorar la trabajabilidad del concreto debido a que no disminuyen, y mas bien tienden a aumentar, la capacidad de dilatación de la masa que es necesario manipular.

15.4.3. AIRE INCORPORADO

Las burbujas de aire incorporado, segundo tipo presente en la pasta del concreto, son retenidas en el mismo como resultado de la adherencia, por fuerzas químicas superficiales, a las partículas de cemento y agregado, así como por la viscosidad inherente a la pasta.

Las burbujas de aire incorporado se caracterizan por tener un diámetro que varía entre 10 y 1000 micrones; así como un perfil esférico, o que se aproxima a dicha forma, el cual viene dado por la presión hidrostática a que están sujetas las burbujas por acción de la pasta, agua y agregado fino que las rodea.

Las burbujas de aire incorporado:

- a) Se desarrollan mejor en mezclas ricas que contienen agregado fino bien graduado; y
- b) Mejoran la trabajabilidad de las mezclas debido al incremento en el espaciamiento de los sólidos en la masa y la disminución en la dilatación, y, para cargas que actúan en períodos cortos, facilitan el acomodo de las partículas de agregado.

15.5. DEFINICION DE TERMINOS

15.5.1. INCORPORACION DE AIRE

Efecto que ocurre como resultado del proceso de mezclado de un material incorporador de aire en morteros o concretos.

15.5.2. AIRE INCORPORADO

El aire que es parte de una mezcla como resultado del proceso de incorporación intencional de aire mediante el empleo de un agente químico, con la finalidad de mejorar o modificar alguna propiedad del concreto, especialmente la durabilidad de éste frente a los procesos de congelación.

15.5.3. BURBUJAS DE AIRE

Espacios perceptibles en la mezcla, los cuales al momento de la observación no están llenos con un sólido o un líquido.

15.5.4. BURBUJAS DE AIRE INCORPORADO

Burbujas de aire resultantes de la incorporación de éste. Tales burbujas tienden a ser esféricas en perfil y su rango de tamaños es similar al de las partículas más finas de arena.

15.5.5. BURBUJAS NATURALES

Son las burbujas de aire que no se han originado por la incorporación intencional de éste. Este tipo de burbujas es de tamaño mayor que las anteriores, dentro de un rango similar al de las gravas más pequeñas. Tienden a ser irregulares en perfil.

15.5.6. CONCRETO CON AIRE INCORPORADO

Un concreto al cual se le ha incorporado aire.

15.5.7. AGENTE INCORPORADOR DE AIRE

Una sustancia que causa incorporación de aire cuando se incluye en una mezcla. Este es un término a ser utilizado solamente cuando se desea referirse a sustancias que pueden ser utilizadas tanto como adiciones o como aditivos incorporadores de aire.

15.5.8. ADICION INCORPORADORA DE AIRE

De acuerdo a la definición de la Norma ASTM C 219, es un material incorporador de aire, molido conjuntamente con, o a ser molido conjuntamente con, cemento hidráulico.

15.5.9. ADITIVO INCORPORADOR DE AIRE

Material incorporador de aire que es añadido a la mezcla de concreto al momento que ésta es dosificada para el mezclado.

El Comité ACI 116R define a un agente incorporador de aire como «una adición a los cementos hidráulicos o un aditivo para concretos o morteros, el cual origina la generación de aire que se incorpora al concreto o mortero durante el mezclado, generalmente con la finalidad de incrementar su trabajabilidad o su resistencia a las heladas».

15.5.10 FACTOR DE ESPACIAMIENTO

Medida de la máxima distancia promedio desde un punto de la pasta de cemento a la más cercana burbuja de aire, siendo una indicación de la distancia que el agua debe recorrer durante el proceso de congelación para alcanzar una burbuja de aire protectora.

15.5.11 SUPERFICIE ESPECIFICA

Se define como superficie específica de las burbujas al área superficial total de las mismas por unidad de volumen de aire en el concreto. Se expresa en milímetros cuadrados por milímetro cúbico.

15.6. CARACTERISTICAS DE LAS BURBUJAS

15.6.1. CONDICIONES DE PRESION

El aire encerrado en las burbujas presentes en la pasta no endurecida de un concreto está sometido a una presión mayor que la atmosférica. Ello es debido a:

- a) La presión hidrostática del concreto que está por encima de las burbujas, o

- una parte de ella, así como cualquier otra carga impuesta sobre el concreto.
- b) La curvatura de la interface aire-agua.

En relación con lo indicado en el acápite anterior se tiene que:

- a) La presión resultante del concreto puede variar desde virtualmente cero a muchos kilos por centímetro cuadrado, siendo el incremento del orden de 0.07 kg/cm² por cada 30 cms de altura.
- b) La presión resultante de la tensión superficial en la interface aire-agua está controlada por el diámetro de la burbuja y el espesor de la partícula.
- c) La presión en el interior de una burbuja de aire se incrementa rápidamente conforme el diámetro de la burbuja decrece en valores de 100 micrones. La presión es de 1.7 atmósferas cuando el diámetro es de 4 micrones y de 3.85 atmósferas cuando el diámetro es de un micrón.

15.6.2. SOLUBILIDAD EN AGUA

Tomando como hipótesis de trabajo la ecuación que relaciona la fracción de gas disuelta en agua con el exceso de presión y la Ley de Henry, se ha posido establecer que, para el aire que se encuentra en el agua en forma de burbujas, la tendencia a disolverse se incrementa rápidamente cuando el tamaño de las burbujas disminuye a diámetros por debajo de los 100 micrones, así como que el incremento es extremadamente rápido en diámetros por debajo de los 10 micrones.

Debido a ello, mientras el concreto está en estado no endurecido, el aire que se encuentra en forma de burbujas muy pequeñas está siendo disuelto mucho más rápidamente que aquel que está presente en forma de grandes burbujas, siendo improbable que cualquier burbuja que originalmente tenía un diámetro menor de 10 micrones se conserve.

Son, por lo tanto, las burbujas que en la mezcla fresca tenían diámetros mayores de 10 micrones las que finalmente, en el concreto ya endurecido, han de haber producido las burbujas menores de 10 micrones, siendo la causa fundamental de ello el que la pasta endurece después que el tamaño de algunas burbujas se ha reducido a diámetros menores por acción de la disolución de aire.

15.6.3. INTERCAMBIO DE AIRE

Conforme el aire de las burbujas menores se disuelve el agua se satura rápidamente de éste en relación a las burbujas de radio promedio. Desde este momento hasta que la pasta es lo suficientemente rígida como para producir una estructura relativamente estable, el aire en las burbujas menores que el promedio se disuelve y las burbujas mayores que el promedio tienden a incrementarse debido al escape del aire desde el agua.

Si bien la velocidad con que este intercambio se produce en el concreto aún no está claramente establecida, se sabe que como resultado de este proceso se produce un incremento en el contenido de aire y una disminución en la superficie específica de las burbujas.

15.6.4. EFECTOS DEL INTERCAMBIO DE AIRE

Como resultado final del proceso de intercambio de aire se produce una disminución en el número de burbujas, un incremento en su tamaño promedio y volumen total y una disminución en la superficie específica de las mismas.

Por lo tanto pueden establecerse dos hechos:

- a) Todos aquellos factores que tienden a incrementar el tiempo de fraguado del concreto deberán tender a incrementar el espaciamiento de las burbujas y a disminuir la superficie específica.
- b) Una alta relación de agua a aire deberá incrementar la velocidad con la que las pequeñas burbujas se disuelven, dado que la mayor cantidad de ellas deberá disolverse para producir sobre saturación de aire disuelto en agua.

De acuerdo a los estudios de Powers, con un factor de espaciamiento de 0.254 mm, las burbujas menores de 3 á 4 micrones estarán completamente disueltas antes que el aire comience a ingresar a burbujas mayores.

Igualmente sostiene Powers que una alta relación agua-cemento favorece una más rápida difusión de aire a través de la pasta debido a su mayor fluidez.

En resumen, retardo del fraguado, alta relación agua-aire, alta relación agua-cemento, y alto contenido de agua, deberán hacer más difícil la producción de morteros o concretos en los cuales el factor de espaciamiento sea muy pequeño.

Es en razón de lo anteriormente expuesto que demoras en la colocación del concreto deberán incrementar progresivamente la pérdida de aire durante la compactación, en la medida que dichas demoras permitirán que el intercambio de aire progrese lo suficiente para incrementar el tamaño promedio y facilitar el escape de las burbujas.

15.6.5. VELOCIDAD DE INTERCAMBIO

Si bien no se ha efectuado mediciones de la velocidad con la que el aire pasa de una burbuja a otra mayor se ha establecido, sin embargo, que la velocidad de transmisión del aire de las pequeñas a las grandes burbujas es directamente proporcional a:

- a) El área de la interface aire-agua;
- b) La diferencia de presión entre las burbujas que pierden aire y aquellas que lo ganan;

- c) La solubilidad del aire en agua; y
- d) La velocidad de difusión del aire a través del agua.

E inversamente proporcional a la distancia a través de la cual la difusión ocurre.

La velocidad de transmisión dependerá igualmente de la permeabilidad de la película en la interface aire-agua. Así mismo, las propiedades de la película dependen de las características del agente incorporador de aire, de su concentración y del área de la interface aire-agua en relación al volumen de la fase agua.

Para un sistema de burbujas de aire incorporado, del área superficial efectiva a través de la cual la transmisión de aire tiene lugar depende la distribución por tamaños de las burbujas y deberá variar directamente con la superficie específica de las mismas, al mismo tiempo que variará directamente con el factor de espaciamiento la distancia entre la superficie de las burbujas.

Estudios realizados en las espumas aire-agua han permitido determinar que el área superficial de las burbujas disminuye y el diámetro promedio se incrementa fuertemente durante los primeros minutos después que la espuma se forma.

Es evidente que en un concreto la velocidad de transmisión de aire de las burbujas menores a las mayores es menor que para una espuma aire-agua. Ello es debido a tres factores:

- a) La distancia de burbuja a burbuja es mayor;
- b) La solubilidad del aire en la fase agua es menor que en agua pura, debido a los electrolitos presentes en la solución;
- c) La difusión del aire disuelto probablemente disminuye por la alta viscosidad del agua adyacente a las partículas de cemento hidratado.

Aún así, no existen razones para pensar que el proceso no es importante en la modificación de los parámetros del sistema de vacíos en las pastas.

15.6.6. PAPEL DE LA RELACION AGUA-CEMENTO

Para un cemento dado y una determinada proporción de un aditivo incorporador de aire, debe existir una óptima relación agua-cemento para pastas puras o lechadas, relación en la cual se obtenga un factor de espaciamiento mínimo el cual se mantenga después del endurecimiento.

Para relaciones agua-cemento dentro del rango de 0.3 en peso, la película de agua sobre los granos de cemento será insuficiente para producir una adecuada acción espumante, el proceso de atrapado del aire durante el mezclado será mínimo y una adecuada compactación de la pasta puede ser difícil. Para tales

mezclas el contenido de aire deberá ser más bajo y el diámetro de las burbujas mayor que aquellas que se obtendrían, con la misma proporción de aditivo incorporador de aire, en una relación agua-cemento más alta.

En relaciones agua-cemento intermedias, de 0.4 á 0.6 en peso, se producirán abundantes burbujas de aire en presencia de una proporción adecuada de un aditivo incorporador de aire, siendo el tamaño promedio de las burbujas mayor como consecuencia del intercambio de aire entre las pequeñas y las grandes burbujas, incrementándose este intercambio al aumentar la relación agua-cemento.

En relaciones agua-cemento muy altas, una gran proporción de las burbujas de aire deberán perderse por alargamiento progresivo y escape a través de la mezcla.

De los estudios efectuados por Mielens se ha podido determinar que el contenido de aire de una mezcla no endurecida es menor que aquel que se determina microscópicamente sobre especímenes endurecidos, incrementándose la diferencia entre estos valores de manera progresiva conforme aumenta la relación agua-cemento.

Al respecto Mielens indica que las muestras con una relación agua-cemento de 0.3 aparentemente contienen insuficiente cantidad de agua para permitir una adecuada formación de burbuja y un entrappe de aire durante el mezclado. En este caso el contenido de aire será bajo y el factor de espaciamento alto. Con posterioridad a la colocación del concreto, el contenido de aire se incrementará en 1.1% como consecuencia del intercambio de aire.

Mielenz indica que para contenidos de agua-cemento del orden de 0.4 se han obtenido valores óptimos del factor de espaciamento, siendo el área superficial y la frecuencia de burbujas mayores e, igualmente, incrementándose el contenido de aire en 1,6% antes del endurecimiento del concreto.

Igualmente señala que el factor de espaciamento se incrementa progresivamente con incrementos en la relación agua-cemento de 0.5 y 0.6, así como que el contenido de aire, después de la colocación, se incrementa en 2.4% y 5.5% respectivamente.

15.6.7. CONTENIDO DE ALCALIS

Muchos agentes incorporadores de aire producen, en la interface aire-agua, en presencia de iones calcio, una película compuesta principalmente de la sal cálcica del constituyente principal activo del agente. Dicha película puede variar en propiedades tales como permeabilidad al aire, resistencia y elasticidad, con cambios en la composición y espesor de la película.

Debido a que las altas concentraciones de álcalis en las soluciones que se desarrollan durante la hidratación del cemento tienden a disminuir fuertemente la concentración de calcio en la solución, es de esperar que aquellos cementos que proporcionan rápidamente una alta concentración de iones sodio o potasio en la solución puedan causar, en la interface aire-agua películas más delgadas y solubles que aquellas que se desarrollan en presencia de cementos de bajo contenido de álcalis.

Sobre la base de experiencias de laboratorio se ha podido determinar que se presenta un fuerte incremento en el factor de espaciamiento, así como una gran disminución en el área superficial de las burbujas, en cementos con porcentajes mayores del 1% de óxido de sodio. Siendo la proporción de aire incorporado idéntica, los álcalis pueden disminuir el número de burbujas de diámetro menor.

15.6.8. PROCEDIMIENTO DE TRABAJO

Si se siguen las recomendaciones del método de diseño de mezclas elegido, se asegurará un sistema de burbujas satisfactorio siempre que el aditivo empleado cumpla con los requisitos establecidos en la Norma ASTM C 260. Bajo las condiciones anteriores, el factor de espaciamiento de 0.1 a 0.2 mm y la superficie específica del sistema de burbujas variará de 600 a 1100 pulgadas cuadradas por pulgada cúbica.

15.7. OPTIMO CONTENIDO DE AIRE

Para cada mezcla de concreto existe un volumen mínimo de burbujas que se requiere para obtener protección contra las heladas. En relación con ello se ha determinado dos hechos importantes:

- a) Se ha demostrado, por Klieger, que este volumen corresponde al 9% del volumen del mortero siendo, de hecho, esencial que el aire esté distribuido a través de la pasta de cemento; y
- b) El factor de espaciamiento, espesor de la pasta entre burbujas de aire adyacentes, se considera el elemento determinante, estimando Powers que un espaciamiento de 0.25 mm entre burbujas es el mínimo requerido para obtener protección contra la acción destructiva de la congelación.

El tamaño de las burbujas depende en forma importante del proceso de formación de espuma. Como, de hecho, las burbujas no son de un solo diámetro se expresa su graduación en términos de superficie específica, dada en milímetros cuadrados por milímetro cúbico.

En relación con lo anterior debe siempre tenerse presente que en cualquier concreto existe aire atrapado, tenga o no aire incorporado, y no siendo fácil la distinción entre las dos clases de burbujas, la superficie específica representa un valor promedio para todas las burbujas de una pasta dada.

Para concretos con aire incorporado de calidad satisfactoria, la superficie específica de las burbujas está en el rango de 400 á 600 pulgadas por pulgada cúbica. Por contraste la superficie específica del aire atrapado es menor de 300 pulgadas cuadradas por pulgada cúbica.

Es importante señalar que aunque el aire presente en la pasta es el que interesa, es usual especificar el contenido de aire como un porcentaje del volumen del concreto, por lo que los ensayos suelen dar este último valor y no la relación de vacíos en la pasta de cemento.

Desde que la matriz cemento-pasta es la que realmente es protegida por el contenido de aire y desde que es dentro de esta matriz que el factor de espaciamiento de las burbujas es importante, puede señalarse que el óptimo contenido de aire de una mezcla puede variar en proporción a la cantidad de pasta de la matriz.

Así por ejemplo, para un concreto con un contenido de cemento de 7 bolsas por metro cúbico se encuentra que:

- a) Con un agregado grueso de tamaño máximo de 1 1/2", el contenido total de aire será de 4.5%; el contenido de aire del mortero será de 8.5%; el contenido de aire de la pasta será de 16.4%; y el factor de espaciamiento será de 0.02 mm.
- b) Para un tamaño máximo del agregado de 3/4", el contenido total de aire será de 5%; el contenido de aire del mortero será de 8.3%; el contenido de aire de la pasta será de 16.9%; y el factor de espaciamiento será de 0.023 mm.

De lo anterior se observa que las variaciones en el mortero y pasta no son significativas, pudiendo presentarse diferencias mayores cuando el tamaño máximo del agregado está en el orden de 3/8" ó la malla N° 4, casos en los que el contenido total de aire puede llegar al 9%, el contenido de aire del mortero alcanzar al 8.7%, el contenido de aire de la pasta llegar a valores del 23% y el factor de espaciamiento incrementarse a 0.30 mm.

El contenido de aire del mortero puede calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{C.A.M.} = 100 \text{ A/C} + \text{W} + \text{S} + \text{A}$$

y el contenido de aire de la pasta a partir de la ecuación:

$$\text{C.A.P} = 100 \text{ A/C} + \text{W} + \text{A}$$

En las que:

- C Volumen absoluto del cemento
- W Volumen absoluto del agua de mezclado neta
- S Volumen absoluto del agregado fino
- A Volumen del aire en el concreto

Si bien el contenido de aire de la mezcla puede variar dentro de un rango bastante grande, el contenido de aire del mortero es esencialmente constante, alrededor del 9%; siendo la reducción en el aire total un reemplazo progresivo de pasta por agregado. Conforme aumenta el tamaño máximo del agregado se requiere menor cantidad de mortero y pasta.

15.8. METODOS DE INCORPORACION DE AIRE

15.8.1. CONCEPTO

Si en una obra determinada se ha tomado la decisión de incorporar aire, ello puede hacerse:

- a) Empleando un cemento portland con incorporador de aire. Este tipo de cemento no se fabrica en el Perú; ó
- b) Adicionando un agente incorporador de aire cuando se prepara la mezcla de concreto.

15.8.2. CEMENTOS CON INCORPORADOR DE AIRE

En los Estados Unidos los cementos con incorporador de aire son producidos por la adición de un agente incorporador de aire conjuntamente con el sulfato de calcio durante el proceso de molienda del clinker.

Las ventajas de emplear cementos con incorporador de aire son, fundamentalmente, dos:

- a) Facilidad de empleo; y
- b) Bajo condiciones mantenidas de dosificación y mezclado, se incorpora un porcentaje fijo de aire, garantizándose las ventajas de ello sin las complicaciones de trabajo en obra resultantes de añadir un quinto ingrediente a la mezcladora.

Sin embargo, este tipo de cementos tiene también dos desventajas importantes:

- a) Si se emplea un cemento con incorporador de aire el agua de mezclado deberá primero disolver el agente incorporador de aire presente en el cemento antes que cualquier acción tenga lugar. Por lo tanto, el volumen de aire incorporado es muy sensible al tiempo de mezclado.
- b) Es prácticamente imposible modificar el porcentaje de aire incorporado cuando se emplea este tipo de cementos.

15.8.3. AGENTES INCORPORADORES DE AIRE

El porcentaje de aire incorporado a la mezcla depende de una serie de variables, las cuales son más difíciles de controlar cuando el proceso de incorporación de aire es hecho en la mezcladora y no durante la fabricación del cemento.

Entre dichos inconvenientes se puede mencionar:

- a) El trabajo con un quinto ingrediente exige un mayor control y una supervigilancia más estricta.
- b) Se incrementa la posibilidad de errores y se crea la necesidad de emplear dispositivos de medición adicionales.

Sin embargo, siempre que pueda ejercerse una adecuada supervisión, puede ser más conveniente añadir el agente incorporador de aire a la mezcladora dado que ello permite:

- a) Controlar el porcentaje de aire incorporado dentro de márgenes más estrechos; y
- b) Realizar ajustes para compensar todas las variables que puedan presentarse bajo condiciones de obra.

15.8.4. CONSIDERACIONES ESPECIALES

Independientemente del método de incorporación de aire empleado, las propiedades de los materiales, las proporciones de la mezcla, así como todos los aspectos referentes al proceso de puesta en obra, deberán ser mantenidos tan constantes como sea posible, de manera tal que el contenido de aire del concreto permanezca uniforme

Si bien el contenido de aire debe ser controlado durante todo el transcurso del trabajo, debe darse especial atención a los altos porcentajes de aditivo incorporador de aire requeridos en los concretos que contienen cementos portland puzolánicos, cenizas, aditivos minerales finamente divididos, microsílices, o adiciones colorantes.

Un control permanente del contenido de aire de la mezcla, por cualquiera de los métodos normalizados, garantizará que se está adicionando el porcentaje de aditivo deseado.

15.9. ADITIVOS INCORPORADORES DE AIRE

15.9.1. REQUISITOS ESENCIALES

Los requisitos esenciales de un agente incorporador de aire son:

- a) Que produzca rápidamente un sistema de espuma estable y finamente dividido, el cual posea características de alta superficie específica y factor de espaciamiento muy pequeño; y
- b) Que la espuma no tenga efectos dañinos sobre el concreto.

Los aditivos incorporadores de aire deberán ensayarse previamente para certificar que cumplen con los requisitos establecidos en la Norma ASTM C 260. El cumplimiento de lo indicado en la Norma garantizará que el producto actúe

como un aditivo incorporador de aire que pueda efectuar una mejora sustancial en la resistencia del concreto a los procesos de congelación y deshielo, sin que ninguna de las propiedades del concreto sea seriamente afectada.

15.9.2. FORMAS DE INCORPORAR AIRE

Existen tres formas principales de incorporar aire o celdas de gas a una masa de concreto:

- a) Por la adición de elementos químicos, tales como polvo de aluminio o polvo de zinc, los cuales generan gases por reacción química con el cemento. Igualmente el peróxido de hidrógeno forma celdas de gas en el concreto.
- b) Por medio de agentes de actividad superficial los cuales reducen la tensión superficial. Dentro de este grupo se encuentran los aditivos incorporadores de aire.
- c) Por el empleo de agentes dispersantes, los cuales son compuestos químicos de actividad superficial que originan cambios electrostáticos que son impartidos a las partículas haciéndolas mutuamente repelentes y por lo tanto previniendo la coagulación. Estos agentes normalmente no son humedificantes o formadores de espuma.

15.9.3. ADICION DE ELEMENTOS QUIMICOS

Muchos materiales son capaces de funcionar como aditivos incorporadores de aire. Algunos materiales, tales como el peróxido de hidrógeno y el polvo de aluminio, pueden ser empleados para incorporar burbujas de gas en la mezcla pero no son considerados aceptables como aditivos incorporadores de aire desde que ellos no necesariamente producen un sistema de burbujas el cual proporcione a la pasta resistencia adecuada a los procesos de congelación y deshielo.

En el análisis de éste primer grupo conviene indicar que la incorporación de aire por medio de polvo de aluminio no es de uso práctico en trabajos de construcción dado que, a menor que la operación se efectúe bajo condiciones de estricto control, los resultados pueden ser muy variables.

15.9.4. ADICION DE INCORPORADORES DE AIRE

El segundo grupo, el de los clasificados como aditivos incorporadores de aire, líquidos o en polvo, puede ser subdividido en:

- a) Sales de resinas naturales de la madera y sus jabones. El más conocido de estos productos es la resina Vinsol.
- b) Grasas y aceites animales y vegetales, tales como el aceite de sebo y aceite de oliva y sus ácidos grasos, tales como el ácido esteárico y el ácido oleico y sus jabones.

- c) Agentes humedificantes tales como las sales alcalinas de compuestos orgánicos sulfonados o sulfatados. Los detergentes sintéticos caen dentro de esta clasificación.
- d) Sales de lignosulfonatos; sales de ácidos de petróleo; sales de materiales derivados de las proteínas; sales orgánicas de hidrocarburos sulfonados.

Todos los materiales mencionados son, generalmente, insolubles en agua y deberán ser químicamente procesados antes de poder ser empleados como aditivos.

Si las resinas Vinsol son utilizadas sin un tratamiento previo, ellas pueden reaccionar químicamente con el cemento, por lo que, para evitar ello y al mismo tiempo hacerlas solubles en agua, son primeramente neutralizadas por la adición de hidróxido de sodio el cual las convierte en jabones.

15.9.5. AGENTES DISPERSANTES

El tercer grupo, el de los agentes dispersantes, más conocidos como reductores de agua-controladores de fragua, no interfiere en el proceso normal de hidratación y al mismo tiempo da lugar a la incorporación de un pequeño volumen de aire en el concreto. Con los porcentaje de aceite dispersante comunmente empleados, la incorporación de aire puede estar dentro del 3% al 4%.

15.9.6. ADITIVOS EN PARTICULAS

Se ha añadido al concreto partículas sólidas las cuales poseían una gran porosidad interna y tamaño adecuado, encontrándose que actuaban en forma similar a la de las burbujas de aire. Estos materiales fueron esferas de plástico huecas, ladrillos partidos, arcillas o esquistos expandidos, o esferas de determinadas tierras de diatomeas. En general, este tipo de materiales no ha sido empleado en forma importante.

Las investigaciones han demostrado que cuando se usa partículas provenientes de materiales inorgánicos, el tamaño óptimo de las partículas deberá variar entre 250 y 850 μm , la porosidad total de las partículas deberá ser de mínimo 30% en volumen, y la distribución por tamaños de los poros deberá estar en el rango de 0.05 a 3 μm . La inclusión de este tipo de partículas en la proporción adecuada puede producir concretos con excelente resistencia a congelación y deshielo, de acuerdo a los resultados de laboratorio efectuados empleando la Norma ASTM C 666.

Los aditivos incorporadores de aire en forma de partículas tienen la ventaja de una completa estabilidad del sistema de burbujas de aire. Cuando son añadidos al concreto fresco no se producen cambios en el contenido de aire debidos a modificaciones en el procedimiento o tiempo de mezclado; modificaciones en la

temperatura, trabajabilidad o procedimiento de acabado; adición de otros aditivos tales como cenizas, u otros cementos tales como los de escorias finamente molidas; como sería el caso si se trabajase con aditivos convencionales incorporadores de aire.

15.10. ENSAYOS DE CONTENIDO DE AIRE

15.10.1 ALCANCE

Los ensayos para la determinación del contenido de aire del concreto plástico aparecieron por primera vez en las publicaciones del ASTM en 1942. El primer método, un procedimiento volumétrico siguió casi inmediatamente al descubrimiento de los posibles efectos benéficos de pequeños porcentajes de aire en el concreto sobre la resistencia de los pavimentos al descascamiento causado cuando se empleaba sales para remover el hielo.

Desde esa época la incorporación de aire en el concreto ha obtenido tal importancia que ella ha sido descrita como el mayor avance en la Tecnología del Concreto desde que se enunció la teoría de la relación agua-cemento por Abrams en 1918. Los ensayos de determinación del contenido de aire son, en la actualidad, los terceros en importancia, después de los ensayos de asentamiento y de resistencia en compresión.

15.10.2 METODOS DE ENSAYO

Es evidente que un adecuado control del contenido de aire de la mezcla requiere el empleo de métodos seguros, con una perioricidad adecuada de acuerdo a Normas y Especificaciones de Obra. El profesional que utilice concretos con aire incorporado deberá contar con el equipo de control necesario y personal técnico capacitado en el control del contenido de aire.

El método para medir el contenido de aire, o mejor aún el factor de espaciamiento de burbujas en la porción mortero del concreto plástico, debería ser simple y efectivo. Sin embargo aún no se ha desarrollado un procedimiento de ensayo lo bastante simple para ser empleado con seguridad en operaciones en obra.

El ASTM ha normalizado tres métodos de ensayo para la determinación del contenido de aire del concreto fresco. Dichos métodos son el gravimétrico; el de presión; y el volumétrico. Cada uno de ellos tiene sus ventajas y desventajas, debiéndose en cada caso particular emplear el método más adecuado para las condiciones y materiales que se van a utilizar.

Los tipos de medidores patentados producen resultados satisfactorios con mezclas de concreto que contienen agregados hasta de 2" de tamaño máximo. Cuando se emplea agregado de tamaño mayor, las partículas mayores pueden

ser retiradas y el efecto de tal remoción calculado al determinar el contenido total de aire. El proceso de separación por tamizado húmedo puede conducir a errores importantes resultantes de la pérdida de aire durante las operaciones de tamizado.

10.2.1. METODO GRAVIMETRICO

Cuando se emplea el método gravimétrico para determinar el contenido de aire del concreto fresco, se determina el peso unitario del concreto y se le compara con el peso unitario teórico del concreto libre de aire. El peso unitario teórico es calculado a partir del peso y gravedad específica de masa de cada uno de los ingredientes que intervienen en la mezcla de concreto.

Los detalles del procedimiento de cálculo se encuentran indicados en la Norma ASTM C 138. El concreto que contiene agregado graduado a 2" puede ser ensayado en un recipiente de 1/2 pie cubico; cuando se emplea agregado de tamaño mayor, deberá utilizarse un recipiente de un pie cúbico.

El Método Gravimétrico produce resultados razonablemente seguros cuando se emplean agregados de gravedad específica uniforme. Sin embargo, pueden introducirse errores si los pesos específicos de los agregados fino y grueso difieren en forma apreciable o cuando cada agregado, en si mismo, se compone de partículas de diferentes densidades.

El Método Gravimétrico para la determinación del contenido de aire tiene serias limitaciones en los ensayos de obra. Es esencial un conocimiento muy exacto de las proporciones de la mezcla, pesos específicos, y contenidos de humedad de los agregados. Por ejemplo, un error del 2% en el contenido de humedad del agregado de una mezcla de concreto promedio, en la que se añade a la mezcladora un volumen constante de agua, puede dar por resultado un error del 1% en el contenido de aire computado.

En obras en las que el contenido de humedad de los agregados es determinado con frecuencia y la consistencia es controlada variando el agua añadida en la mezcladora para mantener el asentamiento, el método gravimétrico probablemente no será adecuado para obtener resultados seguros. Igualmente, un error de 0.02 en el peso específico de los agregados resultará en un error de cerca de 1/2% en el contenido de aire cuando se computa por este método.

Cuando se utiliza agregados livianos y una adecuada determinación del peso específico es extremadamente difícil, no es recomendable emplear el Método Gravimétrico. Ello fundamentalmente debido a que en los agregados de bajo peso es extremadamente difícil determinar el peso específico de masa desde que los agregados no pueden ser reducidos a la condición de saturado superficialmente seco debido a su textura superficial extremadamente rugosa.

Adicionalmente, pequeños cambios en la granulometría de los agregados de bajo peso pueden ocasionar cambios fundamentales en el peso específico promedio desde que los tamaños más finos son generalmente más densos que los gruesos. Por las razones anteriores el empleo de este método no es recomendable en concretos de bajo peso preparados con agregado liviano.

Aunque este método ha sido cuestionado en obra, en el Laboratorio, el que el peso específico y el contenido de humedad pueden ser cuidadosamente determinados, puede obtenerse resultados bastante exactos para concretos que contienen agregados naturales. Aún más el concreto que es empleado en este ensayo no necesita desperdiciarse como ocurre con otros procedimientos, pudiendo ser empleado en otros ensayos o en la fabricación de probetas.

Se puede obtener información valiosa sobre rendimiento y factor cemento real puede ser obtenida del ensayo de peso unitario realizado en el procedimiento gravimétrico.

10.2.2. METODO DE PRESION

El método de presión para la determinación del contenido total de aire del concreto fresco es hoy el mas ampliamente empleado y se basa en el hecho que, en la mayoría de las mezclas de concreto, el único ingrediente comprimible es el aire atrapado o incorporado en la mezcla. Elein y Walker aplican la Ley de Boyle, que dice que a una temperatura constante el volumen de una cantidad determinada de cualquier gas varía inversamente con la presión a la que dicho gas está sujeto, y por lo tanto involucra una relación de presión y volumen de gases a la determinación del contenido de aire del concreto fresco.

En el Método ASTM C 231 una presión predeterminada es aplicada a una columna de agua que está sobre una muestra de concreto en un recipiente de volumen conocido. Cuando se aplica la presión adecuada, la caída en el nivel de agua en el cuello del aparato calibrado indica directamente el contenido de aire del concreto.

Este método es normalmente adecuado para ser empleado con todos los tipos de morteros o concretos que contienen agregados razonablemente densos, sin embargo un aspecto negativo de este ensayo es que la presión ejercida puede comprimir aire dentro de los intersticios de un agregado poroso y no saturado, resultando un valor del contenido de aire más alto que el verdadero.

Esta complicación puede ser compensada determinando un factor de corrección para el aire dentro del agregado, tal como se indica en el Método ASTM C 231. En el caso de escorias u otros agregados livianos relativamente porosos, este factor de corrección del agregado puede ser bastante grande y difícil de determinar exactamente ante la imposibilidad de diferenciar entre el aire presente

en las partículas de agregado y el aire incorporado en la pasta. Por esta razón, este método no es recomendable para concretos preparados con agregado de bajo peso, tales como la escoria u otros agregados livianos relativamente porosos.

La mayor ventaja del método de presión es que no es necesario conocer pesos específicos, contenidos de agua o cantidades de materiales en la mezcla del concreto, para determinar su contenido de aire. Las muestras de concreto ensayadas por este método deberán, de hecho ser descartadas y no pueden ser empleadas en la preparación de probetas o en posteriores ensayos debido al efecto que tiene el contacto del concreto con el agua.

El Washington State Highway Department ha desarrollado una modificación del aparato de presión standard ASTM, la cual fue propuesta por Klein y Walker y refinada por Menzel. En este aparato un volumen conocido de aire en una presión establecida es forzado a tomar contacto con el concreto en un recipiente sellado; la caída de la presión proporciona una medida del volumen de aire dentro del concreto.

El aparato tiene la ventaja de no requerir el empleo de agua en el ensayo y de que los resultados no están influenciados por cambios en la presión barométrica. Una desventaja es que pequeños errores en el acabado en la muestra de concreto, a un volumen conocido, pueden producir errores relativamente grandes en el contenido de aire medido. Esta desventaja ha tendido a ser eliminada por aparatos los cuales permiten llenar el espacio sobre la muestra de concreto con agua.

Si es adecuadamente usado y se emplea un instrumento debidamente calibrado, el método de presión es probablemente el más seguro. No se requiere el conocimiento de las proporciones de mezcla o del peso específico, y no se necesita efectuar cálculos. Una lectura, la cual puede ser efectuada en pocos minutos por un técnico experimentado, es todo lo que se requiere para conseguir una información segura del contenido de aire de la mezcla.

Este método, sin embargo, no es conveniente para emplearlo en concretos de bajo peso o con agregados altamente porosos, debido a que la presión inducida introduce el agua dentro de los agregados, dando lugar a una lectura errónea.

10.2.3. METODO VOLUMETRICO

Las inseguridades en la determinación del contenido de aire del concreto fresco que contiene agregado poroso, que pueden presentarse cuando se emplea el método gravimétrico o el de presión ya han sido descritas. Sin embargo, el método volumétrico puede ser empleado con tales materiales para obtener una medida adecuada del contenido de aire. Aún más, como en el caso del método

de presión, no se necesita un conocimiento del peso específico o del contenido de humedad de los ingredientes.

Con los aparatos descritos en el Método ASTM C 173, el procedimiento consiste en llenar agua hasta una marca determinada sobre una muestra de concreto depositada en un recipiente de volumen conocido. El aparato es herméticamente cerrado; a continuación el concreto y el agua son entremezclados y agitados hasta que el aire presente en el concreto es totalmente removido. La caída en el nivel de agua desde su marca original proporciona una medida directa del contenido de aire del concreto.

En este ensayo, el mezclado del agua y el concreto es repetido muchas veces hasta que la ausencia de caída en el nivel del agua indica la remoción de todo el aire de la mezcla. El método requiere el empleo de un recipiente para concreto de no menos de 0.2 pies cúbicos cuando se emplea agregado hasta de 2". Para trabajos de rutina un recipiente de no menos de 0.075 pies cúbicos puede ser empleado.

La principal desventaja del método volumétrico está en el esfuerzo físico requerido para agitar el agua y el concreto lo suficiente como para remover el aire. A pesar de ello éste método es el más recomendado para concretos preparados con agregado de bajo peso. El peso del concreto que debe ser manipulado es menor que cuando se emplea agregados naturales y se puede obtener resultados seguros ensayando una muestra de 0.075 de pie cúbico de concreto.

El aparato recomendado por ASTM para ensayos de rutina emplea un volumen de concreto que es pequeño pero que no está en desacuerdo con los encontrados por Pearson y Helms como adecuados para compensar los efectos de errores de muestreo en ensayos de contenido de aire.

Existen otros métodos de determinación del contenido de aire por procedimientos volumétricos, pero la mayoría de ellos están aún en la etapa de desarrollo ya que no han logrado superar algunas de las desventajas enunciadas anteriormente.

15.10.3 COMPARACION DE LOS RESULTADOS

Se han realizado muchos estudios para correlacionar los resultados de los ensayos de contenido de aire hechos por los diferentes métodos, habiéndose encontrado concordancia.

Así, los resultados en ensayos gravimétricos coinciden con otros procedimientos siempre que los pesos específicos y contenidos de humedad de los ingredientes sean conocidos. Los resultados del método de presión estuvieron de acuerdo con otros datos siempre siempre que el concreto fue preparado con agregados densos; y el procedimiento volumétrico da sustancialmente los mismos conteni-

dos de aire que los otros métodos siempre que todo el aire fuera removido de la muestra ensayada.

Resultados comparativos de los ensayos de contenido de aire empleando los tres procedimientos ASTM han sido obtenidos, entre otros investigadores, por Britton quien ha señalado que «es evidente que cualquiera de los métodos empleados dará resultados relativamente seguros cuando dicho ensayo sea adecuadamente realizado».

15.10.4 SIGNIFICADO DE LOS RESULTADOS

Los ensayos para la determinación del contenido de aire del concreto fresco son comunmente realizados en obra sobre concretos que se asume que contienen aire incorporado. Tal aire es obtenido por el empleo de un cemento con incorporador de aire o por la adición de un agente incorporador de aire a un concreto preparado con un cemento normal.

Numerosos ensayos han demostrado que la incorporación de aire incrementa la resistencia del concreto a agentes destructivos tales como congelación y deshielo, agua de mar, y sales empleadas para la remoción del hielo de los pavimentos.

Conjuntamente con los efectos benéficos indicados, generalmente hay una infortunada disminución en la resistencia del concreto. De esta manera el problema, en el caso de un concreto con aire incorporado, es controlar el contenido de aire para asegurar los efectos benéficos sin reducir demasiado su resistencia.

Los estudios efectuados por Wuerpel, Gonnerman y otros han demostrado la necesidad de un mínimo de aproximadamente 3% de aire incorporado en las mezclas de concreto a fin de asegurar un beneficio total del incremento en la resistencia congelación y deshielo. Por otra parte, ensayos efectuados por la Portland Cement Association y la National Sand and Gravel Association indican que, para una relación agua-cemento dada, cada 1% de aire incorporado reduce la resistencia a la compresión en cerca del 5%.

Sin embargo, esta reducción en la resistencia puede ser compensada por un rediseño de la mezcla a fin de reducir los contenidos de agua y arena para mantener el asentamiento y el volumen de mortero en el concreto. Así, gracias a este rediseño es posible que mezclas pobres a las cuales se ha incorporado aire (mezclas que tienen alrededor de 6.5 sacos de cemento por metro cúbico) tengan una resistencia mayor que la de concretos normales. En el caso de mezclas ricas, la reducción en la resistencia puede ser solamente de 10% a 15% en vez del 20% a 25% que podría esperarse cuando la mezcla no es rediseñada. Es debido a lo anterior que muchas especificaciones requieren 3% a 6% de aire en concretos fresco con aire incorporado.

Existen excepciones en las que límites del 3% al 6% del contenido de aire no deberán aplicarse. En concretos ciclopeos, por ejemplo, en los cuales el tamaño del agregado puede ser de 6" ó mayor dichos límites son sólo aplicables a aquella porción del concreto la cual puede pasar un tamiz de 2" a 3", pero ellos serán demasiado altos para el conjunto total del concreto.

Con una certificación como la indicada, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos hace un tamizado húmedo de sub-concretos, el cual contiene agregado cuyo tamaño máximo nominal es de 3" á 6", haciéndolo pasar por un tamiz de 1 1/2" á 3" antes de realizar el ensayo de contenido de aire. El Bureau of Reclamation generalmente requiere la remoción manual del agregado grueso de tamaño grande antes de efectuar el ensayo de contenido de aire.

Powers y Klieger han sugerido que el contenido de aire del concreto fresco debe estar gobernado por el espaciamiento y tamaño de los vacíos en la pasta de cemento. Eso conduce a la conclusión que un concreto que tenga, para un contenido de aire dado, numerosas pequeñas burbujas de aire adecuadamente espaciadas a través del total de la masa, puede ser más efectivo en asegurar los efectos benéficos de la incorporación de aire que un concreto que tenga un número menor de burbujas de tamaño mayor.

Debe indicarse que el contenido de aire de un concreto que contiene un porcentaje fijo de aditivo incorporador de aire añadido a la mezcladora, o de adición mezclada con el cemento, varía con muchos factores. Es importante que el efecto de dichos factores sea entendido de manera tal que los resultados obtenidos en los ensayos puedan ser adecuadamente evaluados y se pueda efectuar los ajustes necesarios para asegurar un cumplimiento exacto de las especificaciones.

Entre los factores a considerar se incluye:

- a) La incorporación de menos aire en mezclas ricas que en mezclas pobres.
- b) El concreto húmedo generalmente deberá incorporar más aire que las mezclas secas.
- c) La temperatura del concreto es importante debido a que más aire se incorpora a 20C que a 40C y más a 4C que a 20C.
- d) La cantidad de aire se incrementará con el mezclado hasta un punto a partir del cual ella comenzará a decrecer; así en concretos premezclados cuya mezcla se ha efectuado en tránsito, los ensayos han mostrado que el contenido de aire se incrementa durante los primeros 12 minutos de mezclado para luego tender a decrecer.
- e) La granulometría de los agregados, especialmente la de la arena, tiene sus efectos sobre el contenido de aire; han encontrado que el contenido de aire del concreto se incrementa conforme la cantidad de agregado fino de los tamaños N° 30 y N° 50 se incrementa.

Hasta ahora las consideraciones expuestas se han limitado al contenido de aire del concreto fresco. Sin embargo, el manejo y colocación del agregado en obra pueden afectar el contenido de aire del concreto ya colocado. Y, de hecho, es el contenido de aire en el concreto endurecido el que asegura los efectos benéficos atribuidos al concreto con aire incorporado.

Así, existe información que el proceso de bombeo del concreto puede eliminar algo de aire para determinadas mezclas. Puede también esperarse que repetidos manejos y agitación del concreto antes de su colocación deberán igualmente originar una pérdida del contenido de aire. El proceso de vibración, al consolidar el concreto en los encofrados, deberá igualmente remover algo del aire de la masa. No debe pensarse que el aire que se encuentra en la porción inferior de una sección profunda deberá ser comprimido por el peso del concreto que se encuentra sobre él; éste deberá afectar el volumen de aire pero probablemente no el espaciamiento o el número de vacíos de aire o la durabilidad del concreto.

En la actualidad los ensayos del concreto fresco para la determinación del contenido de aire por los métodos ASTM descritos, representan el medio más útil para controlar el resultado final de la obra. Estos métodos de ensayo, conjuntamente con especificaciones límites preparadas en forma inteligente, asegurarán las propiedades requeridas al concreto con aire incorporado.

Las determinaciones del contenido de aire en los concretos normales son algunas veces efectuadas para asegurar que el concreto no contiene más de 1% a 1.5% de aire. Esto es especialmente necesario para mezclas que van a ser empleadas en la preparación de pisos sujetos a trabajos pesados o para concretos de muy alta resistencia los cuales deberán ser empleados en diseño de elementos pretensados o en columnas que van a soportar cargas fuertes.

Así por ejemplo, muchos fabricantes de agregados metálicos para pisos resistentes al desgaste recomiendan que sus productos no sean empleados en concretos con aire incorporado. La dificultad de producir altas resistencias a la compresión con concretos con aire incorporado hace deseable realizar ensayos de contenido de aire en el momento en que el concreto de alta resistencia está siendo colocado, a fin de asegurarse que el aire no está siendo inadvertidamente incorporado.

Los ensayos de contenido de aire también proporcionan un medio de controlar el rendimiento del concreto. En el caso de pavimentos, en los que cuidadosos chequeos son realizados sobre la cantidad de concreto que está siendo empleada por los contratistas, una variación fuerte en el porcentaje en relación a aquel para el cual la mezcla fue diseñada, puede conducir a discrepancias en el rendimiento.

15.11. FACTORES EN EL CONTENIDO DE AIRE

15.11.1 CEMENTO

Estudios de laboratorio efectuados por la National Ready Mixed Concrete Association han permitido determinar que el volumen de aire producido por una cantidad fija de aditivo varía del 5% al 15% dependiendo del tipo de cemento y aditivo empleados.

Ello no sólo indica que las características físicas y químicas del cemento tienen marcada influencia sobre el volumen de aire incorporado, sino también que es necesario realizar controles de laboratorio de la cantidad de aditivo a emplearse en la mezcla cuando se modifica el tipo o marca del cemento en obra.

Se ha establecido que el cemento tiene un efecto similar a un aditivo mineral finamente molido. De esta suerte, la incorporación de aire es menor en mezclas ricas e igualmente, cuanto mayor es la superficie específica del cemento menor es el volumen de aire incorporado.

En los cementos portland puzolánicos, que corresponden al Tipo IP de la Norma ASTM C 595; al igual que en los cementos de alta resistencia inicial, que corresponden al Tipo III de la Norma ASTM C 150, generalmente se requiere una cantidad más alta de aditivo incorporador de aire.

Igualmente se ha determinado que los cementos con más alto porcentaje de álcalis requieren menores porcentajes de aditivo para obtener un determinado porcentaje de aire.

15.11.2 AGREGADOS

11.2.1 AGREGADO GRUESO

La granulometría del agregado grueso en si misma tiene poca influencia sobre la cantidad de aire incorporado a la mezcla de concreto. Sin embargo, lo afecta indirectamente en la medida que las características del agregado grueso determinan el volumen de mortero necesario por trabajabilidad.

Cuanto mayor y mejor graduado es el agregado grueso se ha de requerir menor cantidad de agregado fino y, por tanto, menor ha de ser el contenido de aire para un volumen de aditivo dado.

En casos extremos, para un volumen de aditivo determinado, el volumen de aire incorporado es 40% mayor cuando se emplea agregado de 3/4" en lugar de 2" de tamaño máximo.

11.2.2. TEXTURA SUPERFICIAL DEL AGREGADO FINO

En concretos de la misma relación agua-cemento y la misma concentración de agente incorporador de aire, en los cuales el agregado fino se compone en un caso de partículas de superficie suave y en el otro de partículas de superficie rugosa, ambas de la misma granulometría, se observa que el factor de espaciamiento es menor conforme aumenta la rugosidad de las partículas.

11.2.3. VOLUMEN DE AGREGADO

Todo incremento en el volumen de agregado fino deberá producir un incremento aproximadamente proporcional en el contenido de aire, siempre que se mantengan uniformes las otras condiciones.

11.2.4. GRANULOMETRIA

La incorporación de aire parece estar afectada principalmente por aquellas fracciones de agregado fino retenidas en los tamices N° 30 y N° 50.

Kennedy y Walker han demostrado, mediante análisis de laboratorio en arenas cuyo módulo de fineza variaba de 1.1 á 3.6, que una de las características que tienen importancia en el contenido de aire en el concreto es el volumen de arena de granos de tamaño intermedio (mallas N° 30 a N° 50), determinando que el contenido de aire del concreto se incrementa conforme aumenta la proporción de estos granos, especialmente los que pasan el Tamiz N° 30 y son retenidos por los tamices N° 50 y N° 100, tendiendo el porcentaje de aire a disminuir conforme se incrementan los tamaños mayores o menores del agregado. Se ha determinado que pueden presentarse incrementos del 3% en el contenido de aire en el concreto cuando se incrementa en 3.5% el volumen de arena de los tamaños indicados.

Los tamaños de los granos de arena, dentro de los límites indicados, son críticamente importantes debido a que el espacio entre granos, en dichos tamaños, es lo bastante pequeño para impedir movimientos del cemento Portland, pero los granos son todavía lo suficientemente grandes para retener dentro de su esqueleto granular burbujas lo suficientemente grandes como para oponerse a una rápida disolución en el agua de mezclado.

El tamaño máximo del espacio encerrado por las partículas que pasan el Tamiz N° 30 y son retenidas en el Tamiz N° 100 varía de 33 a 130 micrones. Es sabido que el 90% al 95% de las burbujas de aire es menor de 100 micrones en diámetro, de tal manera que pueden ser contenidas entre las partículas de arena que están dentro del rango de tamaños indicado.

Un incremento en la proporción de arena más fina que aquella que es óptima

para incorporar aire deberá disminuir el volumen disponible entre partículas de esta fracción y, en consecuencia, deberá someter las partículas desplazadas a una presión fuertemente incrementada, facilitando así su escape del concreto, incrementando la solubilidad del aire y apresurando su disolución.

En cambio, un incremento en las partículas más gruesas disminuye el espacio intersticial de óptimas dimensiones disponible, debido que una parte de la arena más fina es reemplazada en las partículas mayores.

Por todo lo indicado es evidente que el grupo de partículas en el rango de los Tamices N° 30-50 ó N° 30-100, es un reservorio importante de aquellas burbujas que persisten hasta el endurecimiento del concreto.

Cuando la arena tiene entre los tamices indicados un porcentaje mayor que el recomendable, y se asume que los otros factores permanecen constantes, se puede esperar que esta arena incorporará aire en mayor cantidad para un porcentaje dado de aditivo o, por el contrario, que requerirá una cantidad menor de aditivo para obtener el mismo porcentaje de aire incorporado.

Confirmando lo indicado, se sabe que un incremento del 10% en los porcentajes de los tamices N° 30 á N° 50 puede significar un incremento del 2% en el contenido de aire. Igualmente se sabe que cambios repentinos en la granulometría de la arena pueden causar cambios hasta del 2% en el contenido de aire del concreto.

Los estudios de Hornibrook y Bryant han permitido determinar que en morteros de cemento y mezclas de concreto la influencia de la graduación de la arena sobre el volumen de aire incorporado puede ser suprimida en proporción al volumen de cemento añadido a la mezcla. De acuerdo a sus conclusiones los efectos de la granulometría del agregado fino sobre el volumen de aire incorporado son más importantes en mezclas muy pobres y tienden a desaparecer con la riqueza de la mezcla, en las que un relativamente grande volumen de finos basta para asegurar un buen sistema de vacíos.

11.2.5. OTROS FACTORES

Hay otros factores que afectan el porcentaje de aire incorporado y deben considerarse como parte del conjunto. Así, la arena de perfil angular arrastra más aire que la redondeada.

Igualmente debe considerarse el material retenido en la Malla N° 100, el cual contribuye a la ligazón de la mezcla y ayuda a contener el aire incorporado, así como el material que pasa la Malla N° 100, el cual por ser muy fino actúa como un inhibidor al igual que lo haría una cantidad adicional de cemento o cualquier aditivo mineral finamente dividido.

Es también importante recordar que el polvo, presente en el agregado en forma de revestimiento superficial, tiende a reducir el porcentaje de aire incorporado.

La presencia de impurezas orgánicas puede disminuir o aumentar los requisitos del aditivo incorporador de aire, dependiendo de la clase y condiciones de la impureza, ya que se ha encontrado que determinadas impurezas pueden ser tan efectivas como un aditivo en el proceso de incorporación de aire.

15.11.3 AGUA

11.3.1. REDUCCION DEL AGUA DE LA MEZCLA

Los aditivos exclusivamente incorporadores de aire permiten una reducción en el agua de la mezcla equivalente al 40% del porcentaje de aire, lo que permite una reducción de 15 á 20 l/m³ para un asentamiento de 3" á 4" en concretos en los que se ha incorporado aditivo para obtener 4% á 5% de aire incorporado.

Los aditivos que, además de la incorporación de aire, poseen acción dispersante permiten una reducción ligeramente mayor en el agua de la mezcla. La reducción varía del 50% al 70% del volumen de aire incorporado, o sea alrededor de 20 á 25 l/m³.

Los aditivos que, además de la incorporación de aire, actúan como acelerantes de fragua, permiten una reducción de agua del orden de 16 l/m³, valor equivalente al 50% del aire incorporado.

En todos los casos es importante tener en consideración las recomendaciones del fabricante y los resultados de las pruebas de laboratorio.

Dos aspectos a ser considerados en la reducción del agua de la mezcla, adicionalmente a los indicados son los siguientes:

- a) El aire será menos eficiente en reducir el porcentaje de agua conforme el porcentaje de aire se incrementa; y
- b) Para una cantidad dada de aire, la reducción en el agua será menor conforme el contenido de cemento se incrementa.

Como conclusión de lo anterior se ha determinado que, para un contenido promedio de 5% de aire incorporado, el agua se podrá reducir la mitad de dicho volumen en una mezcla de 6 sacos/m³; reducirse 1/3 de dicho volumen en una mezcla de 7 sacos/m³; y podrá reducirse 1/4 de dicho volumen en una mezcla de 8.5 sacos/m³.

Adicionalmente debe indicarse que un incremento en la dureza del agua generalmente deberá aumentar los requisitos de aditivo incorporador de aire.

15.11.4 ADITIVOS Y ADICIONES**11.4.1. TIPO DE ADITIVO EMPLEADO****CONCEPTO**

La incorporación de aire a la mezcla puede ser realizada ya sea empleando un cemento con aditivos incorporadores de de aire o por medio de aditivos añadidos al concreto en el momento de batirse la mezcla. En general, este último método es el más recomendado desde que él proporciona mayor flexibilidad en el control.

Las diferentes sustancias empleadas son más o menos efectivas como agentes incorporadores de aire. Estas diferencias se traducen en:

- a) Variaciones en la elasticidad de la película producida.
- b) Diferencias en la reducción de la tensión superficial.
- c) Diversa capacidad de adherencia de las burbujas a las partículas de cemento y/o agregado; y
- d) Diferencias en la permeabilidad de la película a los elementos constituyentes del aire en las concentraciones empleadas para producir el contenido de aire.

GRADO DE EFICIENCIA

Un agente incorporador de aire será más eficiente cuando, dentro de la solución producida por hidratación inicial del cemento portland, mejor se comporte en los siguientes aspectos:

- a) Desarrollo de una película de alta elasticidad en la interface aire-agua.
- b) Reducción de la tensión superficial.
- c) Inhibición en la transmisión de aire a través de la interface aire-agua.
- d) Resistencia al adelgazamiento o deterioro de las burbujas en el tiempo.
- e) Capacidad de adherencia entre las burbujas de aire y las partículas de cemento; y
- f) Actuar sin modificar en forma significativa las propiedades del mortero ó del concreto.

Si bien un adecuado comportamiento en los aspectos signados como (a), (d) y (e) es esencial para obtener resultados satisfactorios, la reducción en la tensión superficial puede variar dentro de límites amplios.

En este punto es importante recordar los resultados de los estudios realizados por Backstrom, los cuales indican que el sistema de burbujas varía con la naturaleza del agente incorporador de aire, así como que el porcentaje requerido para incorporar un volumen constante de aire varía ampliamente con los diversos aditivos.

LIMITACIONES

La capacidad de incorporación de aire de los diferentes aditivos varía dependiendo de su composición y concentración. Este hecho, añadido a la influencia de otras variables sobre el contenido de aire, indica la necesidad que la cantidad de aditivo a ser empleada en cada caso sea establecida sobre la base de muestras de ensayo preparadas bajo las condiciones de operación en obra. Las recomendaciones de los fabricantes deben ser aceptadas con cautela y sólo deben tomarse como una guía.

Determinados aditivos de aire tienen, o se dice que tienen, otros efectos tales como acción acelerante de fragua, acción dispersante o hidratante, etc. En algunos casos ellos han permitido reducciones significativas en el agua de la mezcla y han tenido un efecto menor sobre la resistencia del concreto que el producido por aditivos que son exclusivamente incorporadores de aire.

Dicho efecto puede variar enormemente con diferentes clases de materiales por lo que todos los tipos de aditivos a los cuales se le atribuye virtudes supletorias a la incorporación de aire, deben utilizarse sobre la base de su comportamiento en ensayos de laboratorio realizados en condiciones similares a las que ha de tenerse en obra.

11.4.2. PROPORCION DE ADITIVO

CONCEPTO

Si otros factores se mantienen constantes, un incremento en el contenido de aire de la pasta, para una relación agua-cemento determinada, deberá incrementar el área de contacto a través de la cual tiene lugar la difusión y disminuir la distancia a través de la cual el aire disuelto puede dispersarse. Como consecuencia ello deberá incrementar la magnitud de la disolución de las pequeñas burbujas y el crecimiento de las burbujas mayores.

Igualmente, si la película entre burbujas es demasiado delgada, la fusión de las mismas disminuirá su número e incrementará su tamaño promedio. Por ello la superficie específica tenderá a disminuir y el factor de espaciamento a incrementarse fuertemente.

Sin embargo, si el mayor contenido de aire es debido al empleo de una proporción de aditivo creciente, dentro de las concentraciones normalmente empleadas, la disminución en la tensión superficial y el incremento en el espesor de la película absorbente en la superficie de contacto aire-agua deberán compensar, en parte, la tendencia a un incremento en la velocidad de difusión del aire.

Igualmente, para el caso anterior, la reducción en la tensión superficial permite

una mayor rotura de las burbujas más grandes debido a un agitado vigoroso e, igualmente, la magnitud de la fusión de las burbujas deberá disminuir. La transmisión de aire de burbuja a burbuja también deberá disminuir en la medida que una película de mayor espesor y mayor concentración reduce el paso del aire hacia afuera y entre burbujas.

En el rango de los contenidos de aire normalmente empleados, el efecto de incrementar el porcentaje de aditivo incorporador de aire compensa el efecto de incrementar el contenido de aire y da por resultado un fuerte aumento en la superficie específica y una disminución en el factor de espaciamiento.

La adición de proporciones excesivas de aditivo incorporador de aire disminuirá la diferencia entre la concentración de aditivo en la película y la fase total de agua, lo que significa una reducción en la elasticidad de la película absorbente, reducción lo suficientemente importante como para permitir una fusión más rápida de las burbujas, de tal manera que la superficie específica de las mismas tenderá a disminuir.

El empleo de porcentajes adicionales de aditivo incorporador de aire da por resultado un incremento en el contenido de éste y en la superficie específica, con la consiguiente disminución en el tamaño promedio de las burbujas, disminución del factor de espaciamiento e incremento en la resistencia a congelación y deshielo.

En relación con la superficie específica, es importante recordar que cambios en la relación agua-cemento de concretos que contengan ya sea un volumen constante de aire o un porcentaje constante de aditivo, también tendrán efectos significativos sobre la superficie específica.

Igualmente se ha determinado que, para una proporción dada de aditivo incorporador de aire, si otros factores son mantenidos constantes, el concreto desarrolla un sistema de burbujas tal que el factor de espaciamiento varía sólo ligeramente, independientemente del proceso de manejo del concreto fresco y a despecho de grandes cambios en la superficie específica y el contenido de aire.

OPTIMO CONTENIDO DE AIRE

Considerando lo anteriormente expuesto es posible ya establecer el concepto de «óptimo contenido de aire», el cual puede ser definido como «aquel que rinde la máxima resistencia práctica a congelación y deshielo con un mínimo de pérdidas de resistencias mecánicas».

Como ya se ha indicado, una proporción dada de un aditivo incorporador de aire, suficiente para incorporar tanto o más que el porcentaje de aire recomendado por los diferentes métodos de diseño de mezclas, induce un

sistema de burbujas el cual se caracteriza por un factor de espaciamiento que puede ser sólo ligeramente modificado por manipuleo del concreto fresco.

Puede concluirse que la magnitud del óptimo contenido de aire de un concreto, bajo un juego dado de condiciones, puede variar ampliamente, dependiendo del método e intensidad de la compactación; pero el óptimo contenido de aire, cualquiera que sea él en magnitud, deberá obtenerse con el mismo porcentaje de un aditivo incorporador de aire determinado.

11.4.3. OTROS ADITIVOS Y ADICIONES

CONCEPTO

En algunos casos puede ser necesario incorporar al concreto algún otro tipo de aditivo conjuntamente con el aire, pudiendo ocurrir que no se alcance los porcentajes de aire esperados. A continuación se examinará el comportamiento de los aditivos más usuales.

Debe recordarse que diversos tipos de aditivos pueden influir en el contenido de aire y en la calidad del sistema de burbujas. Por lo tanto deberá tenerse cuidado cuando tales aditivos son empleados en forma conjunta con un aditivo incorporador de aire, a fin de asegurar que son compatibles.

CLORURO DE CALCIO

Si bien la mayoría de los investigadores coinciden en que el cloruro de calcio puede ser empleado conjuntamente con aditivos incorporadores de aire, se indica que si el cloruro de calcio es añadido en contacto directo con ciertos aditivos incorporadores de aire puede ocurrir una reacción instantánea de ambos, la misma que puede inhibir la incorporación de aire.

Orchard señala que la incorporación de aire no es afectada por la incorporación de cloruro de calcio y que, igualmente, no afecta la acción de éste. En cambio, Backstrom señala que la adición de 1% de cloruro de calcio a concretos con aire incorporado da por resultado burbujas más grandes y factores de espaciamiento más altos.

Si la afirmación de Backstrom fuera correcta en todos los casos, sería necesario tenerla en consideración, especialmente cuando el cloruro de calcio se emplee en climas fríos, ya que el efecto negativo de éste sobre el tamaño de las burbujas y el factor de espaciamiento podría incrementarse en forma apreciable, con serias implicancias sobre la resistencia del concreto a procesos de congelación.

En general se recomienda considerar que una cantidad dada de un aditivo incorporador de aire generalmente produce una cantidad ligeramente mayor de

aire en aquellos casos en que se emplea cloruro de calcio como acelerante.

RETARDADORES

Cuando se adiciona un retardador de fragua a concretos con aire incorporado, se aprecia que si bien el retardador favorece la incorporación de aire, se presenta un incremento en el tamaño de las burbujas.

Cuando se emplea altos porcentajes de aditivos retardadores del grupo de los lidnosulfonatos, se aprecia reducciones significativas en el porcentaje de agente incorporador de aire que se requiere para un contenido de aire constante.

En general, se considera que la cantidad de aditivo incorporador de aire requerida para producir un contenido de aire dado puede ser reducida en un tercio o más cuando se emplea con determinados aditivos reductores de agua.

ADITIVOS MINERALES

Los estudios realizados por Blanks han permitido determinar que la adición de puzolanas u otros tipos de partículas minerales finamente divididas tiende a reducir el porcentaje de aire incorporado a las mezclas.

Estos resultados coinciden con los de Larson quién, trabajando con cenizas como material de reemplazo, determino fuertes reducciones en el contenido de aire. En este caso los efectos son más marcados conforme el contenido de carbón de las mismas se incrementa.

En ambos casos, para incorporar el porcentaje adecuado de aire es necesario efectuar ajustes en la dosificación del aditivo incorporador de aire.

El incremento de la cantidad de materiales finamente divididos en el concreto, debido al empleo de cenizas u otras puzolanas, negro de carbón u otros pigmentos finamente divididos, o el empleo de bentonitas, generalmente disminuye el el volumen de aire incorporado por el aditivo.

15.11.5 TEMPERATURA

La temperatura de los ingredientes del concreto y de éste durante el proceso de mezcla, la cual puede variar en forma importante dependiendo de la estación y del hecho que los agregados hayan sido o no calentados, tiene un efecto importante sobre el contenido de aire producido por un porcentaje de aditivo dado.

Se ha determinado que conforme la temperatura del concreto se incrementa, se requiere un mayor dosaje del aditivo incorporador de aire para mantener un contenido de aire adecuado.

Se ha determinado que permaneciendo constante el porcentaje de aditivo, una mezcla de concreto a una temperatura de 10C tendrá un contenido de aire cerca del 30% mayor que cuando la misma mezcla se encuentra a una temperatura de 21C; así como que a 38C el contenido de aire de la mezcla deberá ser 25% menor que a 21C.

Es por tanto evidente que cambios en la temperatura ambiental o el empleo de ingredientes calentados, cuando se prepara el concreto en climas fríos, pueden causar grandes variaciones en el contenido de aire si no se toman las providencias adecuadas.

En relación con los efectos de la temperatura sobre el contenido de aire, los estudios de Backstrom y Wolkodoff han determinado que si bien una elevación en la temperatura del concreto deberá reducir el contenido total de aire y también el tamaño de las burbujas, el factor de espaciamiento tiende a permanecer constante. De ello deducen que si se logra mantener constante el contenido de aire, se obtendrá un mejor sistema de burbujas en las temperaturas cálidas que en las frías.

15.11.6 RELACION AGUA-CEMENTO

11.6.1 CONCEPTO

Uno de los factores importantes que afecta la distribución por tamaños, la frecuencia de las burbujas de aire, el factor de espaciamiento y la resistencia del concreto a procesos de congelación y deshielo, es la relación agua-cemento.

El incremento de la resistencia a procesos de congelación y deshielo refleja, generalmente, una reducción en el tamaño de las burbujas y en el factor de espaciamiento. Tal reducción puede ser obtenida, permaneciendo los otros factores constantes, por disminución en la relación agua-cemento, reducción que tiende a incrementar la proporción de agente incorporador de aire necesaria para producir un contenido de aire dado, pero al mismo tiempo tiende a disminuir el contenido de aire requerido para obtener máxima durabilidad.

11.6.2. FORMA DE ACCION

Si otras condiciones y relaciones son constantes, incluyendo la relación del agente incorporador de aire al agua de la mezcla, la relación agua-cemento influye en el tamaño y distribución de las burbujas de aire debido a que la viscosidad de la fase agua y el contenido de aire de la pasta de cemento son fuertemente alterados conforme la relación agua-cemento cambia.

Conforme la relación agua-cemento disminuye, la viscosidad de la fase agua se incrementa y el contenido de aire de la pasta disminuye. La velocidad de difusión del aire disuelto tiende a disminuir con el incremento de la viscosidad de la fase agua y el porcentaje de aire que pasa de pequeñas a grandes burbujas disminuye con el incremento de la distancia entre burbujas. Por tanto, ambos factores favorecen la retención de altos valores de la superficie específica de burbujas en bajos valores de la relación agua-cemento.

En cualquier relación agua-cemento, dentro de los límites normalmente empleados, el factor de espaciamiento puede ser pequeño o grande dependiendo de la eficiencia y concentración del agente incorporador de aire empleado.

Sin embargo, es importante recordar que la disminución en la viscosidad e incremento en el contenido de aire de la pasta que acompañan a un incremento a un incremento en la relación agua-cemento, tienden a disminuir la superficie específica de las burbujas, pudiendo ser el factor de espaciamiento mayor o menor.

Además, cualquier acción que retarde la velocidad de endurecimiento del concreto deberá tender a incrementar el factor de espaciamiento debido a que se tendrá mayor cantidad de tiempo para la transmisión del aire de las pequeñas a las grandes burbujas.

Finalmente, cualquier incremento en la relación agua-cemento puede dar por resultado un incremento en el contenido de aire y en el tamaño de las burbujas.

11.6.3. EFECTOS DE LA RELACION AGUA-CEMENTO

Un estudio de la distribución de burbujas en concretos de contenido de aire similar pero de diferentes relaciones agua-cemento, revela amplias diferencias en la distribución de burbujas por tamaños.

Para concretos de relación agua-cemento del orden de 0.35 se tiene que aproximadamente el 75% de las burbujas son de 50 micrones o menores en diámetro. En cambio sólo el 12% de las burbujas están en ese orden de magnitud en concretos con relación agua-cemento de 0.75

Los menores diámetros observados en las burbujas presentes en concretos cuya relación agua-cemento es de 0.35 a 0.55 está entre 7 y 8 micrones, mientras que en concretos cuya relación agua-cemento es del orden de 0.75 los menores diámetros están en el orden de 16 micrones.

Se ha determinado cuantitativamente estos cambios en la distribución de partículas por tamaños, indicándose que cuando se incrementa la relación agua-cemento de 0.35 a 0.55, el número de burbujas por pulgada cúbica de concreto

disminuye de cerca de 7 millones a aproximadamente 2.5 millones. En una relación agua-cemento de 0.75 el concreto sólo contiene aproximadamente 700 mil burbujas por pulgada cúbica.

Igualmente se ha establecido que las burbujas menores de 20 micrones en diámetro constituyen el 58% del total de burbujas en una relación agua-cemento de 0.35 y solamente el 9% del total de burbujas en una relación agua-cemento de 0.75

Conclusión análoga ha sido que con una relación agua-cemento de 0.35 a 0.55, muchas de las burbujas son menores de 20 micrones en diámetro, en tanto que cuando se tiene una relación agua-cemento de 0.75, la mayoría de las burbujas están entre 20 y 40 micrones.

Se ha tratado de determinar una correlación entre el factor de espaciamiento y la resistencia a la congelación. Se ha determinado que los concretos de baja relación agua-cemento poseen un factor de espaciamiento menor y son más resistentes a procesos de congelación.

15.11.7 ALTURA DE LA SECCION

Bloem ha efectuado estudios para determinar la posibilidad que el aire tenga tendencia a subir hacia la superficie de los elementos estructurales.

Los resultados de sus investigaciones han indicado que, debido a que el concreto plástico actúa como un fluido, tiende a comprimir el aire de las secciones inferiores del elemento, pero que la variación en los porcentajes es insignificante encontrándose una diferencia del 1% entre los porcentajes de aire en las zonas superior e inferior de la estructura.

De todo ello puede deducirse que la aparente variación en el contenido de aire con la altura de la sección debe atribuirse más a la compresión del aire en las zonas inferiores debido a la presión del concreto que está sobreimpuesto que a una corriente ascendente de aire.

15.11.8 MEZCLADO

11.8.1 TIEMPO DE MEZCLADO

La variación en el tiempo de mezclado del concreto da lugar a modificaciones en el contenido de aire, aunque dentro de los límites de tiempo usuales el efecto es pequeño.

El efecto del tiempo de mezclado sobre el volumen de aire incorporado al concreto es de considerable importancia en la producción de concreto premezclado, material que puede ser transportado a distancias variables con la consiguiente modificación en los tiempos de mezclado y agitado.

Se ha podido establecer, principalmente por ensayos de laboratorio de la National Ready Mixed Concrete Association, que el contenido de aire alcanza un máximo a los 12 minutos de mezclado y, a partir de ese momento, comienza a reducirse en forma lenta pero uniforme de tal manera que al cabo de 30 minutos de mezcla el contenido de aire se reduce en cerca del 15% y a los 90 minutos de mezcla el contenido de aire se ha reducido en un 40%. La interpretación de estos resultados debe tener en consideración que el tiempo de mezcla fue anormalmente alto, pero que la magnitud del mismo debe ser tomada en cuenta al controlar el contenido de aire.

Algunos autores indican que la reducción en el contenido de aire puede resultar de un incremento en las partículas más finas debido al mezclado prolongado, con la acción abrasiva consiguiente, o simplemente de un incremento en la relación de pérdida de aire a generación de espuma en la porción final del período de mezclado.

11.8.2. PROCESO DE MEZCLADO

El efecto de la acción de mezclado sobre el volumen de aire incorporado varía con el tipo y condición de la mezcladora.

El volumen de aire incorporado por un aditivo, en una mezcladora, puede disminuir apreciablemente conforme las paletas se gastan, o cuando se permite que el mortero se acumule en el tambor o en las paletas. Una acción de mezclado ineficiente puede resultar en volúmenes aparentemente normales de aire incorporado, pero las burbujas formadas pueden ser grandes.

Igualmente, ocurrirán incrementos en el volumen de aire incorporado si la mezcladora es cargada a menos de su capacidad nominal, presentándose fuertes disminuciones si la mezcladora es sobrecargada. Se ha encontrado en experiencias de laboratorio, para diferentes mezcladoras y mezclas, que el contenido de aire se incrementa del 4% al 8% en la medida que el tamaño de la tanda se incrementa del 40% al 100% de la capacidad de trabajo de la mezcladora.

Si se añade una cantidad adicional de agua para obtener el asentamiento deseado, deberá comprobarse el contenido de aire dado que puede requerirse algún ajuste. La adición de agua sin un mezclado completo puede dar por resultado una distribución no uniforme del aire y el agua al interior de la tanda.

Se debe recordar que una mezcladora estacionaria, una mezcladora pavimentadora y una mezcladora en tránsito pueden desarrollar diferencias significativas en el volumen de aire incorporado en una mezcla dada.

15.11.9 ASENTAMIENTO

Dentro de los límites usuales de los concretos plásticos, las variaciones en el asentamiento no deberían causar cambios fundamentales en el contenido de aire; pero sí, los incrementos en el contenido de aire tienden a incrementar el asentamiento.

En mezclas extremadamente duras o secas, la incorporación de aire puede ser más difícil que en mezclas plásticas. Igualmente, concretos muy húmedos pueden difícilmente retener el aire durante los procesos de mezcla y colocación.

Es importante indicar que conforme disminuye el asentamiento, permaneciendo constantes la relación agua-cemento y el volumen de aire incorporado, disminuye el tamaño de las burbujas y el factor de espaciamiento. Las mezclas con alto asentamiento pueden tener un mayor factor de espaciamiento siendo, por ello, menos deseables que las mezclas de bajo asentamiento.

15.11.10 COMPACTACION

11.10.1 CONCEPTO

El procedimiento e intensidad de la compactación empleada para el acomodo final del concreto en los encofrados ejercen una influencia fundamental sobre las burbujas de aire.

La vibración interna intensa aplicada a la masa de concreto da lugar a que las burbujas de aire se eleven hacia la superficie y sean expelidas, ocurriendo el proceso con mayor facilidad conforme es mayor el diámetro de las mismas. Las burbujas moderadamente pequeñas pueden tender a subir si la vibración es intensa y prolongada.

Independientemente de lo anterior existe evidencia que el factor de espaciamiento de las burbujas de diámetro menor presentes en la matriz es muy poco alterado, aún con vibración intensa.

Se estima que en una mezcla adecuadamente diseñada, si la vibración es aplicada con la intensidad y duración necesarias para efectuar consolidación, no deberá ocurrir una renovación importante de aire incorporado.

11.10.2 FORMA DE ACCION

El contenido de aire de las mezclas se reduce durante el proceso de compactación por dos razones:

- a) Debido a que el movimiento de burbujas y su escape hacia y desde la superficie del concreto es facilitado por el proceso de vibración; y
- b) Debido a que las grandes burbujas son rotas en pequeñas burbujas con lo que el aire contenido es fácilmente comprimido por la tensión capilar.

Si bien el proceso de compactación da por resultado un decrecimiento en el contenido de aire y en el tamaño promedio de las burbujas, el factor de espaciamiento permanece constante independientemente que el proceso de vibración se haya efectuado manual o mecánicamente.

Ello tiende a confirmar que la magnitud del factor de espaciamiento está determinada por características inherentes a la mezcla de concreto en si misma, incluyendo la naturaleza y concentración del agente incorporador de aire.

Las grandes burbujas se pierden en parte por escape hacia la superficie superior expuesta y en parte por rotura durante el proceso de compactación. La rotura ocurre debido a distorsión de la burbuja ya la que acción de corte incidental a la vibración elonga a la burbuja en un perfil más o menos cilíndrico cuya longitud excede a tres veces el diámetro, momento en que la tensión superficial tiende a dividir la burbuja en dos burbujas esféricas con un área superficial menor que la de la burbuja deteriorada.

Esta acción de división de las burbujas es en parte controlada por la película que contiene el aditivo en la superficie de contacto aire-agua, la cual tiende a resistir la distorsión y consecuente elongación de la superficie de contacto aire-agua debido a que el momentaneo incremento en el área tiende instantaneamente a incrementar la tensión superficial en la película, tendiendo este efecto a resistir el cambio rápido en la superficie de contacto.

Igualmente, la reducción en la tensión superficial por el agente incorporador de aire deberá reducir la fuerza que tiende a partir la gran burbuja distorsionada. Todo ello explica el porque el proceso de distorsión y desintegración de grandes burbujas en pequeñas de aproximadamente la mitad del tamaño disminuye para mezclas con aire incorporado.

Por otra parte, muy pocas burbujas pequeñas son producidas por desintegración de las grandes burbujas durante el vibrado. La distorsión de las burbujas durante la compactación deberá disminuir con el tamaño de las burbujas, debido principalmente a que tanto las diferencias en subpresión como esfuerzo de corte en lados opuestos de la burbuja tienden a disminuir progresivamente con el tamaño de la misma. Por tanto, el proceso de rotura de burbujas distorsionadas es de poca importancia en las burbujas pequeñas.

Toda la información disponible tiende a confirmar:

- a) que al momento de descargar el concreto de la mezcladora los parámetros de las burbujas de aire, incluyendo el factor de espaciamiento ya han sido establecidos.
- b) Que igualmente ya se ha definido la resistencia a congelación en el concreto por acción del aire, la cual permanece relativamente constante a despecho de variaciones en los procedimientos de manejo y vibración del concreto, siempre que el volumen de aire inicialmente incorporado sea igual o exceda al denominado óptimo para la relación agua-cemento y tamaño máximo del agregado empleados.
- c) Cuando se emplea menos aire que el óptimo, la resistencia a congelación no es afectada por el porcentaje normal de vibración pero si lo es por la sobrevibración. Esta aparente regresión ocurre aún si los valores del factor de espaciamiento son relativamente bajos e indica que el contenido de aire total tiene importancia en si mismo, independientemente del valor del factor de espaciamiento.

Teniendo en consideración la pérdida de aire originada por el proceso de compactación por vibración, se recomienda que las muestras de concreto en las que se va a determinar el contenido de aire se tomen en el encofrado, después que se ha aplicado vibración a la mezcla.

Partiendo de la aseveración que la disminución en el contenido de aire es, en parte, una función del trabajo que requiere efectuar el proceso de compactación de un volumen unitario de concreto y está en función inversa del área superficial expuesta a la atmósfera, Higginson ha demostrado que la pérdida de aire es mayor para estructuras pequeñas sometidas a igual período de vibrado que grandes estructuras, siendo relativamente insignificante cuando se trata de grandes estructuras de concreto ciclopeo.

11.10.3 EFECTOS DE LA VIBRACION

El cambio efectuado en el tamaño de las burbujas es función del tiempo de compactación. En efecto, se han podido comprobar los siguientes hechos:

- a) En concretos sin aire incorporado el contenido de aire disminuye de 3.3% después de 5 segundos de vibración a 1% después de 20 segundos de vibración.
- b) En concretos con aire incorporado que contienen 12% de aire después de 5 segundos de vibración, el porcentaje baja a 7.3% después de 20 segundos de vibrado.
- c) El proceso de vibrado tiende a producir un más alto contenido de aire en la porción superior del concreto.
- d) Conforme se incrementa el tiempo de vibrado aumenta el porcentaje de burbujas pequeñas. Las burbujas mayores de 90 micrones se reducen

- del 19% al 11% del total de vacíos y las burbujas menores de 50 micrones se incrementan del 55% al 72% del total.
- e) Cuando se somete mezclas de concreto, las cuales contienen originariamente 7% de aire, a períodos de vibración de 50 segundos, el contenido de aire disminuye al 1.2%
 - f) Para condiciones similares, el número total de burbujas por centímetro cúbico de concreto disminuye de 300 mil a 120 mil y el número de burbujas menores de 40 micrones disminuye de 250 mil a 100 mil.
 - g) Las burbujas mayores de 60 micrones son fuertemente reducidas a burbujas menores por la vibración adicional, probablemente como resultado del movimiento y escape hacia la superficie superior del concreto.

En síntesis, puede afirmarse que el período de vibración de la mezcla de concreto tiene una importante influencia sobre el contenido de aire incorporado.

15.11.11 PERIODO DE ALMACENAMIENTO

El problema de la forma en que el tiempo de almacenamiento puede afectar la capacidad de incorporación de aire es importante en los casos en que el concreto es preparado utilizando cementos portland con incorporador de aire.

Se ha determinado que, en períodos hasta de cinco años de almacenamiento, los cementos con incorporador de aire no muestran pérdida apreciable en su capacidad de incorporación siempre que el almacenamiento se efectúe bajo condiciones apropiadas que prevengan el deterioro del cemento, generalmente causado por la humedad y el dióxido de carbono.

En general, las muestras almacenadas en recipientes metálicos no presentan cambios importantes, en tanto que aquellas almacenadas en sacos de papel si presentan pérdidas importantes, sobre todo después del año.

Igualmente, se ha establecido una correlación entre los resultados del ensayo de pérdida por calcinación y el contenido de aire de cementos almacenados en recipientes metálicos y sacos de papel. En este aspecto puede afirmarse que la capacidad de incorporación de aire de los cementos no se reducirá después del período de almacenamiento si no existe incremento apreciable en la pérdida por calcinación.

15.11.12 CONCLUSION

Lo expuesto sobre la forma en que diversos factores pueden influir en el contenido de aire del concreto no debe dejar la impresión que el mantenimiento del contenido de aire dentro de límites razonables es extremadamente difícil de obtener. En la práctica, muchos de los factores mencionados permanecen

constantes dentro de una operación de mezclado determinada, no alterando por consiguiente el contenido de aire.

Sin embargo se considera que es importante conocer todos los factores mencionados a fin que en el diseño de la mezcla se tengan presentes las fuentes potenciales de variación y se conozca como controlarlas cuando ellas se presentan.

15.12. DOSIFICACION

La dosificación de los concretos con aire incorporado es similar a la de los concretos sin él. Se recomienda que el método de dosificación de los concretos con aire incorporado siga los procedimientos indicados por el Comité 211 del ACI. Estos procedimientos consideran la reducción en el agua y agregado fino permitida por la mejora en la trabajabilidad.

15.13. PROCESO DE PUESTA EN OBRA

15.13.1 EVALUACION, SELECCION Y CONTROL

A fin de lograr las mejoras deseadas en la resistencia a la congelación, el aire incorporado deberá cumplir con ciertas características. No solamente es importante el volumen total de aire, lo son aún más el tamaño y distribución de las burbujas los cuales deberán ser tales como para proporcionar protección adecuada a la pasta.

A fin de asegurar que un aditivo incorporador de aire ha de producir un sistema de burbujas adecuado, él deberá cumplir con los requisitos indicados en la Norma ASTM C 260. Esta Norma determina límites a los efectos que un aditivo incorporador de aire puede tener sobre la exudación, tiempo de fraguado, resistencias en compresión y flexión, resistencia a la congelación y deshielo, y cambios de longitud durante el secado de una mezcla de concreto endurecido cuando se la compara con una mezcla de concreto similar que contiene un aditivo incorporador de aire estándar de referencia, tal como una resina vinsol neutralizada. El procedimiento por el cual estos efectos pueden ser determinados está dado por la Norma ASTM C 233.

Tanto los ensayos de laboratorio como la experiencia han demostrado que los concretos que tienen contenidos de aire en el rango de los valores dados por la recomendación ACI 211.1 deberán tener, generalmente, una distribución y tamaño de burbujas apropiados en aquellos casos en que el aditivo incorporador de aire empleado cumple con los requisitos de la Norma ASTM C 260.

El empleo de la Norma ASTM C 457 para determinar las características del sistema de burbujas en el concreto endurecido en aquellos casos en que se

efectúan estudios de proporcionamiento del concreto, proporciona una mayor seguridad que se obtendrá un concreto de resistencia satisfactoria a los procesos de congelación y deshielo.

La mayoría de los aditivos incorporadores de aire se venden en forma líquida, y unos pocos como polvo, escamas o semisólido. La marca, fabrica, y cantidad neta en kilos o galones, deberán estar claramente indicadas en el recipiente en el cual el aditivo es entregado. El aditivo deberá cumplir con los requisitos de variación permisibles dentro de cada lote y entre embarques, de acuerdo a la Norma ASTM C 260. Los ensayos de aceptación deberán cumplir con lo indicado en la Norma ASTM C 233.

15.13.2 DOSIFICACION, EMPLEO Y ALMACENAMIENTO

A fin de alcanzar la mayor uniformidad en una mezcla de concreto y en tandas sucesivas, es recomendable que el aditivo incorporador de aire soluble en agua sea añadido a la mezcla en forma de solución y no como un sólido.

En general, únicamente pequeñas cantidades de aditivo incorporador de aire (aproximadamente 0.05% de ingrediente activo en peso del cemento) son requeridas para incorporar el volumen de aire deseado. Si el aditivo está en polvo, escamas o semisólido, deberá prepararse una solución antes de emplearlo, siguiendo las recomendaciones del fabricante.

Si las recomendaciones del fabricante en relación con el volumen de aditivo incorporador de aire no dan el resultado deseado, será necesario efectuar ajustes en la cantidad de aditivo añadida. Para un conjunto dado de condiciones y materiales, la cantidad de aire incorporada es practicamente proporcional a la aditivo incorporador de aire utilizado.

Sin embargo, en algunos casos, puede alcanzarse un techo y ello puede ocurrir en mezclas de bajo asentamiento y alto contenido de cemento preparadas en clima cálido utilizando cementos finamente molidos y grandes cantidades de material que pasa la Malla N° 200.

En otros casos puede requerirse cambios importantes en los materiales utilizados para preparar el aditivo incorporador de aire, o cambios en el cemento o el agregado fino, o un incremento en el asentamiento, para obtener el contenido de aire requerido.

Debe darse atención a un adecuado almacenamiento del aditivo incorporador de aire, siendo recomendable seguir las indicaciones del fabricante. En general, los aditivos incorporadores de aire no son dañados por la congelación, debiendo seguirse las recomendaciones del fabricante en relación con los efectos de la congelación sobre el producto.

Un aditivo que es almacenado por más de seis meses en la zona de empleo después de haber finalizado los ensayos previos al embarque, o un aditivo en almacenamiento local, ya sea del vendedor o contratista, por más de seis meses, deberá ser vuelto a ensayar antes de utilizarlo, debiendo ser rechazado si no cumple con cualquiera de los requerimientos de la Norma ASTM C 260.

15.13.3- CONTROL DEL CONTENIDO DE AIRE

Lograr los beneficios de la incorporación de aire requiere un cuidadoso control del contenido de aire. Para propósitos de control, las muestras para la determinación del contenido de aire deberán ser obtenidas en el punto de colocación. Los ensayos de contenido de aire de la mezcla fresca deberán efectuarse a intervalos regulares con fines de control. Igualmente deberán efectuarse ensayos en todos aquellos casos en que existan razones para pensar en un cambio en el contenido de aire.

El contenido de aire importante es aquel que está presente en el concreto después de la consolidación. Es evidente que las pérdidas de aire que ocurren debido al manejo, transporte y consolidación, no se reflejarán en los ensayos de contenido de aire de muestras de concreto tomadas a la salida de la mezcladora. Ello es la razón principal por la que el contenido de aire de la muestra debe ser comprobado en el punto de descarga de los encofrados.

Como ya se ha indicado en el Acápito 15.10, hay tres procedimientos estandarizados para determinar el contenido de aire de una muestra de concreto fresco:

- El método gravimétrico de acuerdo a ASTM C 138;
- El método volumétrico de acuerdo a ASTM C 173;
- El método de presión de acuerdo a ASTM C 231.

Una aplicación del método volumétrico, empleando el denominado Chase Air Indicator, en la cual se emplea una pequeña muestra de mortero proveniente del concreto, no ha sido estandarizada y no deberá ser empleada para determinar el cumplimiento de los límites especificados.

Los tres métodos indicados miden únicamente el volumen de aire y no las características de las burbujas. El factor de espaciamiento y otros parámetros significativos del sistema de burbujas en el concreto endurecido pueden ser determinados únicamente por métodos microscópicos tales como los descritos en la Norma ASTM C 457.

El empleo de estos métodos en coordinación con la investigación de la dosificación del concreto a ser empleada en nuevos proyectos proporciona una adecuada seguridad que se obtendrá un concreto de resistencia satisfactoria a los procesos de congelación y deshielo.

Debe indicarse, adicionalmente, que ha sido demostrado que el contenido de aire de una muestra de concreto generalmente es indicativo de la bondad del sistema de burbujas en aquellos casos en que el aditivo incorporador de aire cumple con los requisitos de la Norma ASTM C 260.

Todos los aspectos relacionados con el mezclado, transporte y colocación; así como aquellos referidos a las propiedades de los materiales y las proporciones de la mezcla, deberán ser mantenidos tan constantes como sea posible a fin que el contenido de aire sea uniforme y esté dentro del rango especificado para la obra. Ello es especialmente importante si se considera que demasiado aire puede reducir la resistencia sin una correspondiente mejora en la durabilidad, en tanto que muy poco aire puede no proporcionar la trabajabilidad y durabilidad deseadas.

Una inspección adecuada debiera garantizar que los aditivos incorporadores de aire cumplen con las especificaciones apropiadas, que son almacenados sin contaminación o deterioro, y que ellos son adecuadamente dosificados e introducidos a la mezcla de concreto tal como se ha especificado.

El contenido de aire del concreto deberá ser comprobado durante el curso del trabajo, siguiendo recomendaciones aceptables. Las prácticas de obra que causan excesiva pérdida de aire deberán ser corregidas o deberá, inicialmente, incorporarse aire adicional compensante.

15.14. INFLUENCIA SOBRE EL ESTADO FRESCO

15.14.1. ALCANCE

Las diminutas esferas que constituyen el aire incorporado actúan como un ingrediente adicional en la mezcla de concreto y, por lo tanto, deben modificar las propiedades de éste, y su presencia ser considerada en la selección de las proporciones de la mezcla.

El cambio más importante que se produce es en la durabilidad, cambio que se manifiesta por la resistencia a alteraciones debidas a la acción de heladas y deshielo. Un beneficio secundario pero importante es que el aire actúa como un lubricante en el interior de la masa, permitiendo una reducción en el volumen de agua que es necesario para obtener una determinada resistencia.

15.14.2. TRABAJABILIDAD

14.2.1. ASPECTOS GENERALES

La incorporación de aire a la mezcla mejora la trabajabilidad en forma tal que permite una reducción en los contenidos de agua y arena.

Para que el concreto tenga una adecuada trabajabilidad las partículas de agregado deben estar espaciadas de tal manera que ellas pueden moverse con relativa facilidad durante los procesos de mezcla y colocación. En un concreto normal la trabajabilidad puede ser alcanzada por la inclusión de suficiente arena fina, cemento y agua, los cuales forman una pasta que separa las partículas de agregado grueso y permite que éstas puedan moverse con un mínimo de interferencia mutua. Empleando tales medios el espaciamiento de los sólidos se incrementa y la dilatación necesaria para manipular el concreto fresco se reduce, con la consecuente reducción en el trabajo requerido.

Es indudable que este tipo de solución puede atentar contra la economía de la mezcla y obligar a soluciones forzadas en el proceso de dosificación, el cual siempre significa un compromiso entre los requerimientos por trabajabilidad y los requisitos de resistencia, durabilidad, estabilidad de volumen y otras propiedades del concreto endurecido.

En este sentido no debe olvidarse que la trabajabilidad de las mezclas requiere que los vacíos entre partículas de agregado estén completamente llenos de pasta de cemento, mientras que la óptima calidad del concreto endurecido requiere que esos vacíos estén casi pero no totalmente llenos.

Toca al aire incorporado a la mezcla ayudar a resolver este aparente conflicto. En primer lugar las burbujas de aire incrementan el volumen efectivo de la pasta durante la mezcla y colocación, eliminando así la necesidad de la porción del contenido de pasta añadida específicamente para inducir trabajabilidad, porción que ha sido estimada por Kennedy en el 20% al 35% del contenido total de pasta del concreto.

En segundo lugar, desde que casi todo el volumen de aire incorporado se presenta en burbujas cuyo diámetro equivale a los tamaños menores de los granos de arena, estas burbujas puedan ser consideradas como incrementando el volumen efectivo de mortero durante los procesos de mezcla y colocación, con lo que se compensa la falta de finos o el mayor grosor de los mismos. La densidad requerida para el concreto colocado es obtenida mediante el proceso de compactación como resultado del cual la mitad a los dos tercios del aire contenido en la pasta fresca escapa.

14.2.2. EFECTOS

El concreto con aire incorporado ha demostrado ser considerablemente más plástico y trabajable que el concreto sin él. Igualmente, la mezcla es más homogénea. Se considera que la razón por la cual la trabajabilidad del concreto mejora al incorporar aire es doble:

- a) Las burbujas de aire, mantenidas esféricas por tensión superficial, actúan como un agregado fino de muy baja fricción superficial y considerable elasticidad; y
- b) Las diminutas burbujas esféricas actúan como un lubricante del agregado fino, mediante un efecto de cojinete. De esta manera, sutendencia a separar las partículas de arena reduce la interferencia de las mismas.

Estudios efectuados por el Bureau of Reclamation de los Estados Unidos han permitido determinar que la incorporación de aire produce en el concreto un contenido de mortero que se aproxima a los requisitos establecidos por Weymouth, alcanzándose finalmente los beneficios de las granulometrías más gruesas como resultado de la pérdida de una proporción importante del contenido original de aire durante el proceso de compactación.

Experiencias de laboratorio han permitido determinar que el contenido de aire en el concreto fresco, necesario para reproducir la granulometría Weymouth, varía del 5% para concretos que contienen agregado de 6" de tamaño máximo a 16% para agregados con 3/8" de tamaño máximo. Del 40% al 65% de este aire se pierde durante el proceso de compactación, lo que permite alcanzar los valores de contenido de aire recomendados por las tablas de diseño para concretos con aire incorporado.

La incorporación de aire a la mezcla hace que ésta se comporte como sobrearenosa, por lo que la presencia de aire puede ser acompañada por reducciones en los contenidos de arena y agua, lo que permite reducciones en la relación agua-cemento que tienden a compensar la pérdida de resistencia debida a la presencia de vacíos.

De acuerdo a lo expresado se estima que el contenido de arena puede ser reducido en un porcentaje aproximadamente igual al volumen de aire incorporado, siendo posible reducir el contenido de agua en un 2% a 4% por cada 1% de aire incorporado sin que se experimente pérdida en la consistencia.

15.14.3. CONSISTENCIA

Las experiencias de laboratorio han indicado que el contenido de arena puede ser reducido en un monto aproximadamente igual al volumen de aire incorporado, y el contenido de agua puede ser reducido de 2% a 4% por cada 1% de aire incorporado sin pérdida de asentamiento.

Es importante indicar que la incorporación de aire afecta la consistencia o movilidad de la mezcla de una manera cualitativa ya que la mezcla puede volverse más plástica, de manera tal que para el mismo asentamiento la mezcla que contiene aire incorporado es más fácil de colocar y compactar que una mezcla libre de aire.

Ensayos efectuados en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Ingeniería han permitido observar incrementos hasta de 3" en el asentamiento para mezclas a las cuales se había añadido una onza de aditivo incorporador de aire por cada saco de cemento. Al realizar la corrección de la dosificación, reduciendo el contenido de arena, se pudo apreciar un otable incremento en la fluidez de la mezcla.

Finalmente es importante indicar que a igual consistencia, los concretos con aire incorporado son considerablemente más trabajables y cohesivos que concretos similares sin aire incorporado, excepto en los altos contenidos de cemento.

15.14.4. SEGREGACION Y EXUDACION

La segregación y exudación del concreto son dos diferentes manifestaciones de pérdida de la homogeneidad obtenida durante los procesos de mezcla y colocación.

La segregación implica separación del agregado grueso del mortero o separación de la pasta de cemento del agregado.

La exudación es el flujo del agua de la mezcla, usualmente como un resultado de la sedimentación de los sólidos con la resultante aparición de una capa de agua sobre la superficie del concreto, o también como un resultado del drenaje lateral del agua o del desplazamiento de la misma hacia la parte inferior del concreto.

La incorporación de aire a las mezclas de concreto reduce en forma notable la segregación y exudación, aceptándose como un criterio general que, aparentemente, las burbujas de aire mantienen las partículas sólidas en suspensión, de manera tal que la sedimentación se reduce y el agua no es expelida.

Existen varios criterios que tratan de explicar porque la incorporación de aire tiende a controlar los procesos de segregación y exudación. Los tres que a continuación se presentan son los más aceptados:

- a) El Grupo Walker sostiene que la reducción en los procesos de segregación y exudación probablemente es el resultado de cuatro fenómenos físicos y físico-químicos relacionados intimamente con la incorporación de un sistema de pequeñas burbujas en el concreto fresco; dichos fenómenos son:
 - 1) Las burbujas flotan sobre y entre los agregados y el cemento, con lo que disminuyen la velocidad con la que ocurre la sedimentación en el concreto colocado.
 - 2) Las burbujas disminuyen el área efectiva a través de la cual pueden ocurrir los movimientos diferenciales del agua.

- 3) La capacidad de adherencia entre la pasta y los agregados es aumentada en la medida que se establece adherencia mutua entre las burbujas y las partículas de cemento y agregados.
- 4) El área superficial de las burbujas presentes en el concreto plástico es lo suficientemente grande como para retardar la velocidad con la que el agua deberá separarse de la pasta por acción del drenaje.

Powers ha estudiado el efecto de la subpresión y de la disminución del área transversal de los poros capilares a través de los cuales el agua se mueve y tiende a escapar durante la exudación. Al respecto Powers indica que la incorporación de aire en el concreto incrementa el área superficial interna (interfase aire-agua; aire-sólido; agua-sólido) de una masa dada de pasta, incrementando también la compresión capilar del concreto y disminuyendo el espesor de la película de agua sobre la superficie interna. De hecho, el peso unitario del concreto, y especialmente de la pasta, disminuye.

Powers indica que estas acciones combinadas tienden a disminuir la separación entre la pasta y el agregado debido a que la pasta se hace más viscosa por resistencia de las fuerzas capilares en la superficie externa a incrementar el área superficial de la masa.

Powers concluye que el efecto combinado de todos estos fenómenos es una función compleja que muestra una disminución en la velocidad de exudación conforme el contenido de aire de la pasta se incrementa.

El Grupo Mielenz indica que un concreto al cual se ha incorporado aire en forma adecuada debería contener de 2 á 7 millones de burbujas de aire por pulgada cúbica de concreto, después de los procesos de colocación y endurecimiento. Este número de burbujas da lugar a una interface aire-agua tan alta como 233 pulgadas cuadradas por pulgada cúbica de pasta.

De acuerdo a ello señalan que el sistema de burbujas producido en una pasta de cemento en la que se ha realizado una adecuada incorporación de aire, es análogo en frecuencia y tamaño de burbujas al de la espuma producida en una solución acuosa y por lo tanto deberá responder en forma similar a la manipulación y fuerza de gravedad.

Igualmente señalan que las propiedades de la pasta con aire incorporado, como una masa estructural, dependen principalmente de fuerzas capilares. Estas comprimen la espuma, resisten el incremento en el área superficial externa de la masa y retienen dentro de la espuma el exceso de líquido, aún contra la acción de la gravedad.

Un agente incorporador de aire adecuado retarda el deterioro de la espuma

incluída en la pasta durante el tiempo necesario para mantener estas fuerzas en niveles adecuados para obtener buena trabajabilidad y mínima segregación.

Como un resultado de la disminución de la segregación y exudación de la mezcla gracias a la incorporación de aire, es posible bombear mezclas pobres y, si se selecciona correctamente el aditivo, graduar la acción de bombeo de manera tal de romper parte de las burbujas de aire a fin que el concreto que se entrega al final de la tubería impulsora tenga menos aire que el concreto original, manteniéndose de esta manera en un mínimo la pérdida de resistencia atribuible a la incorporación de aire.

En conclusión puede afirmarse que la segregación y exudación se reducen y que la reducción de la exudación, además de las ventajas ya indicadas, ayuda a prevenir la formación de bolsones de agua entre las partículas de agregado grueso y elementos embebidos, tales como el acero de refuerzo, y también a prevenir la acumulación de lechada o material débil en la superficie de una capa.

15.14.5. ACABADOS

En altos contenidos de cemento, los concretos con aire incorporado pueden ser pegajosos y difíciles de acabar.

15.15. PROPIEDADES AL ESTADO ENDURECIDO

15.15.1. RESISTENCIAS MECANICAS

15.1.1. CONCEPTO

La resistencia del concreto es, entre otros factores, una función directa de su densidad y, por lo tanto, la incorporación de aire al alterar la densidad de la masa, deberá afectar la resistencia en forma similar a la de los vacíos dejados por una mala compactación o cualquier otra causa.

Por ello como primera y principal desventaja de la presencia de aire incorporado se indica que éste generalmente causa una reducción en la resistencia del concreto, señalándose que los efectos son más pronunciados conforme aumente la riqueza de las mezclas.

Se ha determinado que conforme la riqueza de la mezcla disminuye la resistencia es menos afectada y para mezclas pobres la resistencia de un concreto con aire puede ser mayor que la de un concreto normal de la misma consistencia y el mismo factor cemento.

15.1.2. EFECTOS

Los estudios efectuados permiten apreciar que para obtener una resistencia a la compresión determinada es necesario emplear menores volúmenes de agua cuando se trabaja con un concreto al cual se ha incorporado aire.

Las investigaciones de laboratorio y obra han permitido establecer el principio que cuando se incorpora aire a la mezcla y no se efectúan modificaciones en las proporciones de la misma, la disminución de resistencia es proporcional al volumen de aire presente, considerándose en la práctica que la resistencia del concreto se reduce aproximadamente en un 5% por cada 1% de aire incorporado. Este valor está del lado de la seguridad y, en general, la resistencia se reduce menos que más. Adicionalmente puede ser compensado total o parcialmente si se toma debido cuidado de las reducciones permisibles en el agua.

En las mezclas que se caracterizan por su pobreza, mezclas de bajo factor cemento, la incorporación de aire incrementa la resistencia en lugar de disminuirla. Esta aparente contradicción con el principio anterior no es tal ya que al incorporar aire se disminuye el volumen de agua de la mezcla a fin de mantener la suma de volúmenes absolutos igual a la unidad. Ello tiende a mejorar la relación agua-cemento y, lógicamente, a incrementar la resistencia del concreto.

En cambio en mezclas ricas la disminución en el volumen de agua de la mezcla es tan pequeña que no altera fundamentalmente la relación agua-cemento por lo que, al variar la densidad de masa, la incorporación de aire tiende a disminuir la resistencia siendo esta disminución mayor cuanto mayor es la riqueza de la mezcla para un contenido de aire dado. Así, para un contenido de aire del 5%, la resistencia a la compresión, medida a los 28 días, se reduce en un 20% para un concreto de 8.5 sacos de cemento por metro cúbico mientras que sólo se reduce en un 11% para concretos de 7.5 sacos de cemento por metro cúbico; y en mezclas pobres de 5.5 sacos de cemento por metro cúbico la resistencia se incrementa en un 4%.

Normalmente se considera que puede esperarse una reducción del orden del 15% en la resistencia a la compresión y del 10% en la resistencia a la flexión. Los estudios sobre resistencia a la tracción, medida por ensayos de compresión diametral, no son muy amplios y han dado reducciones en la resistencia hasta del 40%.

En todos los estudios efectuados se ha considerado que el contenido de cemento es el mismo y que los contenidos de agua y agregado fino se han reducido a fin de mantener la trabajabilidad del concreto original y la suma de los volúmenes absolutos igual a la unidad.

Klieger ha estudiado el efecto del aire sobre la resistencia en mezclas pobres.

Encuentra que en mezclas cuyo contenido de cemento es de cinco sacos por metro cúbico, con una importante reducción en el contenido de agua por la incorporación de aire, se aprecia fuertes incrementos en las resistencias a la compresión y flexión en todos aquellos casos en que el tamaño máximo del agregado es pequeño. Blank y Cordon, completando los estudios de Klieger, señalan que en trabajos de concreto ciclopeo en los que se ha empleado agregado grueso de 6" de tamaño máximo nominal, en mezclas con sólo 4 sacos de cemento por metro cúbico, se ha obtenido resistencia satisfactoria siempre que se ha incorporado aire.

15.1.3. CONTROL

Cuando el aire es incorporado a las mezclas para mejorar la trabajabilidad de las mismas es posible obtener una compensación en la trabajabilidad de las mismas. En efecto, como la incorporación de aire da una mezcla más trabajable, es posible disminuir los porcentajes de arena y agua conservando la trabajabilidad que se desea. De esta forma se reduce la relación agua-cemento y se compensa, en parte, la pérdida de resistencia debida a la presencia de aire.

Igualmente, puede compensarse la pérdida de resistencia empleando una arena más gruesa y reduciendo el volumen de agua, al mismo tiempo que se mantiene la trabajabilidad.

Todas las compensaciones mencionadas pueden complementarse con la adición de cloruro de calcio, lo que permite obtener resistencias a la compresión inicialmente altas.

Para mezclas pobres, con relación agregado-cemento de 8 ó más, especialmente cuando se emplea agregado de perfil angular, la mejora en la trabajabilidad es tal que la posible disminución en la resistencia es compensada por la reducción en la relación agua-cemento.

15.1.4. CONSIDERACIONES ADICIONALES

Los aditivos que permiten las mayores reducciones en el contenido de agua producen la más alta resistencia relativa, dado que una reducción en la relación agua-cemento tenderá a compensar la reducción en la resistencia debida a la presencia de aire.

Ello podría llevar a la conclusión que en concretos de riqueza media y contenidos de aire razonablemente bajos, un aditivo que permite una reducción en el contenido de agua del 50% ó más del volumen de aire incorporado no debería producir una reducción en la resistencia a la compresión a los 28 días en exceso del 5%.

Esta afirmación debe ser tomada en obra con prudencia, pero sí se puede afirmar que el concreto con aditivo incorporador de aire gana resistencia, después de los 7 días, más lentamente que el concreto normal. Ello parece deberse a que muchos aditivos tienen un efecto acelerante que sería el responsable que el concreto desarrolle una parte importante de su resistencia en los primeros días con un aparente decrecimiento de la misma en edades posteriores.

Puede decirse que una comparación de la resistencia entre el concreto normal y el concreto con aire incorporado será generalmente favorable a éste último en los primeros 7 días que después. Ello no significa que un descenso en la resistencia relativa sea índice de debilidad del concreto con aire incorporado en edades posteriores a los 7 días, sino que este concreto gana resistencia a velocidad menor que el concreto sin aire incorporado.

Investigadores, entre los que se encuentran Golbeck, Russell y Wuerpel, han encontrado que los efectos del aire sobre la resistencia a la flexión y sobre la adherencia entre el acero de refuerzo y el concreto son similares a los que se presentan cuando se trata de resistencia a la compresión.

15.15.2 RESISTENCIA A LA FLEXION

Las investigaciones realizadas por Goldbeck y Gray han permitido demostrar que los efectos de la incorporación de aire sobre la resistencia a la flexión, son similares a los que se presentan cuando se trata de resistencia a la compresión.

15.15.3. MODULO DE ELASTICIDAD

15.3.1.- CONCEPTO

Aunque es razonable pensar que todos aquellos factores, incluidos los aditivos incorporadores de aire, que tienden a disminuir la resistencia en compresión tengan un efecto similar sobre el módulo de elasticidad, no existe en la literatura técnica información amplia sobre este punto.

15.3.2. MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO

En ensayos realizados en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Ingeniería se ha encontrado una disminución hasta del 20% en el módulo de elasticidad en relación con concretos sin aire incorporado.

Las menores reducciones han correspondido a concretos en los que la compensación en los volúmenes absolutos, debida a la incorporación de aire, se ha realizado disminuyendo la cantidad de agua de la mezcla y manteniendo el asentamiento uniforme. En estos casos la reducción es de sólo el 3%.

Se ha determinado que la reducción unitaria máxima corresponde a un 5% por cada 1% de aire incorporado, valor que correlaciona perfectamente con el de la disminución en la resistencia a la compresión.

15.3.3 MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO

En el módulo de elasticidad dinámico se han observado disminuciones hasta del 15% en relación con la del concreto normal. Las reducciones menores, del orden del 7%, nuevamente corresponden a concretos en que se ha mantenido el asentamiento, corrigiendo los volúmenes absolutos en los contenidos de agua y agregado fino.

15.15.4 CAMBIOS DE VOLUMEN

Estudios realizados en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Ingeniería han determinado que, en la expansión de especímenes curados bajo agua, la incorporación de aire permite una reducción de la expansión de aproximadamente el 15% por cada 1% de aire.

15.15.5 RESISTENCIA A LA CONGELACION

15.5.1 CONCEPTO

El cambio más importante que se obtiene por la incorporación de aire a la mezcla es un notable aumento en la durabilidad del concreto por incremento en la resistencia a la congelación del agua en aquellos casos en que está sometido a acciones intempéricas severas debidas a la acción de heladas y deshielo.

Un beneficio secundario, pero importante, es que el aire actúa como un lubricante en el interior de la masa de concreto, permitiendo una reducción en el volumen de agua que es necesaria para obtener una determinada resistencia.

15.5.2 FORMA DE ACCION

Cuando el agua se congela tiende a expandir; si ella está encerrada esta expansión puede causar una presión interna lo suficientemente grande como para destruir aún los concretos más fuertes. Sin embargo, desde que el concreto puede tomar exitosamente procesos repetidos de congelación y deshielo se puede concluir algunas de las siguientes alternativas (a) el agua en el concreto no está necesariamente congelada aún cuando esté presente hielo sobre su superficie ó (b) que el hielo en el concreto es capaz de expandir debido a que todos los vacíos en el interior de la masa de concreto no están llenos de agua.

Para que un concreto sea resistente a la congelación él deberá tener un bajo contenido de agua, de manera tal que nunca debería estar totalmente saturado.

El deberá tener baja absorción y baja permeabilidad, de tal manera que de ninguna manera tome agua fácilmente. Además la pasta deberá tener una alta permeabilidad a fin que al congelarse el agua no se genere alta presión en el interior de sus poros. Este último requisito es incompatible con una baja permeabilidad total, pero si el concreto contiene pequeñas burbujas de aire exprofesamente incorporado, entonces la distancia a la que el agua es forzada a emigrar a los primeros espacios vacíos libres o burbujas de aire compensara por la baja permeabilidad de un mortero rico.

15.5.3 CONGELACION DEL CONCRETO FRESCO

La explicación más simple del daño causado por la congelación es que ella es debida al crecimiento de cristales de hielo en los vacíos presentes en el concreto. Los cristales de hielo, los cuales se han formado en los vacíos llenos de agua deberán atraer, por natural fenómeno de subsión, el agua no congelada presente en los pequeños poros que los rodean. En esta forma los cristales de hielo continúan creciendo. El crecimiento de los cristales de hielo extrae el agua en primer lugar de los vacíos mayores y posteriormente de los más pequeños.

Es evidente que conforme menos agua es disponible el crecimiento de los cristales de hielo se reduce. La entrega de calor latente con la congelación del agua no es entonces suficiente para mantener constante la temperatura en el punto de formación del hielo y, en consecuencia, la temperatura tenderá a caer. Esta reducción de calor en la temperatura del concreto progresa hacia el interior desde la superficie, pero desde que los vacíos en las inmediaciones de los cristales de hielo están desprovistos de agua, la congelación no tendrá lugar hasta que el freste de baja temperatura llegue a vacíos suficientemente alejados de los lentes de hielo anteriores como para contener suficiente agua para permitir el crecimiento de nuevos cristales de hielo.

Si el concreto está sujeto a ciclos continuados de congelación y deshielo, los cristales de hielo deberán formarse otra vez en los mismos niveles anteriores debido a que los poros en el concreto habrán sido dilatados por el crecimiento de los cristales de hielo anteriores, los vacíos deberán ser mayores y el punto de congelación del agua en ellos deberá ser más alto que en el concreto que los rodea. El daño en el concreto es causado no tanto por el incremento en el volumen de agua en los vacíos al momento de la congelación como por el posterior crecimiento de cristales de hielo y por la concentración de hielo entre lentes.

15.5.4 FISICA DEL CONCRETO SATURADO

Antes de analizar el papel del aire en el concreto y su acción sobre el incremento de la resistencia a los daños por congelación, es necesario considerar la estructura de la pasta y la física del concreto saturado.

La hidratación del cemento produce un gel poroso el cual encierra partículas de cemento no hidratadas. Si este gel, conjuntamente con los agregados, llena completamente el espacio disponible, los únicos poros remanentes deberán ser los muy pequeños propios del gel en si mismo. Cuando, como es el caso usual, el gel no llena los espacios completamente, la pasta esta interceptada por un sistema de poros capilares.

Durante el proceso de hidratación estos poros, que primero estuvieron llenos de agua, son parcialmente vaciados como un resultado del proceso de hidratación y ellos posteriormente no son rellenos con agua aún cuando el concreto sea curado bajo agua.

Además, cuando el mortero de cemento se seca, él contrae y como resultado de ello la pasta puede reabsorber solamente cerca del 95% del volumen original de agua que ella tenía. Esto es importante debido a su contribución a la resistencia a la congelación a la resistencia del concreto a las heladas. En efecto, cuando un concreto seco es completamente saturado con remoción previa del aire de sus vacíos, entonces en vez de ser capaz de resistir 100 ó más ciclos de congelación y deshielo, él deberá desintegrarse completamente en menos de 5 ciclos.

Un concreto completamente saturado no es capaz de resistir las presiones que se desarrollan cuando el agua se congela. Desde que los concretos aparentemente saturados no fallan generalmente en forma completa en la primera congelación, esto probaría que no están totalmente saturados y que hay suficientes espacios no saturados en el concreto como para acomodar la expansión que acompaña a la congelación.

El concreto es capaz de tomar muchos ciclos de congelación y deshielo antes de desintegrarse si su contenido de agua está inicialmente por debajo del 90% de saturación; y si está por debajo del 80% el concreto raramente sufre daño. La saturación afecta la temperatura bajo congelación en la cual puede existir hielo en el concreto. Cuando el concreto está casi o totalmente saturado, el punto de congelación está ligeramente por debajo de 0C. Conforme la saturación se reduce el agua es ayudada por los capilares muy finos y la temperatura en la cual deberá congelar es progresivamente menor, debido a que la tensión superficial en esos pequeños capilares mantiene el agua en un estado de esfuerzo y reduce su punto de congelación.

15.5.4 MECANISMO DE DESINTEGRACION

Cuando el concreto está sujeto a congelación y deshielo puede mostrar pequeños cambios en peso y apariencia pero sufrir grandes pérdidas en resistencia y resiliencia; alternatively él puede sufrir hinchazón y descascamiento de la superficie pero mostrar pequeñas pérdidas de resistencia, o puede mostrar

una combinación de ambos efectos.

Bajo determinadas condiciones el concreto puede ser dañado por congelación aún cuando el grado de saturación del espécimen como un todo esté por debajo del valor crítico del 90% que debería causar desintegración.

Consideremos un elemento de concreto cuya superficie ha sido saturada por la lluvia y el cual esté expuesto a congelación. El agua se congela y ello tiende a sellar la superficie del elemento. El hielo se forma primeramente en el exterior debido a que el punto de congelación del agua en el interior del concreto está por debajo de 4°C. El agua que se encuentra en los grandes espacios cercanos a la superficie deberá congelar, mientras que el agua no congelada presente en los pequeños capilares deberá, por acción del agua congelada, ser desplazada hacia el interior menos saturado.

Si el agua fuese libre de moverse sin resistencia, no se desarrollaría ningún tipo de presión hidráulica. Pero el agua está obligada a desplazarse a través de un gel de cemento finamente poroso, de tal manera que se desarrollará una presión de agua en los poros. Si la congelación es lo suficientemente rápida es posible que la presión en los poros sea lo suficientemente alta como para exceder la resistencia del mortero de cemento y causar descascamiento.

Por otra parte, en procesos de congelación y deshielo repetidos lentamente en agua, el concreto deberá absorber agua y por congelación de la superficie más agua deberá ser empujada hacia el interior del concreto. Conforme el espesor de la región saturada se incrementa, la resistencia al desplazamiento del agua fuera de y hacia la región de bajo contenido de agua se incrementa. Cuando la región saturada es de suficiente espesor, la presión hidráulica será mayor que la resistencia del material y causará desintegración o descascamiento del concreto.

Si el concreto es de estructura uniforme y no está totalmente saturado al comienzo del proceso de congelación, no se producirá desmoronamiento o descascamiento hasta que un determinado volumen de agua, suficiente para saturar la región superficial a la altura crítica, haya sido absorbido.

La presión así generada en los poros dependerá de la permeabilidad, la velocidad de congelación y el volumen de agua en el concreto en la superficie de congelación. Se puede deducir de ello que cuanto más baja es la permeabilidad más alta deberá ser la presión de poros generada, de tal manera que un concreto rico en una más alta presión de poros que una mezcla pobre. Pero ello es compensado por la baja absorción del concreto rico. Los concretos pobres absorben agua mucho más rápidamente, mientras que los concretos ricos nunca están totalmente saturados, aún después de prolongado humedecimiento.

Bajo condiciones naturales de exposición, el concreto puede estar sujeto a humedecimiento y secado, así como a congelación y deshielo. Los períodos de secado son generalmente más largos en relación a los períodos de humedecimiento, de tal manera que un concreto denso e impermeable estará menos saturado que un concreto pobre el cual absorberá agua rápidamente.

Además, cuando una baja permeabilidad es debida a una mezcla rica, tal concreto deberá tener un alto grado de desecación debido a la hidratación del cemento. En los ensayos de congelación y deshielo no siempre se demuestra la ventaja de un concreto rico que tiene una baja velocidad de absorción.

Desde que los daños por congelación son más fácilmente causados cuando el concreto está altamente saturado, entonces puede esperarse que el mayor volumen de daños ocurra cuando un otoño húmedo es seguido por una rápida aparición de hielo, o cuando un invierno temprano es muy húmedo y es seguido por un período de congelación, de tal manera que la presión en los poros generada en el agua no congelada por la expansión durante la expansión de cristales de hielo fuerze al agua no congelada hacia los vacíos menores.

De lo anterior se deduce que conforme es mayor el número de vacíos de aire menor deberá ser el daño debido a congelaciones, y cuanto más juntos estén entre ellos menor deberá ser la presión en los poros.

15.5.5 ACCION DEL AIRE INCORPORADO

El propósito inicial de la incorporación de aire al concreto fue hacerlo más resistente a la acción de las heladas. La mejora es debida a que los miles de burbujas de aire, dispersadas a través de toda la masa de concreto, actúan como cámaras de disipación de los esfuerzos y presiones originados por cambios de temperatura y humedad, así como por la congelación del agua en el interior del concreto.

Igualmente, y al mismo tiempo, los minúsculos poros previenen o limitan el crecimiento de los cuerpos microscópicos de hielo en la pasta de cemento. Como cada burbuja protege sólo una delgada capa de pasta alrededor de ella, un espaciamiento demasiado grande entre burbujas podría dar origen a procesos de expansión con deterioro de la pasta.

Por otra parte, cuando las burbujas están muy cercanas, lo cual significa factores de espaciamiento muy pequeños, no habrá porciones de la pasta susceptibles de ser atacadas por las heladas y, en la práctica, debido al acomodo del exceso de agua en los vacíos, la pasta en proceso de congelación tenderá a contraerse conforme disminuye la temperatura, adquiriendo las características de un cuerpo sólido capaz de resistir el proceso de enfriamiento.

Durante el proceso de descongelación, el agua retornará de los vacíos hacia la pasta, de tal manera que la protección impartida por el aire incorporado continuará en forma permanente para ciclos repetidos de congelación y deshielo.

La incorporación de aire igualmente beneficia en forma indirecta la durabilidad al incrementar la uniformidad del concreto, disminuir la absorción del mismo, hacerlo más impermeable y, en general, mejorar sus propiedades en el estado plástico lo que significa menores problemas de colocación y por ende mejor calidad del concreto.

Para un contenido de aire dado, la protección ofrecida por las burbujas contra los daños por congelación generalmente es mayor cuanto más grande es el número de burbujas por unidad de volumen de pasta. Por ello los vacíos son más efectivos cuanto menor es el factor de espaciamiento.

Como ya se ha indicado, se estima que la pasta está adecuadamente protegida contra los efectos de la congelación si el factor de espaciamiento de las burbujas es de 0.02mm ó menor.

15.5.6 OPTIMO CONTENIDO DE AIRE

Klieger ya ha indicado que puede establecerse una adecuada relación entre el contenido de aire de la pasta y la expansión que puede experimentar el concreto al final de 300 ciclos de congelación y deshielo, punto éste que se toma como una medida de la resistencia del concreto a las acciones intempéricas.

Al respecto indica que se puede determinar porcentajes bien definidos de aire a partir de los cuales un incremento en el contenido del mismo produce muy poco efecto. Este óptimo contenido de aire representa un compromiso entre la disminución de resistencia debida a la incorporación de aire y el incremento en la durabilidad debido al incremento en el contenido de aire.

Como conclusión de sus estudios, Klieger indica que puede obtenerse resistencia a la congelación cuando el contenido de aire del mortero es del orden del 9%

La correlación entre el contenido de aire del concreto y el de la pasta o mortero puede establecerse a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\text{Aire en el mortero} &= 100A/V_c + V_f + W + A \\ \text{Aire en la pasta} &= 100A/V_c + W + A \\ \text{Aire en el concreto} &= 100A/V_c + V_f + V_g + W + A\end{aligned}$$

Ecuaciones en las que:

$$\begin{aligned}V_c &= \text{Volumen Absoluto de cemento} \\ W &= \text{Volumen de agua} \\ A &= \text{Volumen de aire incorporado en el concreto}\end{aligned}$$

V_f = Volumen absoluto de agregado fino
 V_g = Volumen absoluto de agregado grueso

De acuerdo a los criterios anteriores Barbee recomienda 4% de aire incorporado para concretos con contenido de cemento de 6 á 9 sacos por metro cúbico y el Highway Research Board indica que un 4% a 5% de aire deberá dar un balance satisfactorio entre el incremento de durabilidad y la pérdida de resistencia.

Blank ha definido al factor de durabilidad como una medida de la resistencia del concreto a ciclos de congelación y deshielo, definiendo al mismo como al número de ciclos de congelación y deshielo necesarios para producir desintegración dividido entre 100.

Las curvas calculadas por Blank, de acuerdo al criterio anterior, demuestran que para calidad de concreto existe un óptimo contenido de aire, el cual puede variar del 4% para concretos de excelente calidad hasta el 14% para concretos de muy pobre calidad.

Finalmente Wuerpel y Gonnerman han demostrado que un contenido de aire no menor del 3% es necesario para asegurar adecuada durabilidad frente a los procesos de congelación, pero que los valores más recomendados están entre 3% y 6% dado que ellos permiten obtener adecuada durabilidad sin una excesiva reducción en la resistencia.

15.5.7 EFECTO SOBRE LA RESISTENCIA

Como ya se ha indicado, la resistencia del concreto es afectada por la cantidad de vacíos presentes en la mezcla, reduciéndose la resistencia en un 5% por cada 1% de aire. Es esencial asegurarse que el concreto tiene adecuada resistencia y, por lo tanto, el porcentaje de burbujas de aire deberá ser limitado.

Para dicha condición, la resistencia máxima a congelación se obtiene si el tamaño promedio de las burbujas de aire es pequeño, de tal manera que existe un gran número de ellas estrechamente espaciadas. Esto puede ser alcanzado únicamente por incorporación de un aditivo el cual deberá incorporar un porcentaje controlado de aire (generalmente 5% a 7%) y producir un gran número de pequeñas burbujas de aire igualmente espaciadas en la masa de concreto.

15.5.8 CONDICIONES DE EMPLEO

Deberá incorporarse aire al concreto siempre que se prevea, durante la vida del mismo, condiciones naturales de intemperismo severo; y en aquellos casos en que se emplee cloruros para remover el hielo que pueda haberse formado sobre los pavimentos.

15.15.6 PERMEABILIDAD Y ABSORCION

La incorporación de aire parece no tener efectos importantes sobre la permeabilidad o la capacidad de absorción de agua del concreto. Ello se explica en parte por el hecho que al dar al concreto una mayor homogeneidad y uniformidad, como resultado de una mejor trabajabilidad, se tiende a reducir la permeabilidad del mismo.

Wright ha señalado que siendo las burbujas de aire un medio discontinuo no cabe esperar que la presencia de las mismas haga el concreto más permeable. Al respecto Neville indica que, desde que la incorporación de aire reduce la segregación y exudación, al mismo tiempo que mejora la trabajabilidad, permite el empleo de relaciones agua-cemento menores, lo que tiende a mejorar la calidad del concreto en general e indirectamente la impermeabilidad. Igualmente señala que si bien el aire incorporado produce minúsculas cavidades en la pasta, no forma canales capilares que faciliten o posibiliten el paso del agua.

15.15.7 RESISTENCIA A LA ABRASION

El principal factor que influye en la resistencia del concreto a la acción de la abrasión es su resistencia estructural. Es por tanto lógico pensar que si la incorporación de aire disminuye la resistencia del concreto a la compresión también disminuirá su resistencia a la abrasión.

Esta disminución en la resistencia a la abrasión puede ser importante en concretos con contenidos de aire mayores del 10%. Para valores que no excedan del 5% á 6% en el contenido de aire, la reducción en la resistencia a la abrasión no es importante y no hace excluyente el empleo de aire en la construcción de caminos o pavimentos en los que, por razones de durabilidad, el incremento en la resistencia a procesos de congelación y deshielo es más importante.

En este sentido es importante indicar que la mayor uniformidad y homogeneidad del concreto, en razón de una mayor trabajabilidad por la presencia de aire, al permitir un mejor acabado puede compensar en parte la pérdida en la resistencia a la abrasión.

15.15.8 PESO UNITARIO

La incorporación de aire permite apreciar una disminución en el peso unitario del concreto.

15.15.9 ADHERENCIA CON EL ACERO

Se observa un incremento en la capacidad de adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo debido a la incorporación de aire a la mezcla. Sin embargo, es importante indicar que investigaciones realizadas por Russell y Wuerpel

permitieron determinar que los efectos del aire sobre la adherencia entre el acero de refuerzo y el concreto son similares a los que se presentan cuando se trata de resistencia a la compresión

15.16 APLICACIONES

Además de las ya indicadas, es conveniente indicar la acción del aire incorporado sobre los concretos bombeados y los concretos livianos.

15.16.1 CONCRETOS BOMBEADOS

Las experiencias de obra indican que, cuando ya es necesario, no existe razón alguna para no incorporar aire a concretos que van a ser bombeados, especialmente si el concreto sin aire tiene tendencia a ser áspero, posee poca trabajabilidad y no se van a emplear aditivos plastificantes.

Al respecto Blanks ha indicado que la incorporación de aire ayuda al proceso de bombeo en la mayoría de los casos, indicando, sin embargo, que la cohesividad extra que adquiere el concreto por la incorporación de aire puede retardar el flujo del mismo en la bomba. Aparentemente, para la mejor operación de la bomba, es conveniente reducir en sólo 0.5% el contenido de agregado fino por cada 1% de aire incorporado.

15.16.2 CONCRETOS LIVIANOS

El aire incorporado puede ser de considerable ayuda en el proceso de mezclado de concretos en los que se utiliza agregados livianos. La textura superficial de éstos tiende a hacer el concreto áspero y poco trabajable, pudiendo ser necesario incrementar el porcentaje de arena con el consiguiente incremento en el peso del concreto resultante.

En el caso indicado, la incorporación de aire posibilita que el porcentaje de agregado fino sea mantenido bajo y ayuda a prevenir la tendencia del agregado grueso liviano a flotar en la fracción mortero.

16. REDUCTORES DE AGUA Y REGULADORES DE FRAGUA

16.1 DEFINICION

Los aditivos del grupo de los reductores de agua reguladores de fragua reducen los requisitos de agua de la mezcla o modifican las condiciones de fraguado, o ambas.

La reducción de agua da, para una consistencia y contenido de cemento dados, una disminución en la relación agua-cemento, o un incremento en la consistencia sin modificaciones en la trabajabilidad si se mantienen constantes la relación agua-cemento y el contenido de cemento.

Aditivos de este grupo también pueden modificar el fraguado, generalmente provocando un retardo.

16.2 CLASIFICACION

La Norma ASTM C 494 clasifica a los aditivos de este grupo en los siguientes tipos:

- a) Reductores de agua.
- b) Retardadores.
- c) Acelerantes.
- d) Reductores de agua y retardadores.
- e) Reductores de agua y acelerantes.
- f) Reductores de agua de alto rango.
- g) Reductores de agua de alto rango y retardadores.

16.3 MATERIALES EMPLEADOS

Los materiales empleados como aditivos de este grupo están incluidos dentro de las cinco siguientes categorías generales:

- a) Acido lignosulfónico y sus sales.
- b) Modificaciones y derivados del ácido lignosulfónico.
- c) Acido hidroxilar carboxílico y sus sales.
- d) Modificaciones y derivados del ácido hidroxilar carboxílico y sus sales.
- e) Otros materiales.

16.4 EMPLEO DE LOS ADITIVOS REDUCTORES DE AGUA

Los aditivos reductores de agua son empleados:

- a) Para mejorar la calidad del concreto;
- b) Para obtener una resistencia dada con un bajo contenido de cemento;
- c) Para incrementar el asentamiento de una mezcla sin un incremento en el contenido de agua;
- d) Para mejorar las propiedades de los concretos en los que se ha utilizado agregados de textura áspera o pobremente graduados;
- e) Para mejorar las facilidades de colocación de concretos bombeados o concretos colocados bajo agua.

16.5 EMPLEO DE LOS ADITIVOS RETARDADORES DE FRAGUA

Los aditivos retardadores de fragua son empleados especialmente para:

- a) Compensar los efectos acelerantes de las altas temperaturas.
- b) Mantener el concreto trabajable durante la colocación, eliminando las grietas por deflexión del encofrado.
- c) Mantener el concreto en estado plástico por un período lo suficientemente largo como para colocarlo en capas sucesivas sin producir juntas de vaciado o discontinuidad de la unidad estructural.

16.6 EFECTOS SOBRE EL CONCRETO NO ENDURECIDO

Los efectos específicos de los aditivos reductores de agua y controladores de fragua varían con los diferentes tipos y marcas de cemento; relación agua-material cementante; temperatura de mezclado; temperatura ambiente; y condiciones de obra.

Los principales efectos sobre las propiedades del concreto al estado no endurecido son:

- a) Los aditivos del Tipo A reducen los requisitos de agua, para la misma consistencia, en cerca del 10%. Los aditivos a base de lignosulfonatos permiten reducciones de agua del 5% al 10%. Las sales del ácido hidroxilar carboxílico reducen el contenido de agua del 5% al 8%.
- b) Esta reducción en el contenido de agua disminuye la relación agua-cementante para un contenido de cementante dado, o permite una reducción en el contenido de cemento manteniendo la misma relación agua-material cementante.
- c) Los lignosulfonatos y el ácido hidroxilar carboxílico retardan el tiempo de fraguado de una a tres horas si se emplean a temperaturas entre 18C y 38C. Otros aditivos lo retardan en grado variable. Cuando se emplean retardadores el dosaje debe ajustarse para cumplir con las condiciones de obra.
- d) Los lignosulfonatos incorporan aire en magnitud variable del orden del 2% al 6%. Los materiales de las clases 3, 4 y 5 generalmente no incorporan aire, pero los aditivos de las cinco clases aumentan la capacidad de incorporación de aire.
- e) Para los mismos asentamientos y contenido de aire, las diferencias en la trabajabilidad son difíciles de detectar para los concretos con y sin aditivo reductor de agua. La compactación es más fácil en los concretos con aditivos.
- f) Los aditivos de la Clase 3 tienden a incrementar la exudación del concreto. Los aditivos de las Clases 1 y 2 reducen la segregación y exudación, en parte debido al aire incorporado. Los aditivos de la Clase 4 generalmente no incrementan la exudación.

- g) La elevación de temperatura del concreto y el calor de hidratación no son reducido si se mantiene el contenido de cemento.
- h) La velocidad de pérdida de asentamiento puede no reducirse y en algunos casos puede incrementarse.

16.7 EFECTOS SOBRE EL CONCRETO ENDURECIDO

En relación con los efectos de estos aditivos sobre las propiedades del concreto al estado endurecido, se tendrá en consideración lo siguiente:

- a) La reducción en la relación agua-cemento da lugar a un incremento en la resistencia, con un incremento adicional debido a la modificación de la reacción de hidratación. La resistencia final puede ser incrementada en un 25% permitiendo que el cemento pueda ser reducido sin disminuir la resistencia a los 28 días.
- b) El efecto de estos aditivos sobre la resistencia del concreto a los procesos de congelación y deshielo es una función del sistema de burbujas de aire. La reducción en la relación agua-material cementante y el consiguiente incremento en la resistencia mejoran los resultados. Hay un pequeño incremento en la resistencia a las aguas y suelos agresivos.
- c) La contracción y el escurrimiento plástico pueden ser mayores o menores, dependiendo de factores tales como la composición del aditivo y el cemento.

16.8 RENDIMIENTO Y COMPORTAMIENTO

El rendimiento y comportamiento de una clase, marca o tipo de aditivo, puede ser determinado a partir de los resultados obtenidos en obra; por ensayos de laboratorio; o a partir de la literatura técnica proporcionada por el fabricante. Deberá tenerse en consideración que:

- a) La cantidad de aditivo deberá ser determinada a partir de la información proporcionada por las fuentes indicadas, debiendo esperarse resultados diversos para un mismo aditivo en función de los diferentes factores que entran en la mezcla.
- b) Este tipo de aditivos generalmente permite un incremento en la resistencia del concreto que posibilita reducciones en el contenido de material cementante y ahorro en los costos. Ello es especialmente importante en concretos masivos al disminuir la temperatura del concreto.
- c) Incrementos en el dosaje del aditivo mejoran significativamente la producción de concretos de alta resistencia

- d) Se considera que un aditivo reductor de agua de buena calidad debe disminuir los requisitos de agua en el orden del 8% al 10%, o más, e incrementar la resistencia significativamente para el mismo contenido de cemento.
- e) Aunque los aditivos de este tipo permiten reducir el contenido de material cementante, es recomendable mantener éste constante a fin de lograr que la reducción de agua disminuya la relación agua-material cementante y mantenga la consistencia prácticamente la misma. Con ello el incremento en la resistencia será proporcionalmente mayor al debido a la reducción agua-material cementante.
- f) Otro empleo de los aditivos reductores de agua es permitir un incremento en la consistencia del concreto sin incremento en la relación agua-material cementante, manteniendo así el nivel de resistencia.
- g) Los aditivos deben ser evaluados en el laboratorio antes de su empleo en obra. Las mezclas de prueba deben ser preparadas con los mismos materiales y bajo condiciones similares a las de obra. El contenido de aire y el tiempo de fraguado en obra pueden diferir en relación con los del laboratorio, debiendo la Supervisión estar atenta a esta posibilidad.

16.9 ENSAYOS DE EVALUACION

Deberán efectuarse ensayos previos para evaluar los efectos del aditivo seleccionado sobre las propiedades del concreto preparado con los materiales a ser empleados, y con los procedimientos de construcción a ser utilizados.

La proporción del aditivo seleccionado a ser utilizada es muy importante en la medida que ella puede afectar simultáneamente propiedades diferentes del concreto. Los ensayos deberán indicar los efectos del aditivo sobre las siguientes propiedades del concreto en la medida que ellas sean pertinentes al trabajo que se está efectuando:

- a) Requerimientos de agua.
- b) Contenido de aire.
- c) Consistencia.
- d) Exudación del agua.
- e) Posible pérdida de aire del concretos fresco.
- f) Velocidad de endurecimiento.
- g) Resistencias mecánicas.
- h) Resistencia a la congelación; y
- i) Contracción por secado.

16.10 INCORPORACION A LA MEZCLA

Los aditivos de este tipo deben ser incorporados a la mezcla en forma líquida. La concentración de las soluciones debe corresponder a las recomendaciones del fabricante. Los recipientes con la solución deben ser protegidos de la contaminación, dilución y evaporación. La incorporación del aditivo al agua de la mezcla debe efectuarse empleando equipos dispersantes.

Los aditivos de este tipo pueden no ser compatibles cuando se mezclan junto con otros. Diferentes tipos de aditivo deben ser añadidos a la mezcla separadamente, salvo que no exista duda que pueden ser añadidos a la mezcla en forma conjunta sin peligro alguno para el concreto.

Los aditivos deben ser incorporados a la mezcladora junto con los otros materiales. La demora en la adición de estos aditivos hasta que el concreto esté parcialmente mezclado puede modificar los resultados esperados.

Algunos aditivos de este tipo pueden modificar su viscosidad a bajas temperaturas, haciendo difícil su empleo.

La mezcla puede ser rediseñada cuando se añade un aditivo y ello modifica los contenidos de agua, cemento o aire. En estos casos se seguirá el procedimiento indicado en la recomendación ACI 211.1, debiendo la proporción de mortero a agregado grueso permanecer constante. Los cambios en el contenido de agua, aire o material cementante son compensados por los correspondientes cambios en el contenido de agregado fino, siempre sobre la base de volúmenes absolutos, de tal manera que el volumen de mortero permanezca el mismo.

La mayoría de los aditivos del tipo reductor de agua son soluciones en ésta. Por tanto ella debe ser considerada como parte del agua de mezclado y hacerse las correcciones respectivas.

La Supervisión deberá comprobar la calidad de los aditivos y sus efectos sobre las propiedades del concreto. La Norma ASTM C 494 da una guía para la determinación de la uniformidad de los aditivos químicos.

17 ADITIVOS MINERALES

17.1 CLASIFICACION

La Recomendación ACI 212 clasifica a los aditivos minerales en cuatro tipos:

- a) Aquellos que son cementantes. Comprenden los cementos naturales; las cales hidráulicas; los cementos de escorias; y la escoria de altos hornos granulada y finamente molida.

- b) Aquellos que son puzolánicos. Incluyen las puzolanas; cenizas; microsílices vidrios volcánicos; tierras de diatomeas; y algunos esquistos y arcillas al estado natural o tratados al calor.
- c) Aquellos que tienen propiedades cementantes y puzolánicas. Dentro de éstos se encuentran las cenizas que se obtienen como subproducto de la ignición del carbón y del lignito, las cuales tienen limitadas características cementantes pero cuando se combinan con la cal actúan como puzolanas.
- d) Otros. En este grupo se incluyen aditivos minerales que no son cementantes ni puzolánicos y que son considerados relativamente inertes cuando se les incorpora a la mezcla cemento-agua. Incluyen el cuarzo y la arena silicosa finamente molida; calcitas dolomíticas y marmol; granito y otros polvos de roca; crisotilo; dolomita hidratada o cal de alto contenido de calcio. Generalmente se utilizan en estado natural, no esperándose u obteniéndose actividad puzolánica.

Los aditivos minerales se clasifican como tales cuando son añadidos a la mezcla como ingrediente separados, ya sea antes o durante el mezclado.

Son considerados como «adiciones» cuando se muelen conjuntamente con el clinker o son mezclados con el cemento portland para producir cementos hidráulicos combinados que cumplen con los requisitos de la Norma ASTM C 595.

17.2 RAZONES DE EMPLEO

La fineza de esos materiales hace que influyan en el comportamiento de la pasta fresca de la misma manera que el cemento. Suelen ser empleados para aumentar el cementante en mezclas deficientes en partículas muy finas.

A fin de obtener la trabajabilidad, plasticidad y facilidad de bombeo requeridas en una mezcla determinada, se puede adicionar este tipo de aditivos, evitando el empleo de cemento adicional al requerido para obtener una resistencia determinada.

Los aditivos minerales que no son cementantes, puzolánicos, o ambos, contribuyen al desarrollo de la resistencia del concreto, requiriéndose menos cemento para alcanzar una resistencia determinada.

El empleo de partículas finamente divididas modifica las propiedades de la pasta fresca, así como las del producto final endurecido. Igualmente, al disminuir el contenido de cemento, el empleo de estos aditivos reduce el costo de la unidad cúbica de concreto.

Mezclas de concreto que tienen deficiencias en algún aspecto pueden ser mejoradas por la incorporación de un aditivo mineral como un producto adicional

sin alterar las proporciones relativas de los otros ingredientes.

Si no se dispone de agregado fino de la granulometría requerida y el contenido de cemento necesario para obtener condiciones de trabajabilidad y acabado adecuadas es apreciablemente alto y mayor que aquel que se requeriría para alcanzar la resistencia necesaria, el empleo de este tipo de aditivos compensará las deficiencias indicadas. Si el aditivo tiene un área superficial similar a la del cemento, no se producirá incremento en los requisitos de agua.

17.3 CLASES

En el caso de los cementos combinados se entiende por puzolana a cualquier material que, pulverizado, fija hidróxido de calcio a la temperatura ambiente, formando, en presencia del agua, compuestos que poseen propiedades hidráulicas.

El material que posee propiedades hidráulicas puede ser natural, caso de la tierra de diatomeas, rocas opalinas, esquistos, cenizas volcánicas, pumitas, etc; material calcinado, como los anteriormente nombrados, y algunas arcillas y esquistos; o un material artificial obtenido como subproducto, tal como las cenizas, escorias de alto horno finamente molidas, y microsilices.

17.3.1 PUZOLANAS

Las puzolanas naturales se incorporan al cemento principalmente debido a su capacidad de reaccionar en presencia del hidróxido de calcio y el agua, permitiendo un incremento en edades posteriores, disminución del contenido de cemento, modificación del color, incremento en la durabilidad en presencia de sulfatos, e inhibición de la reacción álcali-agregados.

Las desventajas incluyen una menor resistencia inicial, un tiempo de curado más largo, incremento en los requerimientos de agua, y problemas derivados del manejo del material adicional.

17.3.2 ESCORIAS DE ALTO HORNO

Las escorias de alto horno finamente molidas pueden ser empleadas como un material cementante separado añadido a la tanda, o como un ingrediente de los cementos combinados. Sus principales constituyentes son compuestos de calcio, magnesio, sílice, alúmina y oxígeno.

Las escorias de alto horno son compatibles con el cemento portland en un amplio rango de proporciones.

El comportamiento de una escoria determinada depende fundamentalmente de las características del cemento con el cual es empleada. Generalmente se

obtienen incrementos en la resistencia con cementos que tienen alto contenido de C3A u alta fineza.

17.3.3 CENIZAS

Las cenizas son el residuo finamente dividido de la combustión del carbón. Contienen partículas esféricas muy pequeñas de material vitreo con propiedades puzolánicas. Son materiales puzolánicos que tienden a ser más reactivos aquellos con alto contenido de calcio. Son compatibles con los cementos portland.

La cantidad de ceniza empleada puede variar de menos del 5% a más del 40%. La cantidad mínima de cenizas por resistencia a los sulfatos es variable pero se acepta que no debe ser menor del 20%. Pueden ser útiles para controlar los efectos de la reacción álcali-agregados.

17.3.4 MICROSILICE

Las microsílices tienen un diámetro de un centésimo del correspondiente al cemento y su superficie específica Blaine es 50 veces mayor.

Tienen alta reactividad puzolánica y combinadas con el cemento y un superplastificante incrementan la resistencia y durabilidad y disminuyen en forma muy importante la permeabilidad.

La notable importancia que han adquirido en el comportamiento del concreto justifica un amplio estudio complementario que se efectúa en el Anexo N° 31.

17.4 FORMA DE EMPLEO

Las escorias de alto horno finamente molidas se emplearán en la misma forma que las cenizas y las microsílices y, en general, conjuntamente con cemento portland normal. Es infrecuente emplearlas con cementos combinados dado que estos ya tienen puzolanas o cenizas.

La combinación con cementos que cumplen la Norma C 595 puede ser considerada en la colocación de concretos en grandes masas en los que se puede aceptar una lenta ganancia de resistencia y en los que el desarrollo de un bajo calor de hidratación es de especial importancia.

18. GENERADORES DE GAS

18.1 DEFINICION

Los aditivos formadores de gas tienen por función generar o liberar burbujas de gas en la mezcla fresca, durante o inmediatamente después de la colocación y antes del fraguado de la pasta. La razón principal de su empleo es controlar los

procesos de exudación y asentamiento, permitiendo que el concreto conserve su volumen de vaciado.

18.2 MATERIALES EMPLEADOS

Los aditivos más empleados son:

- a) El peróxido de hidrógeno que libera oxígeno.
- b) El polvo de aluminio que libera hidrógeno.
- c) Ciertas formas de carbón activo que liberan aire.

El polvo de aluminio es el aditivo más empleado. La velocidad y duración de la evolución del gas dependen de:

- a) La composición del cemento;
- b) La temperatura;
- c) La relación agua-material cementante;
- d) La fineza y perfil de las partículas de polvo de aluminio;
- e) El tiempo de mezclado;
- f) Los procesos de transporte y colocación; y
- g) El porcentaje de polvo de aluminio empleado.

El porcentaje de polvo de aluminio empleado generalmente varía de 0.005% a 0.02% en peso del cemento. Debido a las pequeñas cantidades empleadas y a su tendencia a flotar en el agua, el polvo de aluminio generalmente es mezclado con arena fina, cemento o puzolana.

18.3 EFECTOS SOBRE EL CONCRETO

La liberación de gas, adecuadamente controlada, origina una ligera expansión del concreto fresco. Si se restringe esta expansión se aprecia un incremento en la adherencia al acero de refuerzo principal sin una reducción excesiva en la resistencia. Un exceso en la producción de gas origina grandes vacíos que pueden debilitar la matriz cementante.

Como el efecto sobre la resistencia depende del control de la expansión de la mezcla, es importante que los encofrados estén adecuadamente ajustados y sean impermeables.

19 ADITIVOS PARA INYECCIONES

19.1 DEFINICION

Los aditivos para inyecciones son productos químicos que se aplican principalmente para cementar pozos de petróleo, en los que pueden presentarse temperaturas y presiones altas y en los que las distancias de bombeo son muy grandes.

19.2 MATERIALES EMPLEADOS

Los retardadores de fragua son útiles para demorar el fraguado cuando se utilizan estos aditivos. Materiales tales como geles, arcillas, almidón pregelatinado, y metil celulosa, han sido recomendados para prevenir la rápida pérdida de agua de la lechada.

Las arcillas bentoníticas son usualmente empleadas para disminuir la densidad de la lechada; y la baritina o las escamas de hierro para incrementarla.

Se ha utilizado espesadores, tales como las gomas naturales, para prevenir el asentamiento de los constituyentes pesados de la mezcla.

20 ADITIVOS PRODUCTORES DE EXPANSION

20.1 CONCEPTO

Los aditivos productores de expansión, los cuales durante el período de hidratación del cemento expanden por si mismos o reaccionan con otros constituyentes del concreto para causar expansión, son empleados para minimizar los efectos de la contracción por secado.

20.2 MATERIALES EMPLEADOS

El aditivo más común es el hierro granulado o finamente dividido, así como los productos químicos que favorecen su oxidación.

20.3 CONDICIONES DE EMPLEO

El empleo de estos aditivos está limitado a proyectos pequeños. En proyectos grandes en los que se requiere un grado uniforme y predeterminado de expansión se emplea los denominados cementos expansivos.

20.4 EFECTOS SOBRE EL CONCRETO

La expansión controlada producida por este tipo de aditivos puede ser igual que la contracción por secado esperada a una edad determinada, o aún puede ser mayor. La magnitud de la expansión y el intervalo durante el cual ella tiene lugar son muy importantes y deberán ser controlados para obtener resultados satisfactorios.

21 ADITIVOS LIGANTES

21.1 CONCEPTO

Los aditivos ligantes se emplean en mezclas de cemento portland con la finalidad de incrementar las propiedades ligantes de las mismas. Estos aditivos son generalmente emulsiones de un polímero orgánico, e incrementan el contenido de aire de las mezclas en que son empleados.

21.2 CONDICIONES DE EMPLEO

Empleados en porcentajes de 5% a 20% en peso del cemento incrementan la viscosidad del concreto fresco. Los componentes del polímero son más efectivos cuando la emulsión es rota a través de un proceso de secado. Por ello cuando se utilizan estos aditivos el curado húmedo no sólo no es necesario sino es indeseable ya que no daría a la emulsión la oportunidad de secar y desarrollar la resistencia deseada.

21.3 EFECTOS

Los mayores efectos de estos aditivos se aprecian en el incremento en la resistencia a la flexión y en la adherencia.

Estos aditivos son especialmente recomendables en operaciones de parchado, en las que se requiere remiendos de poco espesor. Una aplicación delgada de lechada o mortero, con aditivo ligante, desarrolla mayor adherencia que una aplicación gruesa. Curada adecuadamente se desarrolla en la unión una adherencia más fuerte que los materiales que están siendo unidos.

22 AYUDAS PARA BOMBEO

22.1 DEFINICION

Los aditivos conocidos como ayudas para bombeo tienen como única función mejorar la facilidad de bombeo del concreto. Su principal propósito es superar la dificultad en obtener agregados con un volumen de vacíos intersticiales satisfactorio y de tamaño adecuado.

La función esencial de estos aditivos es dar a la pasta capacidad para retener el agua bajo la acción de las fuerzas que tienden a separarla.

22.2 FORMA DE TRABAJO

Estos aditivos trabajan por espesamiento o incremento en la viscosidad del agua a fin de impedir la pérdida de ésta en la pasta bajo la presión de bombeo, con lo que se evita que disminuya la movilidad del concreto y se pierda parte del fluido lubricante.

22.3 CLASIFICACION

Estos aditivos se clasifican en seis grupos:

- a) Polímeros orgánicos, naturales y sintéticos, solubles en agua y que incrementan la velocidad de ésta.
- b) Floculantes orgánicos.
- c) Emulsiones de materiales orgánicos, tales como la parafina, o los polímeros acrílicos u otros.
- d) Materiales inorgánicos de alta área superficial, tales como la bentonita.
- e) Materiales inorgánicos finamente molidos, los cuales reemplazan al cemento en la pasta; tales como las cenizas, la cal hidratada, o las puzolanas.

22.4 EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES

Desde que el principal efecto de un agua espesada es incrementar su viscosidad, un aumento importante en la densidad puede aumentar los requerimientos de agua y reducir la resistencia. El empleo de un aditivo dispersante en combinación con un agente espesante puede no requerir incrementos en el agua de mezclado.

Algunos de estos aditivos pueden causar incorporación de aire o retardo en el tiempo de fraguado.

Es recomendable evaluar los efectos secundarios sobre el concreto fresco y endurecido cuando se emplea este tipo de aditivos; debiendo recordarse que su efecto puede variar cuando se modifica el dosaje, composición del cemento, temperatura de mezclado, etc.

23. ADITIVOS COLORANTES

23.1 OBJETO

Los aditivos colorantes se emplean para producir en el concreto el color deseado sin afectar las propiedades de la mezcla.

23.2 PIGMENTOS

Los pigmentos pueden ser naturales o artificiales. Los pigmentos indicados a continuación permiten obtener en el concreto los colores indicados:

- a) Grises o negros Oxido negro de hierro: negro mineral o negro carbón
- b) Azul Azul ultramarino
- c) Rojo brillante a oscuro. . Oxido rojo de hierro
- d) Marrón Oxido marrón de hierro
- e) Marfil, crema Oxido amarillo de hierro

- f) Verde Oxido de cromo
- g) Blanco Bióxido de titanio.

23.3 REQUISITOS

Un aditivo colorante debe cumplir los siguientes requisitos:

- a) Color estable ante la acción de la luz del sol.
- b) Estabilidad química en presencia de la alcalinidad producida por la reacción de hidratación del cemento.
- c) Estabilidad de color cuando el concreto está expuesto a la acción del autoclave.
- d) Ninguna influencia sobre el tiempo de fraguado o el desarrollo de resistencia.

Debe recordarse que los pigmentos naturales no producen colores tan vivos como los sintéticos.

23.4 PORCENTAJE DE ADICION

El porcentaje de adición no deberá exceder del 10% en peso del cemento. Porcentajes menores del 6% tienen poco o ningún efecto sobre las propiedades del concreto fresco o endurecido.

Cantidades mayores del 10% pueden incrementar los requerimientos de agua de la mezcla, afectando las resistencias mecánicas y la resistencia a la abrasión.

24 ADITIVOS FLOCULANTES

24.1 RAZONES DE EMPLEO

Los aditivos floculantes tienen por finalidad:

- a) Incrementar la velocidad de exudación y disminuir el volumen de ésta.
- b) Reducir el flujo.
- c) Incrementar la cohesividad.
- d) Incrementar la rigidización inicial del concreto.

24.2 MATERIALES

Los polielectrolitos sintéticos han sido empleados como aditivos floculantes.

25 ADITIVOS FUNGICIDAS, INSECTICIDAS Y GERMICIDAS

25.1 CONCEPTO

Estos aditivos dan al concreto propiedades insecticidas, fungicidas o germicidas. Su principal propósito es inhibir o controlar el crecimiento de bacterias y hongos en los pisos y paredes. No siempre son totalmente efectivos

25.2 MATERIALES EMPLEADOS

Los materiales más efectivos son:

- a) Los fenoles polialogenados;
- b) Las emulsiones dioldren;
- c) Los compuestos de cobre.

25.3 PROPORCIONES RECOMENDADAS

El porcentaje de adición recomendado varía del 0.1% al 10% en peso del cemento, dependiendo de la concentración y composición química del producto. Porcentajes por encima del 3% pueden tener efecto adverso sobre la resistencia.

25.4 EFECTIVIDAD

La efectividad de estos productos es temporal y varía con el tipo de desgaste y el procedimiento de limpieza empleado.

26 ADITIVOS IMPERMEABILIZANTES

26.1 DEFINICION

El término impermeabilidad implica la prevención de la penetración de agua en el concreto seco, o la detención de la transmisión de agua a través del concreto no saturado.

No existen aditivos capaces de producir los efectos indicados y el término «impermeabilidad» se aplica a las reducciones en la velocidad de la penetración de agua en un concreto seco, o a la velocidad de transmisión de agua en un concreto no saturado.

26.2 MAGNITUD DEL PROBLEMA

Las presas, muros de retención, tanques de almacenamiento, etc., pueden presentar mostrar evidencias de filtración de agua, debidas a fallas de producción y colocación del concreto, o a grietas en la estructura.

26.3 NECESIDAD DE LOS IMPERMEABILIZANTES

Un concreto de buena calidad con una porosidad baja, un buen grado de hidratación, una adecuada relación gel-espacio, una relación agua-material cementante no mayor de 0.6 en peso, y un curado adecuado, no requiere impermeabilizantes ni estos tienen efecto importante. Se considera que el mejor impermeabilizante sigue siendo el concreto de buena calidad y adecuadamente trabajado.

26.4 MATERIALES EMPLEADOS

Los aditivos de este grupo comprenden jabones, butil estearato, y determinados productos de petróleo:

- a) Los jabones comprenden sales de ácidos grasos, usualmente estearatos u oleatos de calcio o de amonio. El contenido de jabón es del 20% o menor y el resto es cloruro de calcio o cal. El total de jabón añadido debe ser menor del 0.2% en peso del cemento. Estos aditivos originan incorporación de aire.
- b) El estearato de butilo es mejor repelente del agua que los jabones. No incorpora aire y su efecto sobre la resistencia es despreciable. Se añade como emulsión con el estearato en proporción del 1% en peso del cemento.
- c) Entre los productos de petróleo se encuentran los aceites minerales, emulsiones asfálticas y ciertos asfaltos rebajados. Los aceites minerales pesados, con viscosidad SAE 60 son efectivos para hacer el concreto repelente al agua y reducir su permeabilidad. Los aceites, añadidos en proporción no mayor del 5% en peso del cemento, tienen muy poco efecto sobre la resistencia.

27 ADITIVOS REDUCTORES DE IMPERMEABILIDAD

27.1 DEFINICION

Se entiende por permeabilidad a la velocidad con la que el agua circula a través de un elemento de concreto saturado, bajo una gradiente hidráulica mantenida externamente.

27.2 MATERIALES

Los aditivos minerales, adecuadamente dosificados, reducen la permeabilidad de mezclas en las que el contenido de cemento es relativamente bajo. La reducción del contenido total de agua por el empleo de un aditivo reductor disminuye la porosidad total ligeramente, pero no existe información suficiente como para demostrar que la permeabilidad se reduce significativamente.

Todos aquellos factores que tienden a incrementar el grado de hidratación y la relación gel-espacio, y por tanto reducen los poros capilares, tienden a reducir la permeabilidad del concreto.

28 ADITIVOS REDUCTORES DE LA EXPANSION ALCALI-AGREGADO

28.1 MATERIALES

Existe información que indica que las sales solubles de litio y bario, determinados aditivos incorporadores de aire y algunos aditivos reductores de agua retardadores de fragua, producen reducción en la expansión debida a la reacción entre los álcalis del cemento y las sílices amorfas presentes en algunos agregados.

En algunos casos se ha utilizado, con resultados aceptables, 1% de sales de litio, ó 2% a 7% de sales de bario, en peso del cemento, con resultados aceptables.

29 ADITIVOS INHIBIDORES DE LA CORROSION

29.1 FACTORES EN LA CORROSION

La principal contribución a la corrosión de los elementos metálicos embebidos en el concreto es la presencia de cloruro de calcio en la mezcla. Esta presencia puede deberse a la exposición del concreto a ambientes salinos o agua de mar; exposición a suelos salinos desde los cuales los cloruros pueden alcanzar el acero por perfusión a través del concreto, o el empleo del cloruro de calcio como aditivo acelerante.

29.2 MATERIALES INHIBIDORES

En general, el concreto proporciona excelente protección al acero de refuerzo y posiblemente debido a ello existe poca información en relación al empleo de aditivos inhibidores de la corrosión de los elementos metálicos en el concreto.

Se ha empleado los cromatos como inhibidores de la corrosión, pero se ha encontrado que ellos no proporcionan protección adecuada bajo condiciones en las que los cloruros entran al concreto.

El empleo de benzoato de sodio al 2% en el agua de mezclado, o una pasta cemento-benzoato al 10%, empleada para pintar los elementos metálicos, han sido descritos como efectivos en el control de la corrosión del acero de refuerzo. Adicionalmente el benzoato de sodio acelera el desarrollo de la resistencia en compresión y permanece en el concreto aún después de diez años de exposición.

La presencia de lignosulfonatos de calcio retarda el tiempo de corrosión en concretos en los que se ha incorporado cloruro de sodio.

El nitrito de sodio, en porcentajes del 2% al 3%, puede ser un buen inhibidor en productos tratados en el autoclave. Igualmente, este nitrito, al 2%, puede ser efectivo en concretos que contienen cloruro de calcio.

En concretos curados al vapor a presión atmosférica, el empleo de cloruro de calcio tiende a acelerar el proceso de corrosión del acero de refuerzo. En cambio, bajo las mismas condiciones, sales de baja solubilidad tales como determinados fosfatos, fluosilicatos y fluoaluminatos, al 1% en peso del cemento, han demostrado a nivel de laboratorio tener cierta efectividad.

29.3 EL CONCRETO COMO INHIBIDOR

La información disponible indica que un concreto de buena calidad sigue siendo el mejor inhibidor de la corrosión del acero de refuerzo. Un concreto con adecuado recubrimiento, buena formación de gel, un pH del orden de 11, baja permeabilidad, poca carbonatación o ausencia de ella, libre de grietas, y con un mínimo de poros capilares, es mejor que cualquier aditivo para proteger al acero de refuerzo en un proceso corrosivo.

30 ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES

30.1 CONCEPTO

Los aditivos conocidos como superplastificantes, o aditivos reductores de agua de alto rango, son químicamente diferentes a los aditivos reductores de agua normales y pueden ser empleados para reducir significativamente el contenido de agua del concreto en valores del orden del 30%, manteniendo una consistencia dada y sin producir efectos no deseados sobre el fraguado.

Igualmente pueden ser empleados para incrementar el asentamiento significativamente sin necesidad de aumentar el agua de la mezcla original. La importancia de estos aditivos justifica que se efectúe un amplio estudio de los mismos.

Desde que fueron introducidos en el Japón en la década de los 60 como formaldehído naftaleno ó como formaldehído melamina sulfonato, se han estado empleando para mejorar las propiedades del concreto.

30.2 CLASIFICACION

Los superplastificantes se clasifican en cuatro grupos: los SMF (formaldehído melamina sulfonato condensado); los SNF (formaldehído naftaleno sulfonato condensado); los MLS (lignosulfonatos modificados); y otros que incluyen sulfonatos policíclicos, compuestos aromáticos, ésteres carbohidratos.

La molécula de lignosulfonato consiste en la sustitución de unidades de pentil propano con grupos hidróxilo, metoxicos, carbonilos y ácidos sulfónicos; el peso molecular puede variar entre pocos cientos a 100000. Los superplastificantes basados en SMF pueden tener un peso molecular de aproximadamente 30000.

En los superplastificantes del tipo SNF, el número de estructuras moleculares puede ser tan bajo como 2. Tal estructura es capaz de reducir la tensión superficial del agua en la mezcla e incorporar aire, pero esto puede ser impedido usando un polímero de alto peso molecular, comúnmente con un valor de $N = 10$

30.3 RAZONES DE EMPLEO

Los superplastificantes son usados en el concreto para producir concretos con relación agua-cemento muy baja. Así se permite obtener concretos de alta resistencia con bajo contenido de agua y el mismo contenido de cemento, sin afectar la trabajabilidad. Se puede lograr reducciones de agua mayores del 30% y concretos con relaciones agua-cemento tan bajas como 0.28 satisfactoriamente colocados.

Igualmente se les emplea para producir concretos con contenidos reducidos de cemento sin cambiar la relación agua-cemento. Apesar de reducir los requerimientos de cemento en un 20% a 30% no se afectan las resistencias normales.

Adicionalmente pueden ser empleados para producir concretos autocompactados, autonivelados, y concretos fluidos. En estas aplicaciones no se intenta reducir la relación agua-cemento ni el contenido de cemento. El objetivo es incrementar la trabajabilidad sin causar segregación, permitiendo colocar el concreto en secciones con alto contenido de acero de refuerzo.

30.4 APLICACIONES ADICIONALES

A las ya indicadas el uso de concretos con superplastificantes permite su empleo en las siguientes aplicaciones:

- Colocación en elementos con congestión de refuerzo.
- Colocación en áreas que no son fácilmente accesibles.
- Eliminación del problema de rotura y adaptación de encofrados.
- Facilidad de colocación en áreas de paneles, pisos, cimentación de placas, puentes, pavimentos, cubiertas de techos, losas, etc.
- Bombeo satisfactorio del concreto.
- Empleo en aplicaciones de riego o rocío, revestimiento de tuneles, y molduras arquitectónicas especiales.
- Empleo en la industria de prefabricados con resistencias de 400 kg/cm² a las 8 a 18 horas, con ahorro de cemento.
- Producción de concretos con resistencias mayores de 1000 kg/cm².

- Otras aplicaciones tales como concretos de baja permeabilidad; mejora en el acabado de las superficies; reducción de las contracciones; y ahorro de costos.

Cuando existe la necesidad de usar cementos y agregados de calidad secundaria, el empleo de superplastificantes permite producir concretos con buenas características de durabilidad y bajas relaciones agua-cemento.

Los superplastificantes pueden ser empleados en la producción de concretos con cenizas; concretos con microsilices; concretos con escoria de altos hornos; mezclas con fibras; y concretos livianos. Su efecto de dispersión puede ser aprovechado con otros compuestos cementantes.

30.5 EFECTOS EN LA PASTA

La pasta constituye una pequeña parte del concreto pero influye en muchas de sus propiedades. Un estudio de la reología, absorción, hidratación y potencial zeta puede proporcionar un mejor entendimiento del rol del superplastificante en el concreto fresco.

30.5.1 DISPERSION

En la pasta se pueden presentar grandes aglomerados irregulares de partículas de cemento. La adición de superplastificantes produce la dispersión en pequeñas partículas. La comparación entre el cemento en suspensión sin el aditivo y con el superplastificante muestra mejor dispersión y partículas más finas.

30.5.2 REOLOGIA

Las propiedades reológicas dependen de la relación agua-cemento, tipo y superficie específica del cemento, procedimiento y tiempo de mezclado, y temperatura de hidratación.

Los superplastificantes influyen en el comportamiento reológico de la pasta al reducir el valor de fluencia y la viscosidad plástica. En valores del 0.8% del superplastificante, el valor de fluencia es casi cero.

En una relación constante agua-cemento, la viscosidad y el esfuerzo total de una particular magnitud de corte son disminuídos por la adición de superplastificante. Los cambios de viscosidad de la pasta por la incorporación de un superplastificante son menores en aquellas que contienen el aditivo. Para 1% de aditivo en una relación agua-cemento de 0.3 se presenta el mismo efecto de fluidez que en una pasta de relación agua-cemento de 0.4 sin el aditivo.

Adicionalmente se ha determinado que la adición de 0.3% de superplastificante

desarrolla un asentamiento inicial alto con una buena retención de asentamiento a más de 3 horas.

30.5.3 ABSORCION

La acción de dispersión de los superplastificantes está relacionada con su interacción con el cemento y sus compuestos. El estudio de la magnitud y cantidad de absorción de diversos superplastificantes sobre los productos de hidratación proporciona información acerca de las propiedades reológicas y de fraguado del cemento.

Los resultados indican que la absorción del superplastificante en el C3A ocurre en cantidades importantes aún en pocos segundos. La hidratación del C3A ocurre casi inmediatamente después del contacto con el agua y el producto, aluminato exagonal, absorbe grandes cantidades de superplastificante. Así, a pesar que se presenta sólo en pequeñas cantidades de alrededor del 10% en el cemento, el C3A influye en forma importante en el efecto del superplastificante sobre el cemento debido a su capacidad de absorber grandes cantidades de aditivo.

Los experimentos de absorción en el C3S muestran que en la primera hora ocurre una absorción reducida en la superficie. No hay absorción adicional durante el período de inducción, pero la absorción ocurre luego de 8 horas debido al incremento en la dispersión e hidratación.

Los experimentos realizados explican los mejores efectos fluidificantes de los superplastificantes cuando son añadidos al concreto a los pocos minutos luego del mezclado con el agua. En la adición del aditivo conjuntamente con el agua de mezclado, el superplastificado es fuertemente atacado en cantidades importantes por la mezcla C3A-yeso, soltando sólo pequeñas cantidades para la dispersión en la fase silicato. Con la adición tardía, la mezcla es absorbida en una menor extensión, y habrá aditivo sobrante en la solución para promover la dispersión de la fase silicato y disminuir la viscosidad del sistema.

Las características de absorción han sido estudiadas en diferentes tipos de cemento, encontrándose que la cantidad de absorción, como una función de la concentración de equilibrio da un orden de cementos Tipo III > Tipo I > Tipo II. Las relaciones de C3A/SO₃ en el cemento siguen la misma tendencia. Un mayor dosaje de superplastificante se requiere para el cemento Tipo I que para el Tipo V.

30.5.4 POTENCIAL ZETA

La trabajabilidad de la pasta depende del momento en que el superplastificante es añadido. Generalmente es mayor cuando es añadido unos pocos minutos después del agua de mezclado. Ello sugiere que el efecto de reducción de agua de los superplastificantes está relacionado a su efecto de dispersión, como

indicado por el potencial Zeta. Ello sugiere que cierto número de grupos sulfónicos unidos al polímero es esencial para una absorción simple y dispersión eficiente.

30.5.5 HIDRATACION

La magnitud de la hidratación del cemento y sus componentes está influenciada por los superplastificantes, los cuales retardan la hidratación del C3A. A los pocos segundos del contacto con el agua el calor se desarrolla rápidamente lográndose el valor máximo entre 8 y 9 minutos en muestras que no contienen aditivo. En las que si lo contienen, la cantidad total de calor generado en los primeros 30 minutos y el valor máximo son menores en comparación con las mezclas sin aditivo.

Las opiniones están divididas acerca de la influencia de los superplastificantes en la hidratación temprana de C3A más yeso. Sin embargo existe acuerdo general que los superplastificantes retardan la conversión de la etringita a monosulfatos.

La hidratación del C3S es retardada por los superplastificantes debido a que el período de inducción y el valor máximo son cambiados a altas temperaturas, encontrándose un importante retardo de la hidratación en la presencia del superplastificante, afectándose igualmente la relación CaO/SiO_2 . La formación de etringita en el cemento puede ser acelerada o retardada, dependiendo del contenido de sulfato alcalino.

30.5.6 MICROESTRUCTURA

En la hidratación del C3A inicialmente se forman láminas exagonales, pero en la presencia de superplastificantes los productos de hidratación pueden formarse como un gel recubriendo la superficie el C3A. En la presencia del aditivo pueden formarse agujas como redes en lugar de grandes paquetes de fibras.

El hidrato formado en la presencia del aditivo tiene una estructura más compacta y parece ser menos poroso que el espécimen de referencia. A pesar que no se han observado diferencias importantes en la morfología de las pastas de cemento hidratadas con y sin aditivo, se puede formar partículas más finas con estructura más densa usando superplastificantes.

30.6 PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO

30.6.1 TRABAJABILIDAD

La trabajabilidad del concreto puede ser mejorada por la adición de superplastificantes a la mezcla. Los factores que afectan son el tipo, dosaje y momento de

adición del aditivo y la relación agua/cemento. Relacionadas con la trabajabilidad son la consistencia y fluidez, las cuales describen la facilidad con la cual la mezcla fluye en los encofrados, facilitando la colocación sin segregación.

30.6.2 CONSISTENCIA

La adición de superplastificantes aumenta el asentamiento del concreto. El dosaje requerido para un valor determinado depende del tipo de aditivo. El dosaje requerido para un asentamiento dado depende también del asentamiento inicial, requiriendo mayores dosajes las mezclas de bajo asentamiento.

Añadiendo el superplastificante pocos minutos después del mezclado del cemento con el agua se puede incrementar en forma muy importante el asentamiento, pudiendo obtenerse valores altos del mismo. La adición del superplastificante después de 5 minutos de realizada la mezcla, generalmente ocasiona decrementos en los valores del asentamiento.

Para los cementos Tipos I, II, y V, el valor inicial del asentamiento de 75 mm puede pasar a 225 por la presencia de 1.5% de aditivo. Este valor puede variar dependiendo de la composición del cemento. Igualmente, los efectos del aditivo están influenciados por el contenido de cemento, aumentando el asentamiento con el contenido de cemento. En el rango de temperaturas de 5 a 30 C no hay grandes diferencias por la acción del aditivo.

30.6.3 PERDIDA DE ASENTAMIENTO

Los concretos con suplastificante se mantienen con asentamientos mayores que los normales hasta los 60 á 90 minutos. Luego se presenta un rápido decrecimiento como «pérdida de asentamiento». Los factores que intervienen en esta pérdida incluyen el valor inicial del asentamiento, tipo y cantidad de superplastificante, tipo y cantidad de cemento, momento de incorporación, humedad, criterio de mezclado, y el uso de otros aditivos en la mezcla.

Para mantener la trabajabilidad se debe añadir el superplastificante casi en el momento de la descarga del concreto.

La pérdida de asentamiento es menor a temperaturas más bajas. La composición química y mineralógica del cemento es otro factor que determina la velocidad de pérdida de asentamiento. Se sabe que la fase C3A reacciona con el yeso y el producto se desarrolla en una estructura cristalina que penetra la masa, siendo posible que la extensión de la reacción del C3A, el yeso y la forma cristalina del producto tengan un efecto importante en la trabajabilidad del concreto. La adición del aditivo estimula la reacción entre el C3A y el yeso. La magnitud de esta reacción es estimulada por la presencia de la cantidad de álcalis en el cemento.

El C3S puro también presenta pérdidas de asentamiento y su influencia puede ser importante.

Los altos requerimientos de dosaje para los cementos Tipo I y III puede estar relacionado con los altos contenidos de C3A de los mismos. Cuanto menor es el contenido de C3A mejor el comportamiento del superplastificante.

El reemplazo de la mezcla que ya contiene aditivo no afecta a la resistencia del concreto. La inclusión de algunos tipos de retardadores en la formulación de los superplastificantes también retardará las pérdidas de asentamiento. Además de incrementar el asentamiento inicial, la combinación de gluconato de sodio-aditivo superplastificante también retarda la pérdida de asentamiento. El contenido de cemento en la mezcla también tiene un efecto en la pérdida de asentamiento, a mayores contenidos de cemento se reduce la magnitud de la pérdida.

30.6.4 SEGREGACION Y EXUDACION

En aquellos concretos en los que se emplea aditivos superplastificantes como reductores de agua, no ocurre segregación o exudación indebidas. La segregación puede ocurrir con una cantidad excesiva de aditivo, agua, proporcionamiento inadecuado de la mezcla, agregado de granulometría discontinua, vibración prolongada o alguna combinación de las anteriores.

Generalmente la exudación decrece con la reducción de la relación agua-cemento. En concretos fluidos la exudación y la segregación pueden ser reducidas y la cohesividad incrementada por la adición de finos. A pesar de ser reconocidas las características propias de auto enrasamiento de los concretos con superplastificantes, esto no quiere decir que la vibración normal puede ser eliminada. Se necesita cuidado para una apropiada consolidación.

30.6.5 REDUCCION DE AGUA

Los superplastificantes pueden reducir los requisitos de agua del concreto en el orden del 15% al 30% sin afectar la trabajabilidad. El concreto resultante presentará mayor resistencia y menor permeabilidad.

La cantidad de reducción de agua que se logra con un determinado superplastificante depende del dosaje y asentamiento inicial. Más allá de un dosaje determinado, reducciones de agua adicionales no son posibles. Para una determinada reducción de agua se puede requerir más aditivo del tipo SMF que del tipo SNF.

La reducción de agua se incrementa a medida que son mayores los dosajes del aditivo y el contenido de cemento. La cantidad de reducción de agua depende también del tipo de cemento.

30.6.6 CONTENIDO DE AIRE

Los superplastificantes basados en SNF y lignosulfonatos incorporan algo de aire en el concreto.

En concretos fluídos los superplastificantes facilitan la liberación de aire, normalmente del 1% al 3% de aire está siendo perdido. Los dosajes repetidos acentúan el efecto.

Los superplastificantes, en alguna medida, pueden fomentar la unión de las burbujas de aire. De manera que los concretos con superplastificantes requieren mayores dosajes de un agente incorporador de aire con respecto a un concreto sin superplastificante.

30.6.7 TIEMPO DE FRAGUADO

Los superplastificantes, en alguna extensión, retardan el fraguado inicial del concreto. La extensión del retardo depende del tipo y dosaje del superplastificante. Generalmente esto no plantea ningún problema. Los tiempos de fraguado pueden retardados o acelerados cuando se usa superplastificantes en combinación con otros aditivos.

30.7 EFECTOS SOBRE EL CONCRETO ENDURECIDO

30.7.1 RESISTENCIA

Se pueden alcanzar reducciones de agua de alrededor del 30% en la fabricación del concreto empleando superplastificantes. El incremento en las propiedades mecánicas tales como resistencia a la compresión y flexión y módulo de elasticidad, están generalmente relacionados con la reducción de la relación agua-cemento. Todos los concretos presentan incrementos de resistencia con la reducción de agua. Se ha registrado resistencias hasta de 800 kg/cm² a los 28 días para este tipo de concretos.

30.7.2 CONTRACCION Y ESCURRIMIENTO PLASTICO

La contracción de los concretos a los que se ha adicionado superplastificantes es igual o menor que la del concreto de referencia, aunque puede haber excepciones. Generalmente los valores de contracción son menores que los límites máximos prescritos por la Norma ASTM C-494. En concretos fluídos la contracción puede ser mayor que el concreto normal y ello debe ser considerado en el diseño de estructuras.

Aunque se dispone de información sobre el escurrimiento en concretos con superplastificantes, el uso de diferentes mezclas de concreto, condiciones de

carga y estados de humedad, hace difícil la comparación. El consenso es que los concretos con superplastificante tienen aproximadamente el mismo escurrimiento plástico que los concretos de referencia.

30.7.3 CONGELACION Y DESHIELO

En concretos que contienen superplastificantes generalmente el valor del factor de espaciamiento puede ser excedido dependiendo del volumen de aditivo. El incremento del factor de espaciamiento puede deberse a la pérdida de burbujas durante el mezclado y compactación, así como a la unión entre ellas.

Independientemente del incremento del factor de espaciamiento, no se producen efectos negativos sobre la durabilidad frente a los procesos de congelación. El factor de espaciamiento entre burbujas aumenta con el incremento del dosaje de superplastificante hasta alcanzar su valor máximo. Incrementos adicionales en el dosaje decrecen este valor.

No hay criterios claros para aceptar o rechazar concretos con superplastificante sobre la base del factor de durabilidad. Una estimación aproximada es que un factor menor de 40 puede indicar que posiblemente el concreto es insatisfactorio.

Los morteros que contienen superplastificantes presentan buena resistencia a la helada a pesar que el factor de espaciamiento puede ser mayor de 0.2 mm. El mejoramiento en la resistencia a la congelación se atribuye al incremento del número de poros de diámetro en el rango de 35 μm . Los superplastificantes parecen eliminar burbujas de aire grandes e incrementar el volumen de poros del tamaño crítico requerido para resistencia a la congelación.

30.7.4 ATAQUE POR SULFATOS

Las soluciones de 3% de sulfato de magnesio que atacan concretos en los que se ha incorporado superplastificantes, no producen cambios en el peso, longitud y módulo dinámico de los especímenes.

30.7.5 CORROSION

La adición de un superplastificante al concreto no promueve la formación de óxido en el refuerzo.

30.7.6 ADHERENCIA ACERO - CONCRETO

La incorporación de un superplastificante mejora la adherencia entre el refuerzo y el concreto, tanto para concretos normales como para concretos livianos. Para un concreto normal, la adición de un superplastificante incrementa la resistencia por adherencia entre el acero y el concreto a los 7 días de 12 a 35 kg/cm^2 para barras lisas y de 150 a 280 kg/cm^2 para barras corrugadas.

30.8 EMPLEO CON OTROS ADITIVOS

Si los aditivos superplastificantes son empleados en combinación con un aditivo incorporador de aire convencional, se pueden producir efectos variables y a veces dañinos sobre la incorporación de aire, dependiendo de la composición y dosaje de empleo, características de los materiales integrantes del concreto, y del asentamiento del mismo.

30.9 DOSIFICACION

Los aditivos superplastificantes pueden ser empleados en adiciones del 1.5% en peso del cemento, con muy pequeña incorporación de aire y poco efecto sobre el tiempo de fraguado. La reducción de agua variará dependiendo del dosaje y tipo de aditivo, pero puede llegar al 25% a 30% en mezclas ricas.

Aún con las bajas relaciones agua-material cementante obtenibles con el empleo de aditivos superplastificantes, los concretos pueden presentar una alta pérdida de asentamiento. Cuando son empleados para incrementar la fluidez de la mezcla y facilitar la colocación del concreto, las mezclas generalmente pierden su asentamiento adicional dentro de los 20 ó 30 minutos que siguen a la incorporación del aditivo a la mezcladora.

Por la razón anterior se recomienda que estos aditivos sean añadidos al concreto premezclado cuando éste ya está en obra. Estos aditivos pueden ser añadidos varias veces para retemplar el concreto a fin de mantener el asentamiento que pueda estarse perdiendo.

30.10 COMPORTAMIENTO

Como en el caso de los aditivos reductores de agua convencionales, estos aditivos pueden tener un comportamiento diferente con los diversos tipos y marcas de cemento. Los efectos indeseables varían de un excesivo retardo a prematura rigidez, dependiendo del dosaje y composición química del aditivo, así como de la composición química del cemento.

31 MICROSILICES

31.1 INTRODUCCION

Las microsílices son un polvo muy fino compuesto en un 90% al 96% de dióxido de sílice amorfo, un material que tiene cualidades y propiedades lo bastante buenas para ser empleado en el concreto. Este material es un producto de las industrias de ferrosilicón.

Las microsílices fueron ensayadas para ser usadas en el concreto en la década de los 50 en Noruega. Se obtuvo buenos resultados en la resistencia del concreto y posteriormente se determinó que en su exposición a los sulfatos los concretos preparados incorporando microsilice eran tan resistentes como aquellos preparados utilizando cemento resistente a los sulfatos.

Como en la época de su descubrimiento la producción industrial era imposible dado que no se disponía de métodos para retener las grandes cantidades de partículas ultrafinas, no se siguió con los estudios.

En 1970 el Gobierno Noruega estableció estrictas medidas de protección contra los humos de la industria de aleaciones. Ello hizo necesaria desarrollar nuevos procedimientos en la tecnología de los filtros, lo que permitió en pocos años disponer de grandes cantidades de microsílices y ampliar las investigaciones sobre el empleo de las mismas en el campo del concreto.

31.2 PRODUCCION

La microsilice es producida por la reducción a alta temperatura de cuarzo en altos hornos eléctricos en los que el producto principal es aleaciones de silicio o de ferrosilicio.

El cuarzo de alta pureza es calentado a 2000°C en un horno eléctrico conjuntamente con carbón o madera, empleados para remover el oxígeno. La aleación es recolectada en la parte inferior del horno. Durante la reducción del cuarzo éste genera humos los cuales son condensados como en microesferas de sílice amorfa.

Los humos son recogidos del horno por pre colectores y ciclones, los cuales remueven las partículas mayores de madera o carbón no calcinados, y el polvo es recogido en dispositivos especiales.

La química del proceso está compuesta de etapas que dependen de la temperatura. El SiC inicial juega un papel importante como elemento intermedio, permitiendo la formación del gas SiO el cual eventualmente forma las microsílices. Este gas inestable viaja a través del horno en el cual reacciona con el oxígeno para dar el dióxido de sílice.

Cuando la temperatura cae el SiO₂ se condensa en pequeñas esferas de microsilice. Estas pequeñas partículas tienen un diámetro promedio de 0.1 a 0.1 µm

31.3 CARACTERISTICAS

La microsilice es producida como un polvo ultrafino de coloración tendiendo al gris, con las siguientes propiedades:

- .- Por lo menos 90% de SiO_2
- .- Tamaño medio de las partículas de 0.1 a 0.2 μm .
- .- Superficie específica mayor de 15000 m^2/kg
- .- Partículas de perfil esférico
- .- Bajo contenido de carbón.

Un elemento en el procesamiento de las microsilices es la remoción de las partículas gruesas, las cuales pueden ser astillas de madera, trozos de carbón, u otros componentes de la carga del horno. Ellas deben ser eliminadas.

31.4 FORMAS DISPONIBLES

La microsilice se puede obtener en cuatro formas:

- (a) No densificada, con una densidad de volumen de 200-300 kg/m^3 . Debido a su muy baja densidad de volumen y subsecuentes problemas en la manipulación, este tipo de microsilices es a menudo considerada como impracticable para su uso en la producción de concretos normales. Las áreas en las que ella es empleada exitosamente son los productos refractarios, revestimientos de protección y lechadas y morteros empleados en procedimientos de reparación del concreto.
- (b) Densificada, con una densidad de volumen mayor de 500 kg/m^3 . En el proceso de la densificación las partículas estarán en una aglomeración suelta, siendo las partículas de tamaño mayor. Esto hace al polvo fácil de manipular y facilita el transporte.
Las áreas en que este material es empleado con éxito son los procesos de prefabricación, pisos de concreto, o plantas de concreto premezclado; así como en la industria de concretos refractarios.
Si la densidad de volumen es demasiado alta durante el proceso de densificación, el usuario puede experimentar problemas para obtener una adecuada dispersión del material. Adicionalmente, el material que ha sido densificado más allá de los 700 kg/m^3 no ha dado buenas combinaciones del dosaje de microsilices y cementos alcalinos, pudiendo tener un comportamiento inconveniente.
- (c) Peletizada, con una densidad de volumen mayor de 600 kg/m^3 . El material en esta forma no es adecuado para su empleo en el concreto desde que es virtualmente imposible dispersarlo adecuadamente en el proceso de mezclado.
- (d) Lechadas, con una gravedad específica de 1400 kg/m^3 . Este material es producido mezclando el polvo no densificado y agua en iguales proporciones para producir una lechada estable. En esta forma el material es fácilmente disperso en la mezcla de concreto.

31.5 EL MATERIAL

Las microsílices son en su forma básica un polvo de color gris. Como se ha visto en el acápite anterior, pueden ser conseguidas en diferentes formas, dependiendo de su aplicación y facilidades de manejo.

Las microsílices tienen como principales características físicas su perfil esférico y su diámetro promedio de cerca de 0.15 μm . El pequeño tamaño de las partículas da una superficie específica muy alta del orden de 15000 á 20000 m^2/kg . Las unidades a menudo se agrupan y forman aglomeraciones de partículas sueltas ligadas.

Se considera que las microsílices contienen más del 90% de dióxido de silicio. Otros elementos pueden estar presentes en cantidades menores del 1% para cualquiera de ellos. Por su características puzolánicas reaccionan con el hidróxido de calcio proveniente de la hidratación del cemento para formar material cementante.

31.6 EFECTOS SOBRE EL CONCRETO FRESCO

El pequeño tamaño de las partículas de microsilice hace que el material tenga una gran superficie específica total, lo cual tiene efectos importantes sobre las propiedades de los concretos no endurecidos.

En un dosaje de 10% de microsílices en peso del cemento, entre 50000 y 100000 microesferas son añadidas por cada grano de cemento. De esta manera la mezcla es saturada con el material fino y esta adición origina un incremento de la superficie interna en un importante orden de magnitud.

31.6.1 TRABAJABILIDAD

El importante incremento en el área superficial da un correspondiente incremento en las fuerzas superficiales internas, lo que origina un aumento en la cohesividad del concreto. Este efecto es ventajoso pero igualmente da lugar a que el concreto sea menos trabajable durante la colocación., lo cual obliga a un incremento en el asentamiento para mantener un trabajabilidad «aparente». Esta es una de las más importantes razones por las cuales las microsílices deben ser empleadas conjuntamente con plastificantes o superplastificantes.

El término trabajabilidad «aparente» se refiere al efecto de la microsilice sobre el asentamiento medido en el cono, encontrándose que un concreto fresco con microsilice tendrá un asentamiento más bajo que un concreto similar ordinario debido a la mayor cohesividad de la mezcla. Cuando se aplica energía a la mezcla, como en el caso de bombeo o vibración, las partículas de microsilice, siendo esféricas, deberán actuar como billas y lubricar la mezcla dando una

movilidad mayor que la de concretos ordinarios de similar asentamiento. Adicionalmente, la adición de microsilíce deberá causar una disminución en la viscosidad del material aunque se incremente ligeramente la resistencia al corte de la mezcla fresca.

El efecto sobre la trabajabilidad deberá variar para microsilíces de diferentes marcas. Además, el tipo de producto, seco ó húmedo que es empleado, deberá influir en la demanda de agua del material. La alta superficie específica de las microsilíces da lugar a un incremento en la demanda de agua. Ello puede ser parcialmente compensado por modificaciones en las proporciones de la mezcla, tales como la reducción en el contenido de otros finos.

31.6.2 COHESIVIDAD

Desde que el concreto con microsilíce es más cohesivo, el es menos susceptible a procesos de segregación que los concretos regulares, aún en los concretos fluidos. La reducción en la tendencia a la segregación es también útil para lechadas altamente fluidas y mezclas a ser bombeadas. La adición de pequeñas cantidades de microsilíce a una mezcla diseñada para bombeo deberá actuar como una ayuda, dando excelentes características de bombeo.

Otra consecuencia de las modificaciones en la cohesividad es que un concreto con microsilíce no deberá producir exudación. Por lo tanto, el concreto deberá ser curado de acuerdo con buenas prácticas de obra. La falta de agua en la superficie también permite que los procesos de acabado puedan empezar bastante antes que con los concretos ordinarios.

La falta de agua de exudación incrementa la resistencia al corte y la tendencia al espesamiento, lo cual ha sido tomado como que la adición de la microsilíce favorece un rápido fraguado. Sin embargo se olvida que la microsilíce es una puzolana y requiere hidróxido de calcio para comenzar la reacción puzolánica. El tiempo de fraguado para los concretos con microsilíce es similar al de los concretos ordinarios.

31.6.3 FRAGUADO Y ENDURECIMIENTO

Conforme el concreto endurece, la acción química de la microsilíce tiene efecto sobre las propiedades físicas. La microsilíce reacciona con el hidróxido de calcio para producir silicato de calcio hidratado. Así de esta manera el volumen de ligante se incrementa, dando lugar a incremento de la resistencia y reducción de la permeabilidad por densificación de la matriz de concreto.

Desde que la microsilíce tiene una muy alta área superficial y un alto contenido de dióxido de sílice reactivo, ella es más reactiva que otros materiales suplementarios, tales como las cenizas y la escoria granulada de alto horno.

Conforme la microsilíce reacciona y produce silicato de calcio hidratado, los vacíos y poros en el concreto son llenados con el hidrato y forman uniones entre los granos de cemento y el agregado. La combinación de efectos químicos y físicos da lugar a que los concretos con microsilíce sean muy homogéneos y densos, mejorando en forma significativa la resistencia e impermeabilidad.

Se ha encontrado que la interface, rica en portlandita, la cual rodea las partículas de agregado en los concretos normales está virtualmente ausente en los concretos con microsilíce.

31.6.4 CALOR DE HIDRATACION

Para una resistencia dada a los 28 días, los concretos con microsilíce deberán normalmente desarrollar menos calor que los concretos de cemento portland normales. La razón es que la cantidad de cemento se reduce, lo que motiva que el calor total también se reduzca. Las microsilíces, añadidas en un volumen de un tercio de la cantidad de cemento que puede ser reducida, empiezan a reaccionar después que el hidróxido de calcio se ha formado, contribuyendo muy poco al calor generado por el cemento.

Los concretos con microsilíce son muy sensitivos a variaciones de temperatura durante el endurecimiento. La magnitud de la hidratación, ello es su ganancia en resistencia, deberá ser reducida en forma importante con incrementos en la temperatura.

31.7 PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO

31.7.1 RESISTENCIA EN COMPRESION

La microsilíce, cuando es añadida a una mezcla de concreto, deberá incrementar la resistencia en forma muy importante. El porcentaje de incremento en la resistencia dependerá de diversos factores, algunos de los cuales son: el tipo de mezcla, tipo de cemento, volumen de microsilíce, empleo de un aditivo reductor de agua, propiedades del agregado, y régimen de curado.

Los concretos con microsilíce parecen seguir la relación convencional entre resistencia y relación agua-cemento, siendo las curvas de desarrollo más empinadas cuando se adiciona microsilíce.

Como en el caso de otros materiales suplementarios, los concretos con microsilíce son sensitivos a un secado temprano; pudiendo ser una consecuencia de ello una reducción en la resistencia final. Algunas combinaciones de microsilíce y cenizas parecen ser más resistentes a este efecto.

Con un diseño de la mezcla adecuado, los concretos de muy alta resistencia

pueden ser producidos empleando las facilidades de los concretos premezclados. En los Estados Unidos se han obtenido valores comerciales de 100 á 130 Mp. En el Peru se han obtenido valores de laboratorio del orden de 120 Mp.

31.7.2 RESISTENCIA EN FLEXION Y TENSION

La interrelación porcentual entre las resistencias en tensión, flexión y compresión de un concreto con microsilíce es similar a la de los concretos normales. Así, un incremento en la resistencia en compresión empleando microsilíce deberá dar un incremento proporcional en las resistencias en flexión y tensión similar al de los concretos sin microsilíce.

Ello significa que un concreto con microsilíce con una resistencia en compresión del orden de 120 Mp, podrá tener una resistencia en flexión del orden de 240 Mp y una resistencia en tensión del orden de 120 Mp.

31.7.3 FRAGILIDAD Y MODULO DE YOUNG

Los concretos de alta resistencia exhiben un comportamiento fragil y los concretos con microsilíce no son una excepción a esta regla. En general, cuanto mayor es la resistencia del concreto, más fragil es el material.

El módulo de elasticidad o módulo de Young no es proporcional a la resistencia en compresión, así que un alto valor de ésta no significa un incremento similar en el módulo. La deformación final antes de la falla en compresión uniaxial se incrementa con un aumento en la resistencia. Pero la curva esfuerzo-deformación a menudo tiende a ser lineal antes de tal falla.

El comportamiento fragil del concreto no necesariamente se transmite a la estructura como tal dado que la ductilidad del conjunto de la estructura deberá descansar mucho en el acero de refuerzo y en detalles tales como la ductilidad de los materiales componentes del concreto.

31.7.4 ADHERENCIA

Una mejora en la cohesividad debida al muy pequeño tamaño de las partículas de microsilíce deberá mejorar la superficie de contacto, y por tanto la adherencia, entre el concreto fresco con microsilíce y los elementos sobre los que se deposita tales como el acero de refuerzo, concreto antiguo, fibras, y agregado.

Se ha demostrado que la interface cemento-agregado es alterada cuando la microsilíce esta presente, encontrándose una mejora en la resistencia. La adherencia a las fibras es significativamente mejorada. Ello es especialmente importante en los torcretos mejorados con fibra de acero y microsilíce.

31.7.4 CONTRACCION

La contracción de los concretos con microsilíce es similar a la de los concretos normales. Sin embargo, debido a la reducida magnitud y velocidad del secado, la contracción tiene lugar más lentamente en los concretos con microsilíce. En los ensayos normalizados, ello da lugar a que se observe contracciones menores en los concretos con microsilíce que en los concretos normales.

31.7.5 ESCURRIMIENTO PLASTICO

Se ha encontrado una importante reducción en el escurrimiento plástico cuando se emplea microsilíce en los concretos con microsilíce, si se los compara con los concretos normales de resistencia convencional.

31.7.6 RESISTENCIA AL FUEGO

Se ha demostrado que bajo condiciones de fuego normales los concretos con microsilíce no se comportan en forma diferente a los concretos normales. El mecanismo involucrado es posiblemente de alta resistencia a los movimientos de vapor.

Si el concreto húmedo es ensayado en fuego muy intenso, en el que la baja permeabilidad de la microsilíce impide que el vapor escape, el astillamiento puede ocurrir debido a la presión de vapor.

Un concreto bien curado y debidamente acomodado no deberá mostrar astillamiento. Sin embargo hay indicaciones que para concretos de alta resistencia, independientemente de su contenido de microsilíce, hay una relación agucamiento por debajo de la cual astillamiento debido al fuego puede presentarse. Algunos investigadores han fijado este límite en 0.33. Por debajo de éste límite se deberá tener especial cuidado, y se sugiere el empleo de fibras plásticas.

Debe indicarse que el tipo de fuego es de gran importancia. Lo indicado en el acápite anterior tiene mayor para fuegos de rápida elevación de temperatura. En fuegos de elevación lenta, el riesgo de astillamiento es mucho menor, pudiendo estar ausente.

31.7.7 ABRASION Y EROSION

Concretos de alta resistencia con microsilíce presentan generalmente una mejor resistencia a la abrasión y erosión, siendo la resistencia a la abrasión una importante área de aplicación para este tipo de concretos.

En años recientes, los concretos de alta resistencia con microsilíce han demostrado ser un material excelente para pavimento de alta resistencia al desgaste.

31.7.8 SUMARIO

En resumen, en relación con las propiedades del concreto endurecido, puede decirse que:

- Se puede producir en forma rutinaria concretos de alta resistencia con microsilíce (80 Mp) y de muy alta resistencia con microsilíce (120 Mp)
- En los concretos con microsilíce, las resistencias en tensión y flexión se incrementan proporcionalmente con la resistencia en compresión.
- En los concretos de alta resistencia con una relación agua-material cementante baja, expuestos a la acción del fuego pueden ser susceptibles de astillarse si están expuestos a una rápida elevación de temperatura.

31.8 DURABILIDAD

31.8.1 GENERALIDADES

Los principales efectos físicos y químicos de la adición de microsilíces al concreto son una reducción de los contenidos de hidróxidos de calcio, potasio y sodio, así como una estructura de poros muy refinada en el concreto endurecido.

31.8.2 ALCALINIDAD

Un alto pH es importante para la durabilidad de los concretos armados debido a que la pasivación del acero es asegurada por un pH alto, mayor de 8.5. En un medio alcalino se forma una capa pasiva de óxido sobre la superficie del acero de refuerzo y se previene el ataque corrosivo.

Aún si los álcalis son lavados del concreto o consumidos por reacciones químicas con ácidos debiles, el concreto normalmente tiene una reserva de hidróxido de calcio no disuelto para reemplazar esta pérdida y renovar el aporte de OH en el agua de los poros. El consumo de cal libre por las microsilíces ha causado interés acerca del nivel de pH en los poros de los concretos con microsilíce. Adicionalmente se teme que el reducido contenido de Ca(OH)_2 pueda causar reducción a la resistencia a la carbonatación debido a que el Ca(OH)_2 actúa como un control de la reacción de carbonatación total.

La pasta de cemento hidratada consiste de 20% a 25% de Ca(OH)_2 , lo cual permite que los poros estén saturados con una solución de hidróxido de calcio. Tal solución tiene un pH de 12.4, de tal manera que la alcalinidad del concreto puede ser asegurada únicamente por el hidróxido de calcio. Sin embargo, desde que se han encontrado pH de 14, el hidróxido de calcio es sólo un factor.

Adicionalmente, medidas de alcalinidad de concretos que contienen 20% de microsilíce han mostrado una alcalinidad de 12.5 en tales mezclas, con una

reducción lineal del pH de 13.5 á 12.5 cuando el contenido de microsilíce se incrementa de 0% á 20%.

La principal cuestión relacionada con la alcalinidad es que determina el pH del agua de los poros. Las investigaciones han mostrado que los hidróxidos de sodio y de potasio tienen mayor influencia sobre la alcalinidad que el hidróxido de calcio. De esta manera los hidróxidos alcalinos presentes en el agua de los poros protegen el refuerzo contra la corrosión, pero no forman una reserva alcalina, la cual deberá ser provista por el hidróxido de calcio no disuelto.

De esta manera una pasta con un muy alto contenido de microsilíce y casi sin cal libre, deberá tener un pH alto y pasivante. Así, la reducción de la alcalinidad y la correspondiente unión de los iones potasio y sodio en la solución en los poros es uno de los medios en los cuales la adición de microsilíce se asume que disminuye el riesgo de una reacción álcali-sílice en el concreto. Se ha sugerido que es posible emplear microsilíces para compensar los altos contenidos de alcalis en el cemento.

31.8.3 POROSIDAD

El principal efecto físico de las microsilíces sobre la microestructura del concreto endurecido es un refinamiento de la estructura de los poros. El volumen total no necesariamente cambia, pero los grandes poros se subdividen en poros más pequeños. Esta mejora en la estructura de poros se refleja en resistencias mayores, pero es también de gran importancia en la permeabilidad del material.

Otro importante factor es la mejora en la calidad de la zona de transición entre las partículas de agregado y la pasta de cemento. Todo ello significa una mejora muy importante en la estructura y composición. Aparte de mejorar la adherencia entre el agregado y la pasta, se reducen la porosidad y la capacidad de transporte de la zona de interfase.

31.8.4 PERMEABILIDAD

La permeabilidad es una medida de la facilidad de pase de líquidos o gases a través del material. La permeabilidad se determina aplicando una carga y determinando la altura de penetración o el volumen de líquido o gas que pasan a través de la muestra. La permeabilidad es importante por dos razones: los parámetros obtenidos permiten conocer cuan rápidamente sustancias peligrosas pueden entrar al concreto y cuan fácilmente el material puede ser lavado del concreto.

La presencia de microsilíces en el concreto, al disminuir en forma significativa la porosidad de la pasta incrementan la impermeabilidad de la pasta y reducen en forma muy importante la posibilidad de ataques a la misma.

31.8.5 RESISTENCIA A LOS SULFATOS

Los concretos con microsilíce en un volumen de 15% en peso y una relación agua-cemento de 0.6, se comportan tan bien como las mezclas preparadas con cemento resistente a los sulfatos y relaciones agua-cemento de 0.45.

Los estudios efectuados en diversos países demuestran que las mezclas preparadas empleando microsilíce son más resistentes al ataque de sulfatos que aquellas preparadas empleando cementos especiales resistentes a los sulfatos.

El buen comportamiento de las mezclas con microsilíce en un ambiente con sulfatos puede ser atribuído a diversos factores, de los cuales los más importantes pueden ser:

- La refinada estructura de poros, lo que da lugar a una reducción en el paso de iones dañinos.
- El bajo contenido de hidróxido de calcio, que reduce la posibilidad de formación de yeso y, en consecuencia, de etringita.

31.8.6 CARBONATACION

Los resultados de volumen y velocidad de carbonatación son contradictorios. Algunos estudios sobre el efecto de las microsilíce sobre la carbonatación y transporte de oxígeno, cuando se las añade en un porcentaje del 20%, indican que éstas causan una ligera reducción de ambos procesos en concretos saturados de agua.

En síntesis, para resistencia dada del concreto por debajo de 40 Mp, la carbonatación es más alta en los concretos con microsilíce que en los concretos sin ella, correspondiendo a el incremento en la relación agua-cemento. Para concretos sobre los 40 Mp, que corresponden a bajos valores de la relación agua-cemento, sólo se observan pequeños cambios en la carbonatación.

Los concretos con microsilíce son preparados para usos especiales y tienen una relación agua-cemento baja. Ello da lugar a que los cambios en la carbonatación no sean normalmente peligrosos. Un procedimiento de curado adecuado es esencial para un óptimo comportamiento del concreto con microsilíce.

31.8.7 RESISTENCIA A LOS CLORUROS

La resistencia a los cloruros está normalmente considerada en términos en términos del cloruro que entra de la superficie del concreto. Ocasionalmente, sin embargo, el cloruro puede ser introducido en el concreto al tiempo del mezclado. Fuentes comunes son los acelerantes y los agregados marinos

pobremente limpiados. Así es de interés la habilidad del concreto para limitar la acción de los cloruros, además de su habilidad para evitar la penetración de los cloruros sean estos provenientes de agua de mar o de sales descongelantes.

En función de las microsílces se han efectuado estudios para determinar los efectos combinados de reducción de la permeabilidad y del pH en el agua en los poros, así como esos factores interactúan sobre la pasividad del acero embebido.

La ligera reducción en el pH causada por las microsílces, de la cual ya se ha hablado, deberá causar una reducción en la concentración de cloruros necesaria para destruir la capa pasiva e iniciar la corrosión. Este efecto es compensado por reducida velocidad de la difusión del cloruro debido a la adición de microsílce.

Los estudios del efecto de cloruros que ingresan a pasta de cemento de composición variada indican que hay un efecto muy significativo cuando se reemplaza cemento por microsílce, especialmente en relaciones agua-cemento altas, pro que también ocurre en los valores bajos.

Las microsílces trabajan de diversas formas para reducir el riesgo de corrosión. La mejora en las propiedades de permeabilidad de los concretos con microsílce permite reducir en forma importante la penetración de los cloruros en estructuras marinas y en aquellas expuestas a sales descongelantes. Estos concretos igualmente tendrán una alta resistividad eléctrica, disminuyendo en forma importante la velocidad con la que la corrosión puede ser iniciada.

31.8.8 RESISTENCIA ELECTRICA

Es esencial medir la resistencia eléctrica del concreto a fin de determinar la magnitud de una corrosión iniciada. Una alta resistencia del concreto indica que pequeña cantidad de corriente deberá fluir y la magnitud de la corrosión deberá ser pequeña. Si la resistencia es suficientemente alta, la velocidad de corrosión deberá ser igual a la pérdida de corriente del acero pasivo, esto es insignificante.

Las microsílces proporcionan un importante incremento en la resistencia eléctrica del concreto. Se asume que una resistencia de 300 á 600 couloms es suficiente para prevenir el progreso de la corrosión. Tal resistencia es aprovechada por los concretos con microsílces aún en condiciones muy húmedas.

31.8.9 MANCHADO DEL CONCRETO

Este problema ocurre principalmente cuando la superficie del concreto está sometida a contacto continuo con el agua o a procesos de humedecimiento y secado. El hidróxido de calcio es lavado hacia la superficie en la cual carbonata,

dando depósitos de polvo blanco los cuales tienden a afectar la superficie del concreto malogrando su apariencia.

Aunque fundamentalmente se trata de un problema de apariencia estética, un excesivo lavado dará por resultado un incremento en la porosidad y permeabilidad y debilitará el concreto. La adición de microsilíce deberá reducir la lechada debido a que una mejor estructura de poros da menos oportunidades para movimientos de humedad, así como al consumo del hidróxido de calcio por la microsilíce.

Igualmente los resultados indican que cuanto más largo y eficiente es el curado, antes de la exposición, más resistente será el concreto.

31.8.10 RESISTENCIA A LA CONGELACION

El propósito de la incorporación de aire al concreto es lograr un sistema de burbujas adecuado en el concreto endurecido. En el concreto fresco se requiere un sistema de aire estable, el cual permita procedimientos de colocación y compactación adecuados.

Se han efectuado estudios para determinar el efecto de las heladas en concretos a los cuales se ha adicionado microsilíce. Se ha encontrado que es difícil incorporar aire a una mezcla con microsilíce si no se utiliza un plastificante, pero el incremento en el dosaje del incorporador de aire y la adición de un plastificante pueden hacer fácil alcanzar el nivel de aire deseado en la mezcla.

En los concretos endurecidos, la presencia de microsilíce mejora el factor de espaciamiento y la estabilidad de las burbujas, sin variaciones en el contenido de aire. El procedimiento de curado y su duración tienen un efecto importante en estos resultados.

El uso combinado de microsilíces e incorporadores de aire es una buena opción. Las microsilíces dan muy baja permeabilidad, pero mantienen buena estabilidad del aire en el concreto fresco, con un espaciamiento uniforme de las burbujas de aire que proporciona una excelente protección contra las heladas. Los ensayos de largo plazo han mostrado una resistencia al descascaramiento por sales de los concretos con aire incorporado a los cuales se ha incorporado microsilíces, la cual es similar a la de los concretos ordinarios.

31.8.11 REACCION ALCALI-AGREGADOS

La consideración del efecto de las microsilíces en esta forma de ataque químico requiere atención de los tres principales factores que se requieren para que una posible reacción tenga lugar:

- Alto contenido de álcalis en la mezcla
- Agregados reactivos
- Disponibilidad de agua.

La microsilíce reacciona con los álcalis disponibles en el concreto fresco, formando silicatos alcalinos. Ello consume a los álcalis y previene los ataques sobre los agregados silíceos reactivos. Este mecanismo reduce el riesgo de una reacción álcali-sílice.

Adicionalmente, desde que las microsilíce contribuyen a reducir la permeabilidad, el volumen de agua disponible es menor. Los dos factores indicados se combinan para reducir la susceptibilidad de los concretos con microsilíce a la reacción alcali-agregados. Es más, las investigaciones tienden a confirmar que la presencia de microsilíce en el concreto eliminan los problemas que pueden presentarse por la reacción alcali-agregados indicada.

El tamaño mínimo y la reactividad puzolánica de las microsilíce proporciona una mejor estructura de poros del concreto, incrementando su impermeabilidad, por lo que menos agua está disponible para pasar a través del concreto. En la reacción álcali-sílice es la absorción de agua por el gel higroscópico la que causa la expansión dañina en el concreto.

31.8.12 RESUMEN

La mayor influencia de las microsilíce sobre la durabilidad química y fisico-química del concreto es sus grandes cambios en la permeabilidad del mismo. Para el agua, la reducción en la permeabilidad puede ser un factor entre 10 a 100 veces si se lo compara con los concretos de control.

Se ha demostrado que el deterioro de los concretos con microsilíce es menor y mucho más lento que el de los concretos sin ella en la mayoría de las formas de ataque. El incremento en la resistencia depende del diseño de la mezcla, el control de calidad y el curado del concreto. La negligencia en la ejecución de cualquiera de ellos puede dar por resultado un deterioro en la calidad.

32. ALMACENAMIENTO DE LOS ADITIVOS

32.1 GENERAL

Los aditivos y adiciones deberán almacenarse en obra de manera tal que se evite su deterioro o contaminación. No se utilizará aquellos que se encuentren en este estado.

Los procedimientos de almacenamiento de los diferentes materiales deberán aprobados por la Supervisión.

32.2 ALMACENAMIENTO

Los aditivos se almacenarán siguiendo las recomendaciones del fabricante. Se prevendrá la contaminación, evaporación o deterioro de los mismos. En el almacenamiento de los aditivos se tendrá en consideración los siguientes aspectos:

- a) Los aditivos líquidos serán protegidos de la congelación o cambios de temperatura que puedan afectar sus características.
- b) Deberá evitarse el sobrecalentamiento o la congelación de los aditivos durante su almacenamiento.
- c) Los aditivos no deberán ser almacenados por un período mayor de seis meses desde la fecha del último ensayo de aceptación, debiéndose evaluar su calidad antes de su empleo.
- d) Los aditivos en proceso de deterioro o contaminación, o aquellos con fecha de vencimiento cumplida no serán utilizados.

33. MUESTREO DE LOS ADITIVOS Y ADICIONES

33.1. DEFINICION DE MUESTRA

Los materiales varían de lote a lote y aún dentro de un lote. No siendo económico ensayar todos los elementos de un lote es necesario emplear muestras.

Una muestra es una pequeña porción representativa de un volumen mayor de un material sobre el cual se desea obtener información.

El muestreo es el procedimiento a seguir para obtener muestras. Las propiedades de la muestra son presentadas como representativas de las de la unidad mayor a la cual representa.

33.2 PROGRAMA DE MUESTREO

La elección de un Programa de Muestreo determinado dependerá de la ubicación del material y de la información que se desee obtener, ya sea valores promedio o variación dentro del lote que está siendo ensayado.

Modelos para un muestreo probabilístico se dan en la Norma ASTM E 105 «Recommended Practice for Probability Sampling of Materials»; en la Norma ASTM E 122 «Recommended Practice for Choice of Sample Size to Estimate the Average Quality of a Lot or Process»; y en la Norma ASTM E 141 «Recommended Practice for Acceptance of Evidence on the Results of Probability Sampling».

33.3 SIGNIFICADO DE LA VARIABILIDAD

Un conjunto de muestras pueden ser utilizadas para obtener información acerca de las propiedades promedio y del patrón de variación de dichas propiedades. El conocimiento del promedio de las propiedades y la variabilidad de las mismas puede ser importante en la toma de decisiones.

Si se tiene dos lotes de un material y una muestra de cada lote a la cual se efectúa análisis determinados, obteniéndose resultados iguales en cada caso, ello no significa que el conjunto de todo un lote o de ambos lotes tiene los mismos valores. Es evidente que se tendrá más confianza en las conclusiones si se dispone del resultado de diversas muestras, todas del mismo lote.

En conclusión, los resultados de ensayos sobre muestras deben ser considerados como valores promedio del material, pudiendo indicar la variabilidad en las propiedades. La decisión de aceptar o no un material puede basarse sobre los resultados de los ensayos, pudiendo una decisión razonable ser hecha únicamente si el muestreo ha sido correctamente efectuado y de acuerdo a un programa.

33.4 MUESTREO DE LOS ADITIVOS Y ADICIONES

Las especificaciones del Proyecto o la Supervisión determinarán la frecuencia de la toma de muestras.

33.4.1 ADITIVOS

La uniformidad y calidad de los aditivos se controlará cuando la Supervisión así lo determine o las especificaciones de obra lo indiquen.

Las muestras se tomarán al azar del lote en obra, deberán ser representativas del conjunto y se obtendrán en la planta de producción, de recipientes o paquetes no abiertos, o de lotes recién llegados a la obra, de acuerdo a las indicaciones del fabricante o las especificaciones de obra.

34 ENSAYO DE LOS ADITIVOS Y ADICIONES

34.1 RESPONSABILIDAD

La Supervisión tiene la autoridad para ordenar, en cualquier etapa de la ejecución del proyecto, ensayos de certificación de la calidad de cualquiera los aditivos o adiciones empleados. Los ensayos se efectuarán en un Laboratorio autorizado o seleccionado por la Supervisión.

El ensayo de los materiales se efectuará de acuerdo con los métodos que a continuación se indica. Los ensayos o los especímenes de ensayo deberán ser hechos de acuerdo a los requerimientos del método de ensayo elegido.

Los resultados de los ensayos se anotarán en el Registro anexo al Cuaderno de Obra, con copia a la Supervisión. Formarán parte de los documentos entregados al propietario con el Acta de Recepción de Obra.

34.2 ADITIVOS

Los aditivos se ensayarán por una o más de las cuatro razones siguientes:

- a) Determinar que cumplen con las especificaciones del proyecto; las recomendaciones del fabricante; y los requisitos de la Norma;
- b) Evaluar los efectos del aditivo sobre las propiedades de un concreto preparado con los materiales a ser utilizados, en condiciones ambientales dadas y bajo procedimientos de construcción determinados;
- c) Determinar la uniformidad del producto; y
- d) Confirmar que un lote tiene las mismas características que los anteriores.

El fabricante debe emplear procedimientos de control de calidad que permitan garantizar que el aditivo cumple con la uniformidad y otros requisitos de las recomendaciones ASTM. Debe recordarse que los métodos de ensayo que pueden aplicarse para un aditivo determinado no necesariamente son de aplicación general para aditivos del mismo tipo pero de otras marcas.

El empleo continuo de aditivos en la producción del concreto debe ser precedido por ensayos que permitan observación y medida del comportamiento de los aditivos químicos bajo condiciones de operación en planta cuando son utilizados conjuntamente con los materiales seleccionados.

Debe recordarse que en el control de los aditivos, la uniformidad de los resultados es tan importante como el promedio de éstos en relación con cada propiedad de los aditivos o del concreto.

Cuando ello es exigido por la Inspección o las especificaciones de obra, el aditivo deberá ser ensayado en un laboratorio para certificar que cumple con los requisitos de las especificaciones ASTM u otras aplicables al control de calidad.