

# Materiales. Calidad del Hormigón

## CAPÍTULO 3 –MATERIALES

### ACTUALIZACIÓN PARA EL CÓDIGO 2002

1. En la edición 2002 del Código se reconoce por primera vez la norma ASTM C 1157 (*Performance Specification for Blended Hydraulic Cement*), la cual enfatiza el comportamiento de los diferentes tipos de cemento y no su composición química.
2. La norma ASTM A 996 (*Specification for Rail-Steel and Axle Steel Deformed Bars for Concrete Reinforcement*) reemplaza a las normas ASTM A 616 y ASTM A 617 correspondientes al acero de riel y de eje, respectivamente.

### 3.1 ENSAYO DE LOS MATERIALES

Los requisitos del artículo 3.1.3 (y también del 1.3.4) exigen que el ingeniero o arquitecto responsable de la inspección mantenga registros completos de los resultados de los ensayos realizados disponibles durante la etapa constructiva. Los requisitos de 3.1.3 también exigen que el inspector conserve los registros de los ensayos de los materiales y el hormigón durante un período mínimo de dos años después de finalizado un proyecto, o durante un período aún más prolongado si así lo establece el código de construcción legalmente adoptado. El objetivo de conservar los registros de los ensayos realizados hasta dos años después de finalizado un proyecto es asegurar que los registros estarán disponibles si surge alguna disputa o diferencia referidas a la calidad del hormigón o de los materiales utilizados, o relacionadas con cualquier violación de los planos y la documentación técnica aprobada o del código de construcción, luego de la aceptación de la obra por parte del propietario o de la emisión de un certificado de finalización de obra.

Este requisito existe porque los ingenieros y arquitectos habitualmente no inspeccionan hormigón, ya que para este propósito habitualmente se contrata un inspector. El término "inspector" se define en el artículo 1.3.1. En gran parte de Estados Unidos el término "inspector" coincide con el término "inspector especial," según la definición dada en los códigos de construcción legalmente vigentes. Si no se contrata un inspector especial será necesario tomar otras medidas para asegurar la disponibilidad y conservación de los registros de los ensayos.

### 3.2 CEMENTOS

El cemento utilizado en obra debe corresponder con aquél que se utilizó para determinar la dosificación del hormigón y su resistencia y demás propiedades. Esto simplemente puede significar el uso del mismo tipo de cemento, o bien puede significar el uso de un cemento de la misma procedencia. Si en una planta se determina la desviación estándar en base a ensayos realizados sobre cementos de diferentes procedencias, alcanza con utilizar el mismo tipo de cemento; si la

desviación estándar de los ensayos de resistencia usados para establecer la resistencia requerida se basan en un tipo particular de cemento con una procedencia determinada, será necesario usar un cemento de la misma procedencia.

ACI 318-02 reconoce por primera vez la norma ASTM C 1157 (*Performance Specification for Blended Hydraulic Cement*). La norma ASTM C 1157 no establece la composición química de los diferentes tipos de cementos como lo hacen las normas ASTM C 150 y ASTM C 595. Sin embargo, los componentes individuales usados para fabricar los cementos ASTM C 1157 deben satisfacer los requisitos especificados en dicha norma. La norma también contiene varios requisitos opcionales, incluyendo uno para los cementos resistentes a la reacción álcali-agregado.

El hormigón de contracción compensada, elaborado con cemento expansivo, minimiza el potencial de formación de fisuras de contracción por secado. El cemento expansivo se expande ligeramente al comienzo de la etapa de endurecimiento, después del fraguado inicial. Si esta expansión es restringida por la presencia de armaduras, el hormigón de cemento expansivo también se puede utilizar para (1) compensar la disminución de volumen que provoca la contracción por secado, (2) inducir tensiones de tracción en las armaduras (postesado), y (3) estabilizar las dimensiones a largo plazo de las estructuras postesadas. La mayor ventaja de utilizar cemento expansivo radica en el control y la reducción de las fisuras de contracción por secado.

La dosificación de una mezcla de hormigón cobra particular importancia cuando se utiliza cemento expansivo en combinación con otros aditivos. Los beneficios que representa el uso de un cemento expansivo pueden ser anulados o contrarrestados cuando se utilizan ciertos aditivos o ingredientes. La Sección 3.6.8 advierte sobre esta situación. Se deberían preparar mezclas con el cemento expansivo, los aditivos y otros ingredientes seleccionados para observar cómo estos últimos afectan las propiedades del hormigón fresco y endurecido.

Además, cuando se especifica un hormigón de cemento expansivo, el profesional debe considerar ciertos aspectos del diseño que se podrían ver afectados. Las secciones del Código que tratan estas consideraciones de diseño incluyen:

- Sección 8.2.4 – Además de todos los demás efectos listados, se deben considerar los efectos de los esfuerzos debidos a la expansión del hormigón de contracción compensada.
- Sección 9.2.7 – Los efectos estructurales debidos a la expansión del hormigón de contracción compensada se deben incluir en el valor de T incluido en las combinaciones de cargas de la Ecuación (9-2).

### **3.3 AGREGADOS**

El tamaño máximo nominal del agregado se limita a (i) un quinto de la menor dimensión lineal entre los lados de los encofrados, (ii) un tercio del espesor de una losa, y (iii) tres cuartos de la separación libre mínima entre las barras de armadura o entre los tendones o vainas de pretensado. Estos límites impuestos al tamaño máximo nominal del agregado se pueden obviar si la trabajabilidad y los métodos de compactación del hormigón permiten colocar el hormigón sin que se formen oquedades o vacíos. El ingeniero deberá decidir si puede obviar o no estas limitaciones.

### **3.4 AGUA**

El agua usada para preparar hormigón armado (pretensado o no pretensado), hormigón en el cual se han empotrar elementos de aluminio y hormigón que se ha de colocar en encofrados perdidos de metal galvanizado no deben contener cantidades perjudiciales de cloruros. El principal problema que se presenta cuando el agua de mezclado tiene un elevado contenido de cloruros es su posible efecto sobre la corrosión de la armadura o los tendones de pretensado. La Tabla 4.4.1 del Capítulo 4 del Código indica los contenidos máximos de cloruros que pueden aportar los ingredientes, incluyendo el agua, los agregados, el cemento y los aditivos. La Referencia 2.1 presenta una discusión detallada de este y otros temas cubiertos por los Capítulos 3 a 5 del Código.

En general, el agua que contiene menos de 2000 partes por millón (ppm) de sólidos disueltos totales se considera satisfactoria para la elaboración de hormigón. El agua que contiene más de 2000 ppm de sólidos disueltos se debe someter a ensayos para determinar su efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado del hormigón que con ella se elabora. El agua

de mar no es adecuada para elaborar hormigones armados con elementos de acero, ya que aumenta el riesgo de corrosión de las armaduras. Esta corrosión se acelera si el elemento está ubicado en un ambiente cálido y húmedo.

### **3.5 ARMADURAS**

#### **3.5.2 Soldadura de las armaduras**

ACI 318-02 hace referencia a la última edición de la norma ANSI/AWS D1.4-2000 (*Structural Welding Code for Reinforcing Steel*). Todas las soldaduras de las barras de armadura deben satisfacer estrictamente los requisitos de D1.4. Vale la pena destacar algunas revisiones recientes introducidas en D1.4. Por ejemplo, se deben considerar los requisitos de precalentamiento de las barras de acero de palanquilla (A 615) si no se conoce la composición química de las barras. Ver la discusión sobre el artículo 12.14.3 en el Capítulo 4 de este documento.

El ingeniero debe prestar particular atención a las limitaciones indicadas en el artículo 21.2.7 para las soldaduras de las armaduras de los elementos estructurales resistentes a esfuerzos sísmicos que forman parte de una estructura ubicada en una región de peligrosidad sísmica elevada. Debido a que bajo los efectos de un movimiento sísmico severo estos elementos estructurales pueden resistir más allá del rango de respuesta elástica, la soldadura de las armaduras, particularmente los empalmes soldados, se deben realizar siguiendo estrictamente los procedimientos establecidos en ANSI/AWS D1.4. Estos procedimientos incluyen inspecciones adecuadas.

La Sección R3.5.2 contiene lineamientos para la soldadura a barras existentes (para las cuales no existen informes de los ensayos realizados en planta) y para la soldadura en obra del alambre estirado en frío y las mallas de alambre soldadas. El alambre estirado en frío se utiliza como armadura en espiral; algunas veces puede ser necesario soldar en obra alambres o mallas de alambre soldadas. Hay que ser sumamente cuidadoso al soldar alambres estirados en frío para evitar la pérdida de tensión de fluencia y ductilidad. La soldadura eléctrica, de acuerdo con las normas ASTM A 185 y A 497, es un procedimiento de soldadura aceptable utilizado en la fabricación de las mallas de alambres de acero soldadas. Si en lugar de los empalmes por yuxtaposición requeridos se utilizan empalmes soldados, se debe especificar la realización de ensayos de tracción sobre muestras representativas u otros métodos para determinar que el nivel de resistencia provisto sea adecuado. No está permitido utilizar soldaduras como método de fijación de las barras de armadura que se entrecruzan durante el proceso de armado de la estructura, a menos que el ingeniero lo autorice expresamente (ver 7.5.4).

El último párrafo de R3.5.2 indica que la norma ANSI/AWS D1.4 no es aplicable a la soldadura de alambres. En la actualidad el campo de validez de esta norma abarca la soldadura de todos los tipos de armadura de acero, pero adolece de cierta información crítica referida a los alambres y mallas de alambre soldadas (por ejemplo, no discute el precalentamiento ni la selección de los electrodos). Sin embargo, se recomienda que todas las soldaduras de alambres y mallas de alambre soldadas realizadas en obra se ajusten a los requisitos aplicables de ANSI/AWS D1.4, entre ellos los referidos a la certificación de los soldadores, procedimientos de inspección y demás procedimientos de soldadura aplicables.

#### **3.5.3 Armadura conformada**

Como armadura no pretensada solamente se permite utilizar armadura conformada según la definición dada en el Capítulo 2, excepto que para las armaduras en espiral se pueden utilizar barras o alambres lisos. La definición de armadura conformada especificada en el Código abarca las mallas soldadas de alambres lisos. El tipo de armadura más utilizado en la construcción son las barras laminadas conforme a las especificaciones de ASTM A 615 (acero de palanquilla). En la edición 2002 de ACI 318 la norma ASTM A 996 (*Specification for Rail-Steel and Axle-Steel Deformed Bars for Concrete Reinforcement*) ha reemplazado a las normas para acero de riel y de eje (ASTM A 616 y ASTM A 617, respectivamente). Las barras de acero de acuerdo con ASTM A 996 se denominan barras de acero Tipo R, y deben satisfacer requisitos más estrictos en los ensayos de doblado que los requeridos por ASTM A 616 y ASTM A 617. Las armaduras conformadas que satisfacen los requisitos de la norma ASTM A 996 están marcadas con la letra R. El acero de riel (ASTM A 996) no se consigue fácilmente, salvo en determinadas regiones del país.

La norma ASTM A 706 corresponde a las barras conformadas de acero de baja aleación (solamente Grado 60) para aplicaciones especiales en las cuales la soldadura o el doblado son factores importantes. Se deben especificar barras ASTM A 706 siempre que se requiera una gran cantidad de soldaduras o que las soldaduras resulten críticas, y también para las estructuras de hormigón armado ubicadas en regiones de peligrosidad sísmica elevada para las cuales se requieren una

ductilidad controlada y un mejor comportamiento en doblado. Los requisitos especiales para el diseño sismorresistente del Capítulo 21 establecen que las armaduras que deben resistir esfuerzos axiales y de flexión inducidos por acciones sísmicas usadas en elementos de pórticos y tabiques de borde que forman parte de una estructura ubicada en una región de peligrosidad sísmica elevada deben satisfacer la norma ASTM A 706 (ver 21.2.5). Para estos elementos también se permite utilizar barras ASTM A 615 Grados 40 y 60 siempre y cuando (a) la relación entre la resistencia última a la tracción real y la tensión de fluencia real no sea menor que 1,25 y (b) la tensión de fluencia real determinada en base a ensayos en planta no supere la tensión de fluencia especificada en más de 18.000 psi (en la repetición de los ensayos no se permite que supere la tensión de fluencia especificada en más de 3000 psi).

Antes de especificar el uso de armadura A 706 el diseñador debe investigar su disponibilidad. La mayoría de los fabricantes de armaduras pueden producir barras A 706, pero generalmente no estarán dispuestos a fabricar una cantidad menor que la correspondiente a una hornada de acero para cada tamaño de barra solicitado. Dependiendo del fabricante, una hornada de acero puede variar entre 50 y 200 toneladas. Puede que no sea posible conseguir inmediatamente, de un solo fabricante, cantidades menores de barras A 706 de un único tamaño. Sorprendentemente, cada día es más habitual que los ingenieros especifiquen barras A 706 para las estructuras de hormigón armado ubicadas en las regiones de elevada peligrosidad sísmica (ver Tabla 1-1, Capítulo 1 de este documento). Los ingenieros no sólo las están especificando para los elementos de los edificios sismorresistentes, sino también para las estructuras de los puentes de hormigón armado. Además, hace mucho tiempo que las barras A 706 son las preferidas por los productores de elementos de hormigón prefabricado, ya que son más sencillas de soldar y más eficientes desde el punto de vista de los costos, especialmente en vista de los complicados detalles de armado que requieren los elementos prefabricados. Seguramente su uso creciente tendrá un impacto favorable sobre la disponibilidad de estas barras.

La Sección 9.4 indica que la tensión de fluencia máxima de la armadura a utilizar en el diseño debe ser menor o igual que 80.000 psi. Actualmente no existe ninguna especificación ASTM para la armadura de Grado 80. Sin embargo, la especificación ASTM A 615 incluye las barras conformadas No. 11, No. 14 y No. 18 con una tensión de fluencia de 75.000 psi (Grado 75). Los requisitos de la especificación A 615 para las barras Grado 75 son compatibles con los requisitos del Código ACI, incluyendo el requisito que establece que la tensión de fluencia debe corresponder a una deformación del 0,35 por ciento (ver 3.5.3.2). El diseñador puede simplemente especificar barras Grado 75 que satisfagan A 615 sin ningún requisito especial, o bien puede especificar excepciones. Si se utilizan barras Grado 75 se deben solicitar al fabricante informes de ensayos realizados en planta. Antes de especificar el uso de barras Grado 75 se debería investigar su disponibilidad local. La intención de la mayor tensión de fluencia de las barras No. 11, No. 14 y No. 18 es fundamentalmente que estas barras se utilicen como armadura de las columnas. Se utilizan en combinación con un hormigón de mayor resistencia para reducir las dimensiones de las columnas de los edificios en altura y en otras aplicaciones que requieren columnas de alta capacidad. El alambre usado para fabricar mallas soldadas de alambres lisos o conformados pueden tener una tensión de fluencia superior a 60.000 psi. Se permite aprovechar la ventaja de la mayor tensión de fluencia siempre que la tensión de fluencia especificada,  $f_y$ , usada en el diseño sea la tensión correspondiente a una deformación del 0,35 por ciento.

Durante los primeros meses de 1997 algunos fabricantes de barras anunciaron que comenzarían la producción de barras designadas con sus dimensiones métricas equivalentes (conversión "soft metric"\*). En general su intención era convertir sus fábricas completamente a la producción de barras métricas, y algunos productores anticipaban completar esta conversión a mediados de 1997. Una vez que se complete esta conversión se anticipa que se dejarán de producir barras designadas en el sistema pulgada-libra.

Las dimensiones físicas (es decir, el diámetro, la altura y la separación de las conformaciones) de las barras métricas ("soft-metric") no difieren de las de las barras pulgada-libra que se han fabricado durante muchos años. La única diferencia será que la marca que se imprimirá a las barras se basará en unidades del sistema métrico (SI). Las dimensiones de las barras en sistema métrico se obtienen de convertir el diámetro de las barras en pulgada-libra a milímetros, y redondear al milímetro más próximo. Por ejemplo, una barra No. 4 o de 1/2 in. de diámetro se convierte en una barra No. 13, ya que su diámetro es igual a 12,7 mm. La Tabla 2-1 contiene un listado completo de todos los tamaños de barras cubiertos por las especificaciones ASTM.

---

\* El sistema de conversión "soft metric" consiste simplemente en asignarle a los productos las dimensiones métricas equivalentes, sin realizar ningún cambio físico en las dimensiones de los productos. El sistema de conversión "hard metric" implica redimensionar los productos para fabricarlos en nuevos tamaños, métricos y racionales.

Las especificaciones ASTM A 615, A 706 y A 996 contienen requisitos para barras tanto en unidades pulgada-pie como en unidades métricas (SI). Es por ello que estas especificaciones tienen denominaciones dobles (por ejemplo, ASTM A 706/A 706M). Cada una de las especificaciones contiene criterios para uno o más grados de acero, los cuales se resumen en la Tabla 2-2.

*Tabla 2-1 – Tamaños de las barras en unidades pulgada-pie y convertidas al sistema métrico*

Pulgada-libra		Métrico	
No.	Diámetro (in.)	No.	Diámetro (mm)
3	0,375	10	9,5
4	0,500	13	12,7
5	0,625	16	15,9
6	0,750	19	19,1
7	0,875	22	22,2
8	1,000	25	25,4
9	1,128	29	28,7
10	1,270	32	32,3
11	1,410	36	35,8
14	1,693	43	43,0
18	2,257	57	57,3

*Tabla 2-2 – Especificaciones ASTM – Grado y tensión mínima de fluencia*

Especificación ASTM	Grado / Tensión mínima de fluencia	
	Pulgada-libra (psi)	Métrico (MPa)
A 615 y A 615M	40/40.000	300/300
	60/60.000	420/420
	75/75.000	520/520
A 616 y A 616M	50/50.000	350/350
	60/60.000	420/420
A 617 y A 617M	40/40.000	300/300
	60/60.000	420/420
A 706 / A 706M	60/60.000	520/520

La tensión de fluencia mínima requerida para el acero usado para fabricar las barras varía ligeramente en las especificaciones ASTM correspondientes a las barras especificadas en el sistema métrico. Por ejemplo, las últimas ediciones de las especificaciones ASTM indican tensiones de fluencia mínimas correspondientes al acero de Grado 420, o 420 megapascuales (MPa), lo que corresponde a aproximadamente 60.900 psi (1000 psi = 6895 MPa). La típica conversión "soft" aplicada a la tensión de fluencia del acero Grado 60 (60.000 psi) daría por resultado una tensión de fluencia métrica de 413,8 MPa. Actualmente la industria del acero está intentando "rebajar" la tensión de fluencia mínima a 415 MPa, o aproximadamente 60.200 psi para lograr una mejor concordancia con la resistencia utilizada en el sistema pulgada-libra, la cual es igual a 60.000 psi.

Si el diseño y la construcción se realizan de acuerdo con el Código ACI 318 usando las unidades tradicionales del sistema pulgada-libra, el uso de barras designadas con el sistema métrico tendrá muy poca influencia sobre la resistencia de diseño o

la capacidad de carga admisible de los elementos. Por ejemplo, cuando la resistencia de diseño de un elemento depende de la tensión de fluencia especificada del acero,  $f_y$ , el uso de las barras métricas aumenta la resistencia aproximadamente un 1,5% [(420 – 413,7) / 413,7].

**3.5.3.5 - 3.5.3.6 – Mallas de alambre soldadas** – Algunos han cuestionado la práctica de utilizar mallas de alambre soldadas como armadura estructural de los elementos de hormigón armado, particularmente cuando se especifica a modo de alternativa al uso de barras de armadura tradicionales. Un caso habitual se presenta durante la etapa constructiva, cuando se ordena reemplazar las barras inicialmente especificadas en los planos de obra por mallas de alambre soldadas. Es probable que estos cuestionamientos hayan surgido debido a la terminología que la industria utiliza para las mallas de alambre soldadas utilizadas como armadura "no estructural," es decir para limitar los anchos de fisura en las losas construidas a nivel del plano de fundación. Este tipo de mallas de alambre soldadas habitualmente se conocen como "mallas no estructurales."

Los tamaños de los alambres usados para fabricar mallas soldadas varían entre W1.4 y W4. El alambre liso se designa con la letra "W" seguida de un número que indica el área de su sección transversal expresada en centésimas de una pulgada cuadrada. Los tipos de mallas utilizadas para limitar el ancho de las fisuras en las losas a nivel del plano de fundación en edificios residenciales e industriales livianos son  $6 \times 6$  W1.4  $\times$  W1.4,  $6 \times 6$  W2  $\times$  W2,  $6 \times 6$  W2.9  $\times$  W2.9, y  $6 \times 6$  W4  $\times$  W4. Estas mallas de alambre soldadas pesan 0,21 lb; 0,30 lb; 0,42 lb y 0,55 lb por pie cuadrado, respectivamente, y por lo general se fabrican en rollos. Habitualmente estas "mallas no estructurales" fabricadas con alambres de menor diámetro no se utilizan como una alternativa a las barras convencionales. La malla de alambre soldada que se utiliza como armadura estructural típicamente se fabrica de alambres de tamaño mayor que los W4, y se conoce como "malla estructural."

Es posible que por motivos económicos sea necesario reemplazar las barras de armadura por mallas de alambre soldadas. Cualquiera sea la razón que origina el reemplazo, ambos tipos de armadura (mallas de alambre soldadas o barras) son igualmente reconocidos y permitidos por el código para su uso estructural. La definición de armadura conformada del Código abarca tanto las mallas soldadas de alambres conformados como las de alambres lisos. Las mallas soldadas de alambres conformados utilizan tanto la deformación de los alambres como las intersecciones soldadas para la adherencia y el anclaje. (Los alambres conformados se designan con la letra "D" seguida de un número que indica el área de su sección transversal expresada en centésimas de una pulgada cuadrada.) Las mallas soldadas de alambres lisos se adhieren al hormigón por medio de un anclaje mecánico en los puntos donde se intersecan los alambres. Esta diferencia en la adherencia y el anclaje de las mallas de alambres lisos y las mallas de alambres conformados se refleja en los requisitos sobre longitud de anclaje de los empalmes por yuxtaposición del Capítulo 12.

**3.5.3.7 – Armaduras revestidas** – El Código incluye referencias a las especificaciones ASTM correspondientes a armaduras revestidas, A 765 (galvanizadas) y A 775 (con revestimiento epoxi), y esto refleja el uso creciente de las barras revestidas. Se consiguen mallas de alambres soldadas con revestimiento epoxi (ASTM A 884), con los alambres galvanizados antes de su soldadura (ASTM A 641) y con los alambres galvanizados una vez soldados (ASTM A 123). Las barras y mallas revestidas más utilizadas son aquellas con revestimiento de resina epoxi, usado para proteger las armaduras contra la corrosión. Las armaduras con revestimiento epoxi constituyen un sistema viable de protección contra la corrosión. En los últimos años el uso de armaduras con revestimiento epoxi se ha extendido a diferentes tipos de construcciones de hormigón, como por ejemplo a las losas expuestas a las sales anticongelantes, las plantas de tratamiento de aguas residuales, las estructuras marítimas y otras instalaciones ubicadas próximas a zonas costeras donde el riesgo de corrosión es mayor debido a la exposición al agua salada, en especial cuando el clima es cálido y húmedo.

Los diseñadores que especifican el uso de barras con revestimiento epoxi deben explicitar claramente en las especificaciones técnicas los accesorios y métodos de manipulación especiales requeridos para minimizar los daños sufridos por el revestimiento durante las operaciones de manipuleo, transporte y colocación de las barras o durante la colocación del hormigón.<sup>2,3,2.4</sup> Los accesorios y métodos de manipuleo especiales incluyen:

1. Se deben utilizar cuerdas de izamiento de nylon o sogas acolchadas.
2. Se deben utilizar barras separadoras para izar los paquetes de barras, o izar los paquetes tomándolos por los puntos correspondientes a un tercio de su longitud utilizando sogas acolchadas. Las bandas utilizadas para unir los paquetes de barras deben ser de nylon o estar acolchadas.
3. Las barras revestidas se deben almacenar sobre superficies acolchadas o de madera.

4. Las barras revestidas no se deben arrastrar sobre el suelo ni sobre otras barras.
5. Se debe minimizar el tránsito sobre las barras revestidas, y no dejar caer sobre ellas herramientas u otros materiales de construcción durante o después de su colocación.
6. Se deben utilizar apoyos de materiales orgánicos o apoyos recubiertos con materiales orgánicos como resina epoxi o vinilo compatibles con el hormigón.
7. Las barras revestidas se deben atar usando alambres con revestimiento epoxi o plástico para minimizar los daños al revestimiento.
8. Los equipos de transporte y colocación del hormigón se deben operar cuidadosamente para evitar dañar el revestimiento de las barras.

Las especificaciones técnicas también deberían tratar el tema del retoque del revestimiento epoxi una vez que las barras han sido colocadas. La norma ASTM A 775 y la Referencia 2.3 indican el nivel de daño admisible para los revestimientos de las barras. La Referencia 2.4 sugiere requisitos a incluir en las especificaciones técnicas relacionados con las barras de armadura con revestimiento epoxi.

Los diseñadores deben tener en cuenta que las armaduras revestidas con epoxi requieren mayores longitudes de anclaje y empalme en tracción (ver 12.2.4.3).

### **3.6 ADITIVOS**

#### **3.6.1 Vapor de sílice**

El vapor de sílice (ASTM A 1240) se denomina así porque se extrae de los vapores de los hornos eléctricos usados para producir metal ferrosilíceo o sílice. Estos vapores se recogen y preparan en forma de microsílíce sólida finamente dividida, la cual se utiliza como aditivo para el hormigón. Usando vapor de sílice juntamente con aditivos reductores del agua de alto rango se pueden producir hormigones con resistencias a la compresión de 20.000 psi (138 MPa) o superiores. También se usa para producir una matriz de pasta celular muy densa que reduce la permeabilidad del hormigón. Se logra así una mejor protección contra la corrosión de las armaduras, especialmente cuando el hormigón ha de estar expuesto a la aplicación directa o indirecta a productos químicos anticongelantes, como en el caso de los tableros de puentes o las losas de los edificios para estacionamiento de vehículos.

La dosificación de las mezclas, los métodos de elaboración (mezclado y manipuleo) y los procedimientos de colocación y curado del hormigón con vapor de sílice exigen un mayor grado de control de calidad que los hormigones convencionales. Cuando se especifican hormigones con vapor de sílice es de fundamental importancia que el ingeniero, el proveedor de hormigón y el contratista trabajen de manera conjunta para asegurar un nivel de calidad consistente.

Observar que, dependiendo de la proporción de vapor de sílice, estos hormigones pueden ser casi negros, gris oscuro, o mantener el color del cemento. El cambio de color más importante se produce en los hormigones fabricados con cementos de color claro. La dosificación de la mezcla también puede afectar el color del hormigón. Si la diferencia de color constituye un problema (caso del hormigón arquitectónico) se debería utilizar el cemento más oscuro disponible, y durante el proceso de diseño de la mezcla se deberían preparar varias mezclas de prueba.

## **CAPÍTULO 4 – REQUISITOS DE DURABILIDAD**

### **ACTUALIZACIÓN PARA EL CÓDIGO 2002**

Se ha agregado una nota al pie en las Tablas 4.2.2 y 4.3.1 referida a la durabilidad de las estructuras expuestas a sulfatos o sometidas a otras condiciones de exposición especiales. En estas situaciones se debe utilizar la menor de las relaciones agua-material cementicio aplicables, y la mayor de las  $f_c$  mínimas aplicables. La Tabla 4.2.2 se ocupa de los requisitos para

condiciones de exposición especiales; la Tabla 4.3.1 cubre los requisitos para hormigones expuestos a soluciones que contienen sulfatos.

## **CONSIDERACIONES GENERALES**

Las condiciones de exposición especiales cubiertas por el Código se encuentran en el Capítulo 4 – Requisitos de Durabilidad; allí se enfatiza la importancia de la influencia de las condiciones de exposición sobre la durabilidad del hormigón. Los requisitos para la dosificación del hormigón y la evaluación de su resistencia se encuentran en el Capítulo 5 – Calidad, Mezclado y Colocación del Hormigón. Como se establece en el artículo 5.1.1, la dosificación del hormigón se debe establecer de manera de (a) proveer la resistencia a las exposiciones especiales según lo requerido por el Capítulo 4, y (b) satisfacer los requisitos de resistencia del Capítulo 5.

La resistencia a las exposiciones especiales se trata en las Secciones 4.2 – Exposición a temperaturas de congelamiento y deshielo, 4.3 – Exposición a sulfatos, y 4.4 – Protección contra la corrosión de las armaduras. Los requisitos de resistencia se tratan en la Sección 5.6 – Evaluación y conformidad del hormigón. Dependiendo de los requisitos de diseño y de las condiciones de exposición, se deberá especificar la menor de las relaciones agua-material cementicio requeridas ya sea por los requisitos de diseño estructural o bien por las condiciones de exposición de la estructura (ver Ejemplo 2.1).

La observación de deterioros inaceptables en algunas estructuras de hormigón ubicadas en regiones expuestas a temperaturas de congelamiento y deshielo, a sales anticongelantes utilizadas para retirar la nieve y el hielo, a los sulfatos presentes en el agua y el suelo o a los cloruros, han resaltado la necesidad de contar con requisitos especiales para estos tipos de exposición. El Capítulo 4 señala la necesidad de considerar la durabilidad del hormigón, y no sólo su resistencia.

Dentro del contexto del Código, el término durabilidad se refiere a la capacidad del hormigón para resistir los deterioros provocados por el medio ambiente o por las condiciones de servicio para las cuales se lo utiliza. El hormigón correctamente diseñado y construido debe ser capaz de satisfacer la función para la cual fue pensado sin sufrir deterioros importantes durante su vida útil. Sin embargo, el Código no contiene requisitos específicos para condiciones de exposición particularmente severas, como por ejemplo el caso de los hormigones expuestos a ácidos o a temperaturas extremadamente elevadas, y tampoco se ocupa de consideraciones estéticas tales como los acabados superficiales. Estos aspectos, que no están comprendidos dentro del alcance del Código, se deben tratar específicamente en la especificaciones técnicas del proyecto. Los ingredientes y la dosificación del hormigón se deben seleccionar de manera tal de satisfacer los requisitos mínimos establecidos en el Código y los requisitos adicionales indicados en la documentación técnica.

Además de una correcta selección del cemento, una adecuada incorporación de aire, una relación agua-material cementicio adecuada y la limitación del contenido máximo de cloruros de los materiales, otros requisitos fundamentales para la durabilidad de un hormigón expuesto a condiciones ambientales adversas incluyen: usar hormigones de bajo asentamiento, compactar el hormigón adecuadamente, lograr materiales uniformes, usar recubrimiento adecuados de hormigón sobre las armaduras, y aplicar un procedimiento de curado húmedo que permita desarrollar las propiedades del hormigón.

### **4.1 RELACIÓN AGUA-MATERIAL CEMENTICIO**

A partir de la edición 1989 del Código, el parámetro que anteriormente se denominaba "relación agua-cemento" ha pasado a llamarse "relación agua-material cementicio." Esto se debe al reconocimiento de los demás materiales cementicios permitidos por el código para satisfacer las limitaciones de w/c relacionadas con la durabilidad del hormigón. Habitualmente la notación "w/c" se utiliza para indicar la "relación agua-material cementicio." La definición de "material cementicio" (ver Capítulo 2) permite utilizar materiales cementicios diferentes al cemento pórtland y los cementos hidráulicos para satisfacer los límites de w/c codificados. De acuerdo con el Código, para calcular las relaciones w/c el "material cementicio" puede incluir:

- Cemento pórtland (ASTM C 150)
- Cemento hidráulico mezclado (ASTM C 595 y ASTM C 1157)
- Cemento hidráulico expansivo (ASTM C 845)

ya sea utilizados solos o combinados con:

- Ceniza fina o volante (ASTM C 618)
- Puzolanas naturales crudas o calcinadas (ASTM C 618)
- Escoria granulada de alto horno (ASTM C 989)
- Vapor de sílice (ASTM C 1240)

## 4.2 EXPOSICIÓN A TEMPERATURAS DE CONGELAMIENTO Y DESHIELO

El hormigón de las estructuras que estarán expuestas a temperaturas de congelamiento y deshielo o a sales anticongelantes debe contener un volumen mínimo de aire intencionalmente incorporado, el cual varía según la exposición sea severa o moderada como se indica en la Tabla 4.2.1. Las especificaciones técnicas del proyecto deberían exigir que el contenido de aire del hormigón entregado en obra no difiera de los valores meta indicados en la Tabla 4.2.1 en  $\pm 1,5$  puntos porcentuales. Son condiciones de exposición severas aquellas en las cuales el hormigón puede estar permanentemente expuesto a temperaturas de congelamiento y deshielo o aquellas en las cuales se utilizan sales anticongelantes. Los ejemplos incluyen los pavimentos, los tableros de puentes, las aceras y las losas de los edificios para estacionamiento de vehículos. Cuando las condiciones de exposición son severas el Código también impone un límite máximo para la relación  $w/c$  y  $f'_c$  mínima (ver 4.4.2). Son condiciones de exposición moderadas aquellas correspondientes a un clima frío donde el hormigón puede estar expuesto a temperaturas de congelamiento, pero sólo ocasionalmente estará expuesto a condiciones de humedad antes de congelarse, y donde no se utilizan sales anticongelantes. Los ejemplos incluyen ciertos tabiques, vigas y losas exteriores que no están en contacto directo con el suelo.

Incorporando intencionalmente aire al hormigón se mejora significativamente la resistencia al congelamiento del hormigón endurecido expuesto al agua o a las sales anticongelantes. Un hormigón seco o que contiene apenas una pequeña cantidad de humedad no se ve afectado aunque el número de ciclos de congelamiento y deshielo sea elevado. La incorporación de aire también mejora la resistencia a los sulfatos.

La incorporación de aire se puede lograr agregando un aditivo incorporador de aire a la mezcla, usando cemento incorporador de aire, o combinando ambos métodos. Los aditivos incorporadores de aire, los cuales se agregan en la mezcladora, deben satisfacer los requisitos de ASTM C 260 (3.6.4); los cementos incorporadores de aire deben satisfacer las especificaciones de ASTM C 150 y C 595 (3.2.1). Los cementos incorporadores de aire pueden ser difíciles de conseguir mientras que, por el contrario, la popularidad de los aditivos incorporadores de aire viene en aumento. La norma ASTM C 94 (*Standard Specifications for Ready Mixed Concrete*), la cual el Código ACI incorpora por referencia (5.8.2) exige la realización de ensayos para determinar el contenido de aire del hormigón. La frecuencia de estos ensayos es la misma requerida para la evaluación de la resistencia. Las muestras de hormigón se deben obtener según los requisitos de ASTM C 172, y se deben ensayar de acuerdo con ASTM C 173 o C 231.

Otra propiedad que mejora significativamente la resistencia del hormigón a los ciclos de congelamiento y deshielo es el uso de una baja relación agua-material cementicio. Los hormigones de peso normal que estarán expuestos a condiciones de congelamiento y deshielo en estado húmedo y a las sales anticongelantes se deben dosificar de manera de satisfacer tanto la máxima relación  $w/c$  como la mínima resistencia indicadas en la Tabla 4.2.2. Esto sirve para asegurar que realmente se logre en obra la relación  $w/c$  requerida por motivos de durabilidad. El comentario introductorio incluido en el Capítulo 4 del Código dice ... "La selección de una  $f'_c$  consistente con la relación agua-material cementicio seleccionada por motivos de durabilidad ayudará a asegurar que en obra realmente se obtenga la relación agua-material cementicio requerida." Como mencionamos anteriormente, resulta difícil determinar con precisión la relación  $w/c$  del hormigón durante su elaboración y más difícil aún hacerlo como un control en obra. Las resistencias mínimas requeridas por durabilidad trasladan el control de calidad; en vez de limitar la relación  $w/c$  se limita la resistencia a la compresión especificada, la cual se puede controlar fácilmente.

Para los hormigones de agregados livianos solamente se especifica una resistencia mínima, ya que las características variables de absorción de los agregados livianos no permiten calcular las relaciones  $w/c$ .

Los hormigones usados en estructuras de contención de agua o expuestos a condiciones de exposición severas deben ser virtualmente impermeables al agua. La baja permeabilidad no sólo mejora la resistencia a los ciclos de congelamiento y

deshielo, especialmente en presencia de sales anticongelantes, sino que también mejora la resistencia del hormigón a la penetración de cloruros. Los hormigones de baja permeabilidad se deben dosificar de manera que la relación w/c especificada sea menor o igual que 0,50. Si el hormigón estará expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo en estado húmedo, la relación w/c debe ser menor o igual que 0,45. Además, para proteger contra la corrosión a las armaduras de los hormigones expuestos a sales anticongelantes (condiciones de congelamiento y deshielo en estado húmedo) y los hormigones expuestos al agua de mar, estos hormigones se deben dosificar con una relación w/c menor o igual que 0,40.

Para las condiciones de exposición mencionadas también se deben satisfacer las resistencias mínimas del hormigón indicadas en la Tabla 4.2.2. El Ejemplo 2.1 ilustra la dosificación de una mezcla que satisface tanto la relación w/c como la resistencia requerida para lograr la durabilidad del hormigón.

### **4.2.3 Hormigón expuesto a productos químicos anticongelantes**

La Tabla 4.2.3 limita el tipo y la cantidad de cemento pórtland que se permite reemplazar en los hormigones expuestos a las sales anticongelantes. La cantidad de ceniza volante u otra puzolana, o ambas, se limita al 25 por ciento del peso total del material cementicio. La escoria y el vapor de sílice se limitan al 50 por ciento y al 10 por ciento, respectivamente, del peso total. Si para reemplazar parcialmente al cemento se utiliza ceniza volante (u otra puzolana) junto con escoria y vapor de sílice, el peso total de estos materiales debe ser menor o igual que el 50 por ciento del peso total del material cementicio, y el porcentaje máximo de cada uno de los materiales de reemplazo utilizados no debe superar los límites establecidos para cada material en forma individual. Si la combinación de materiales utilizada para reemplazar parte del cemento no incluye escoria, el peso total de estos materiales debe ser menor o igual que 35 por ciento, y tampoco se deberán superar los límites establecidos para cada material en forma individual.

Por ejemplo: Si un elemento de hormigón armado ha de estar expuesto a sales anticongelantes, la Tabla 4.2.2 establece que la relación w/c debe ser menor o igual que 0,40. Si el diseño de la mezcla requiere 280 lb de agua para producir una mezcla de hormigón con incorporación de aire que tenga un asentamiento determinado, el peso total del material cementicio no puede ser menor que  $280/0,40 = 700$  lb. Las 700 lb de "material cementicio" pueden estar compuestas exclusivamente por cemento pórtland o por una combinación de cemento pórtland y ceniza volante, puzolana, escoria o vapor de sílice.

Si se utiliza ceniza volante para reemplazar parte del cemento pórtland, la máxima cantidad de ceniza volante está limitada a  $0,25(700) = 175$  lb, manteniendo la misma w/c =  $280/(525 + 175) = 0,40$ .

Si como reemplazo solamente se utiliza escoria, el contenido de escoria se limita a  $0,50 (700) = 350$  lb, con w/c =  $280/(350 + 350) = 0,40$ .

Si para reemplazar parte del cemento se utiliza una combinación de ceniza volante y escoria, el contenido máximo de esta combinación está limitado a  $0,50 (700) = 350$  lb; la fracción de ceniza volante está limitada a  $0,25 (700) = 175$  lb de la combinación total, con w/c =  $280/(350 + 175 + 175) = 0,40$ .

Si como reemplazo se utiliza una combinación de ceniza volante y vapor de sílice (práctica habitual en los hormigones de alta calidad), la máxima cantidad de la combinación está limitada a  $0,35 (700) = 245$  lb; la fracción de vapor de sílice está limitada a  $0,10 (700) = 70$  lb, con w/c =  $280/(385 + 245 + 70) = 0,40$ .

Es evidente que se pueden reemplazar diferentes porcentajes del cemento, siempre y cuando no se superen los porcentajes individuales y combinados indicados en la Tabla 4.2.3.

Se debe observar que las limitaciones sobre el reemplazo del cemento pórtland se aplican solamente a los hormigones expuestos a los potenciales efectos perjudiciales de los productos químicos anticongelantes. Investigaciones realizadas indican que la ceniza volante, la escoria y el vapor de sílice pueden reducir la permeabilidad del hormigón e impedir el ingreso de cloruros, ya que las pastas cementicias que se producen con estos materiales son más densas e impermeables. En cuanto al uso de ceniza volante y otras puzolanas, especialmente el vapor de sílice, vale la pena destacar que estos ingredientes son muy utilizados en los hormigones de alta calidad (HPC, según sus siglas en inglés) para disminuir su permeabilidad y aumentar su resistencia.

## **4.3 EXPOSICIÓN A LOS SULFATOS**

Los sulfatos pueden atacar al hormigón que está en contacto con el suelo, expuesto al agua de mar o expuesto a aguas subterráneas con un elevado contenido de sulfatos. Las medidas utilizadas para reducir el ataque de los sulfatos incluyen el uso de cemento resistente a los sulfatos. La susceptibilidad al ataque de los sulfatos es mayor en el caso de los hormigones expuestos a la humedad, como ocurre en las fundaciones y en las losas construidas directamente sobre el terreno, y en las estructuras expuestas directamente al agua de mar. Para los hormigones que estarán sujetos al ataque de los sulfatos contenidos en el suelo o el agua se debe especificar el uso de cementos resistentes a los sulfatos. La Tabla 4.3.1 lista los tipos adecuados de cementos resistentes a los sulfatos y las máximas relaciones agua-material cementicio, junto con las correspondientes resistencias mínimas del hormigón para diferentes condiciones de exposición. El grado de exposición se determina en base a la concentración de sulfatos solubles en agua presentes en el suelo o bien en base a la concentración de sulfatos presentes en el agua. Observar que en la Tabla 4.3.1 el agua de mar figura como una "exposición moderada," aún cuando el agua de mar generalmente contiene una concentración de sulfatos superior a 1500 ppm. Esto se debe a que la presencia de cloruros en el agua de mar inhibe la reacción expansiva que caracteriza los ataques por sulfatos.<sup>2,1</sup>

Para seleccionar el tipo de cemento adecuado para lograr resistencia a los sulfatos, la principal consideración a tener en cuenta es el contenido de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ). Los cementos que contienen bajos porcentajes de  $C_3A$  son particularmente resistentes a los suelos y aguas que contienen sulfatos. Cuando la protección contra un grado moderado de ataque de los sulfatos es una consideración importante, como en el caso de las estructuras de drenaje en áreas donde la concentración de sulfatos en el agua subterránea es mayor que lo habitual, pero el grado de ataque no es necesariamente severo (0,10 - 0,20 por ciento), se debería especificar el uso de cemento pórtland Tipo II (contenido máximo de  $C_3A$  igual a ocho por ciento, de acuerdo con ASTM C 150).

Se debería especificar cemento pórtland Tipo V para los hormigones expuestos a un grado de ataque de sulfatos severo, especialmente cuando el suelo o el agua subterránea tienen un elevado contenido de sulfatos. La elevada resistencia a los sulfatos del cemento Tipo V se atribuye a su bajo contenido de aluminato tricálcico (contenido máximo de  $C_3A$  igual a cinco por ciento).

Ciertos cementos mezclados (C 595) también proporcionan resistencia a los sulfatos. Cuando el grado de exposición a los sulfatos es de moderado a severo también se pueden utilizar otros tipos de cementos producidos con bajos contenidos de  $C_3A$ . La resistencia a los sulfatos también aumenta cuando se incorpora aire y cuando los contenidos de cemento son elevados (relaciones agua-material cementicio bajas).

Antes de especificar un cemento resistente a los sulfatos el ingeniero debe verificar su disponibilidad. Generalmente el cemento Tipo II se consigue sin dificultad; el cemento Tipo V sólo se consigue en ciertas áreas en las cuales es necesario diseñar para ambientes donde el grado de ataque de los sulfatos es severo o muy severo. Los cementos mezclados pueden ser difíciles de conseguir.

#### **4.4 PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS**

Los cloruros pueden ingresar al hormigón a través de sus ingredientes: el agua de mezclado, los agregados, el cemento y los aditivos, o bien cuando el hormigón está expuesto a las sales anticongelantes, el agua de mar o el aire cargado de sal que caracteriza los ambientes costeros. Los valores máximos del contenido de cloruros indicados en la Tabla 4.4.1 se aplican a los cloruros aportados por los ingredientes del hormigón, no a los provenientes del ambiente que rodea a la estructura. Limitar el contenido de cloruros es responsabilidad del fabricante del hormigón, que se debe asegurar que los ingredientes utilizados para elaborar el hormigón (cemento, agua, agregados y aditivos) produzcan un hormigón en el cual el contenido de cloruros esté dentro de los límites especificados para las diferentes condiciones de exposición. De acuerdo con 4.4.1, para determinar el contenido de cloruros de los ingredientes individuales o de muestras de hormigón endurecido se deben utilizar los procedimientos de ensayo especificados en ASTM C 1218. Además de un elevado contenido de cloruros, para inducir el proceso de corrosión es necesaria la presencia de oxígeno y humedad. La disponibilidad de oxígeno y humedad cerca de las armaduras varía según las condiciones de exposición que existan durante la vida de servicio de la estructura, y estas condiciones difieren de una estructura a otra e incluso entre diferentes elementos de una misma estructura.

Si se anticipa que los materiales a utilizar para preparar el hormigón aportarán cantidades significativas de cloruros, se deben ensayar los ingredientes individuales del hormigón, incluyendo el agua, los agregados, el cemento y los aditivos, para verificar que la concentración total de cloruros aportada por los ingredientes no supere los límites indicados en la Tabla 4.4.1. Estos límites han sido establecidos para lograr un umbral mínimo de protección contra la corrosión de las armaduras

previo a las condiciones de exposición de servicio. Los contenidos máximos de cloruros para la protección contra la corrosión también dependen del tipo de construcción y del ambiente al cual estará expuesto el hormigón durante su vida de servicio, tal como se indica en la Tabla 4.4.1.

Todos los ingredientes usados para elaborar el hormigón contienen cantidades variables de cloruros. Existen cloruros solubles en agua y cloruros insolubles en agua, pero sólo los cloruros solubles en agua inducen la corrosión. Hay ensayos que permiten determinar tanto el contenido de cloruros solubles en agua como el contenido total de cloruros (solubles e insolubles). El ensayo para determinar el contenido de cloruros solubles es más lento y difícil de controlar, y por lo tanto es más costoso que el ensayo para determinar el contenido total de cloruros. Se puede obtener una estimación inicial del contenido de cloruros ensayando los diferentes ingredientes del hormigón para determinar su contenido total de cloruros (solubles e insolubles). Si el contenido total de cloruros es menor que el valor permitido por la Tabla 4.4.1 no será necesario determinar el contenido de cloruros solubles en agua. Pero si el contenido total de cloruros es mayor que el valor permitido será necesario ensayar muestras del hormigón endurecido para determinar su contenido de cloruros solubles en agua y comparar los resultados obtenidos con los valores de la Tabla 4.4.1. Algunos de los cloruros solubles de los ingredientes reaccionarán con el cemento durante el proceso de hidratación y se volverán insolubles, reduciendo así el contenido de cloruros solubles, o sea la causa de la corrosión. Del contenido total de cloruros del hormigón endurecido solamente del 50 al 85 por ciento es soluble en agua; el resto es insoluble. Observar que el hormigón endurecido debe tener como mínimo una edad de 28 días antes de tomar las muestras para los ensayos.

Los cloruros son uno de los materiales más abundantes que existen en la tierra; todos los ingredientes usados para elaborar hormigón contienen cantidades variables de cloruros. Los materiales y condiciones que potencialmente podrían aportar elevados contenidos de cloruros incluyen: el uso de agua de mar como agua de mezclado o como agua para lavar los agregados, ya que el agua de mar contiene cantidades significativas de sulfatos y cloruros; el uso de agregados de origen marino, ya que estos agregados a menudo contienen sal proveniente del agua de mar; el uso de agregados que han sido contaminados por el aire cargado de sal de las áreas costeras; el uso de aditivos que contienen cloruros, como por ejemplo cloruro de calcio; y el uso de sales anticongelantes como en el caso de las losas de los edificios para estacionamiento de vehículos. El ingeniero debe tener en cuenta el potencial riesgo que representan los cloruros para el hormigón en los ambientes marítimos o en otros casos donde hay exposición a las sales solubles. Investigaciones realizadas indican que el valor límite del contenido de cloruros solubles en agua necesario para proteger a las armaduras contra la corrosión puede ser muy bajo, tan bajo como 0,15 por ciento en peso del cemento. Si el contenido de cloruros es mayor que este valor límite y hay oxígeno y humedad disponibles, es muy probable que se produzca corrosión. Si el contenido de cloruros es menor que este valor límite, el riesgo de corrosión es bajo.

Dependiendo del tipo de construcción y del ambiente al cual la construcción estará expuesta durante su vida de servicio, y dependiendo también de la protección provista para limitar el ingreso de cloruros, el nivel de cloruros del hormigón puede aumentar con la edad y la exposición. La protección del hormigón contra el ingreso de cloruros se trata en la Sección 4.4.2 y la Tabla 4.2.2. Para proteger contra la corrosión "a las armaduras del hormigón expuesto al ingreso de cloruros provenientes de productos químicos anticongelantes, aguas salobres, agua de mar o atmósferas afectadas por estas fuentes," se debe especificar una relación w/c máxima igual a 0,40 y una resistencia mínima de 5000 psi. La resistencia a la corrosión de las armaduras también mejora cuando se utilizan recubrimientos de hormigón de mayor espesor. Si el hormigón estará expuesto a fuentes externas que podrían provocar el ingreso de cloruros, la Sección R7.7.5 recomienda utilizar un recubrimiento mínimo de hormigón de 2 in. para los tabiques y losas hormigonadas en obra y de 2-1/2 in. para los demás elementos. Para los elementos prefabricados producidos en una planta los recubrimientos mínimos de hormigón recomendados son de 1-1/2 in. y 2 in., respectivamente.

Otros métodos para reducir la corrosión provocada por el medioambiente incluyen el uso de armaduras con revestimiento epoxi, aditivos inhibidores de la corrosión, tratamientos superficiales y protección catódica. Revestir las armaduras con resina epoxi impide que los cloruros lleguen al acero de las armaduras. Los aditivos inhibidores de la corrosión intentan detener químicamente la reacción de corrosión. Los tratamientos superficiales intentan detener o reducir la penetración de cloruros en las superficies expuestas de hormigón. Los métodos de protección catódica invierten el flujo de la corriente de corrosión a través del hormigón y las armaduras. Se debe observar que, dependiendo de la potencial severidad de la exposición a los cloruros y del tipo e importancia de la construcción, se pueden combinar dos o más de los métodos mencionados a fin de lograr una protección "aditiva." Por ejemplo, para las losas pretensadas usadas para estacionamiento de vehículos en climas fríos en los cuales se utilizan sales anticongelantes para retirar la nieve y el hielo, toda la armadura convencional y los cables de postesado pueden tener revestimiento epoxi, y todo el sistema de cables incluyendo los anclajes se pueden encapsular en un sistema impermeable al agua especialmente diseñado para ambientes agresivos. Junto con estas

medidas se puede utilizar hormigón de alta calidad (impermeable), cubriendo toda la superficie de la losa con un tratamiento superficial con múltiples capas de membrana. En algunos casos se pueden justificar estas medidas de protección extremas. Para asegurar la resistencia contra la corrosión también se pueden realizar ensayos para determinar la permeabilidad a los cloruros. La norma ASTM C 1202, la cual se introdujo a partir de la edición 2002 del Código, proporciona un método de ensayo para obtener una indicación eléctrica de la capacidad del hormigón de resistir la penetración de los cloruros. Esta norma se basa en la AASHTO T 277-83, documento anteriormente referenciado por el Código.

## **CAPÍTULO 5 – CALIDAD, MEZCLADO Y COLOCACIÓN DEL HORMIGÓN**

### **ACTUALIZACIÓN PARA EL CÓDIGO 2002**

1. Se agregó una oración al final del artículo 5.1.1 que estable que la resistencia a la compresión especificada del hormigón,  $f'_c$ , debe ser mayor o igual que 2500 psi.
2. Se introdujeron varias revisiones significativas con respecto a las sobrerresistencias de diseño y los criterios de conformidad de los hormigones que tienen una resistencia a la compresión especificada,  $f'_c$ , mayor que 5000 psi. Estas revisiones incluyen una modificación del cálculo de la resistencia a la compresión promedio requerida,  $f'_{cr}$ , indicado en la nueva Tabla 5.3.2.1 (cuando hay datos de ensayos disponibles que permiten determinar la desviación estándar) y en la Tabla 5.3.2.2 existente (cuando no hay datos de ensayos disponibles). También se introdujeron los cambios correspondientes en los artículos 5.6.3.3(b), 5.6.5.1 y 5.6.5.2. Los criterios de conformidad actuales para los hormigones de todas las resistencias requieren realizar una investigación cuando los resultados de los ensayos de resistencia están más de 500 psi por debajo de  $f'_c$ . El nuevo criterio de conformidad para los hormigones de más de 5000 psi exige realizar una investigación cuando los resultados de los ensayos de resistencia están más de un 10 por ciento por debajo de  $f'_c$ . Este nuevo criterio permitirá que la variación de los resultados de los ensayos de resistencia sea mayor que 500 psi (por ejemplo, 600 psi para  $f'_c = 6000$  psi; 700 psi para  $f'_c = 7000$  psi; 800 psi para  $f'_c = 8000$  psi). Esto se fundamenta en el análisis exhaustivo de los resultados de ensayos de hormigones de alta resistencia que se han realizado durante los últimos veinte años. Estas revisiones fueron recomendadas por el Comité ACI 363 (Hormigón de Alta Resistencia), el Comité ACI 214 (Evaluación de los Datos obtenidos de Ensayos de Resistencia) y el Comité ACIC 211 (Dosificación del Hormigón), y su objetivo es proporcionar criterios más razonables y realistas para los hormigones de alta resistencia.
3. También se revisaron los métodos de preparación y almacenamiento de los testigos luego de su extracción y los límites de tiempo especificados para su ensayo (ver 5.6.5.3).

#### **5.1.1 Dosificación del hormigón por resistencia**

La dosificación por resistencia de las mezclas de hormigón se basa en conceptos probabilísticos cuya intención es garantizar que el hormigón desarrolle una resistencia adecuada. El artículo 5.1.1 enfatiza que la resistencia promedio del hormigón producido debe ser mayor que la  $f'_c$  especificada en base a los requisitos de diseño estructural o mayor que la mínima resistencia requerida por las condiciones especiales de exposición descritas en el Capítulo 4, cualquiera sea el valor que resulte mayor. Es posible que los resultados de los ensayos de resistencia de un hormigón dosificado de acuerdo con el enfoque probabilístico del Código sean menores que la resistencia a la compresión especificada,  $f'_c$ . La Sección 5.1.1 introduce este concepto observando que la intención del Código es "minimizar la frecuencia de las resistencias por debajo de  $f'_c$ ." Si el resultado de un ensayo de resistencia es menor que  $f'_c$ , la aceptabilidad de esta menor resistencia se determina en base a los requisitos de la Sección 5.6.2.3.

En la edición 2002 del Código se agregó una limitación que establece que la resistencia mínima a la compresión especificada,  $f'_c$ , debe ser mayor o igual que 2500 psi. De este modo el Código es ahora consistente con los requisitos mínimos establecidos en algunos de los códigos modelo utilizados a nivel nacional, incluyendo el IBC.

#### **5.1.3 Edad del hormigón para el ensayo de resistencia**

La Sección 5.1.3 permite basar  $f'_c$  en ensayos realizados a edades diferentes a la edad habitual de 28 días. Si los ensayos se realizan a una edad diferente a los 28 días, esta edad debe estar indicada en los planos o especificaciones técnicas. En los edificios en altura muchas veces se utilizan hormigones con resistencias a la compresión superiores a 6000 psi, y hasta se han llegado a utilizar hormigones con resistencias de 20.000 psi. En estos casos se justifica realizar los ensayos de

resistencia a edades superiores a los 28 días. El proceso constructivo de los edificios en altura que requieren hormigón de alta resistencia es tal que las columnas de los pisos inferiores no están totalmente cargadas hasta que ha transcurrido un año o más desde el inicio de su construcción. Por este motivo habitualmente se especifican resistencias a la compresión,  $f'_c$ , obtenidas de ensayos realizados a edades de 56 ó 90 días.

## **5.2 DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN**

La Referencia 2.1 contiene recomendaciones para la dosificación de las mezclas de hormigón. Las normas ACI 211.5 y ACI 211.1 (Referencias 2.5 y 2.6) también contienen recomendaciones para seleccionar la dosificación de diferentes tipos de hormigón.

El uso de la experiencia recabada en obra o de pastones de prueba preparados en laboratorio (ver 5.3) es el método de preferencia para seleccionar la dosificación de una mezcla de hormigón. Si no hay datos de experiencias previas ni ensayos en laboratorio disponibles, el profesional matriculado puede obtener autorización para basar la dosificación del hormigón en "otras experiencias o información," según lo especificado en la Sección 5.4.

## **5.3 DOSIFICACIÓN EN BASE A LA EXPERIENCIA EN OBRA Y/O PASTONES DE PRUEBA**

### **5.3.1 Desviación estándar**

Para establecer la dosificación de una mezcla de hormigón se recomienda utilizar pastones de prueba preparados en laboratorio o experiencia recabada en obra como la base sobre la cual seleccionar la relación agua-material cementicio requerida. El Código enfatiza el uso de un enfoque estadístico para establecer la resistencia meta,  $f'_{cr}$ , requerida a fin de asegurar que se logre la resistencia a la compresión especificada,  $f'_c$ . Si se conoce una desviación estándar aplicable,  $s$ , para los ensayos de resistencia del hormigón se puede establecer el nivel de resistencia meta para el cual se debe dosificar el hormigón. Si no se conoce la desviación estándar la dosificación se debe seleccionar de manera de producir una resistencia meta conservadora suficiente para permitir un elevado grado de variabilidad entre los resultados de los ensayos de resistencia. Si desea obtener información sobre los conceptos estadísticos utilizados y cómo se relacionan con el hormigón, el lector puede consultar las Referencias 2.7 y 2.8.

El hormigón utilizado en los ensayos previos realizados para determinar la desviación estándar se considera "similar" al especificado si fue elaborado con los mismos tipos generales de ingredientes, bajo condiciones de control de calidad y con métodos de producción no más restrictivos que los especificados para las obras propuestas, y si su resistencia especificada no se desvía del valor de  $f'_c$  especificado en más de 1000 psi. La modificación del tipo de hormigón o el aumento significativo del nivel de resistencia puede provocar un aumento de la desviación estándar. Esta situación podría ocurrir si se modifica el tipo de agregados (por ejemplo, si se cambian agregados naturales por agregados livianos o viceversa) o si se modifican las características del hormigón (por ejemplo, si se cambia hormigón con incorporación de aire por hormigón sin incorporación de aire). La desviación estándar también puede aumentar si se incrementa significativamente el nivel de resistencia promedio, aunque en este caso el aumento de la desviación estándar debería ser menor que el valor directamente proporcional al aumento de resistencia. Si existe una duda razonable en cuanto a su confiabilidad, cualquier desviación estándar estimada utilizada para calcular la resistencia promedio requerida siempre debería ser conservadora (elevada).

Normalmente las desviaciones estándares se establecen usando como mínimo 30 ensayos consecutivos sobre materiales representativos. Si la cantidad de ensayos disponibles es menor que 30 pero mayor o igual que 15, la Sección 5.3.1.2 especifica un aumento proporcional de la desviación estándar calculada a medida que el número de ensayos consecutivos disminuye de 29 a 15.

Los métodos estadísticos constituyen una valiosa herramienta para evaluar los resultados de los ensayos de resistencia. Es importante que los técnicos del hormigón comprendan el lenguaje básico de la estadística y que sean capaces de emplear esta herramienta de forma efectiva para evaluar los resultados de ensayos.

La Figura 2-1 ilustra algunos conceptos estadísticos fundamentales. Los puntos representan los resultados\* de seis (6) ensayos de resistencia consecutivos realizados sobre una clase dada de hormigón. La recta horizontal representa el promedio de los ensayos, que se designa como  $\bar{X}$ . El promedio se calcula sumando todos los valores obtenidos de los ensayos y dividiendo por el número de valores sumados. Por ejemplo, en la Figura 2-1:

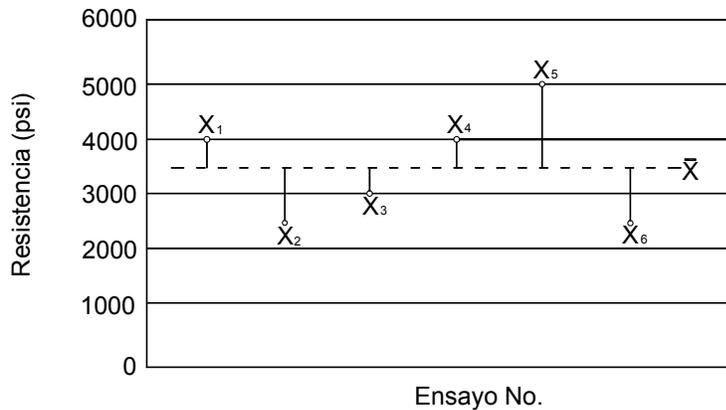


Figura 2-1 – Interpretación de los términos estadísticos

$$\bar{X} = (400 + 2500 + 3000 + 4000 + 5000 + 2500) / 6 = 3500 \text{ psi}$$

El promedio  $\bar{X}$  proporciona una medida del nivel de resistencia global del hormigón ensayado.

También sería útil tener un valor único que representara la variabilidad de los datos con respecto al promedio. En la Figura 2-1 las desviaciones por encima y por debajo del promedio (3500 psi) se representan mediante líneas verticales. Si acumuláramos la longitud total de estas líneas verticales sin fijarnos si están por encima o por debajo del promedio, y si dividiéramos la longitud total por el número de ensayos, el resultado que obtendríamos sería la longitud promedio, o la distancia promedio a partir de la resistencia promedio:

$$(500 + 1000 + 500 + 500 + 1500 + 1000) / 6 = 833 \text{ psi}$$

Esta es una medida de la variabilidad. Si los resultados de los ensayos fueran muy variables estas líneas verticales serían largas. Por el contrario, si todos los resultados fueran similares las líneas serían cortas.

Para resaltar el impacto de unos pocos valores de ensayo muy altos o muy bajos, los expertos en estadística recomiendan utilizar el cuadrado de las longitudes de las líneas verticales. La raíz cuadrada de la sumatoria del cuadrado de las longitudes dividida por el número de ensayos menos uno (algunos textos utilizan directamente el número de ensayos) se conoce como la desviación estándar. Esta medida de la variabilidad habitualmente se representa mediante la letra s. Matemáticamente s se expresa como:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

donde:

s = desviación estándar, psi

\* El resultado de un ensayo de resistencia es igual al promedio de las resistencias de dos probetas cilíndricas preparadas del mismo pastón de hormigón y ensayadas a la misma edad.

$\Sigma$  indica la sumatoria

$X$  = resultado de un ensayo de resistencia individual, psi

$\bar{X}$  = resistencia promedio, psi

$n$  = número de ensayos

Por ejemplo, para los datos graficados en la Figura 2-1, la desviación estándar sería:

$$s = \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + (X_3 - \bar{X})^2 + (X_4 - \bar{X})^2 + (X_5 - \bar{X})^2 + (X_6 - \bar{X})^2}{6-1}}$$

valor que se calcula de la siguiente manera:

Desviación ( $X - \bar{X}$ ) (longitud de las líneas verticales)	$(X - \bar{X})^2$ (longitud al cuadrado)
4000 - 3500 = +500	+250.000
2500 - 3500 = -1000	+1.000.000
3000 - 3500 = -500	+250.000
4000 - 3500 = +500	+250.000
5000 - 3500 = +1500	+2.250.000
2500 - 3500 = -1000	+1.000.000
Total	+5.000.000

$$s = \sqrt{\frac{5.000.000}{5}} = 1000 \text{ psi (valor muy elevado)}$$

Para resistencias del hormigón comprendidas entre 3000 y 4000 psi, la desviación estándar anticipada, representativa de diferentes niveles de control de calidad, variará de la siguiente manera:

<u>Desviación estándar</u>	<u>Representa</u>
300 a 400 psi	Excelente control de calidad
400 a 500 psi	Buen control de calidad
500 a 600 psi	Regular control de calidad
> 600 psi	Pobre control de calidad

Para los hormigones de muy alta resistencia, también conocidos como hormigones de alta calidad, que tienen resistencias superiores a los 10.000 psi, la desviación estándar anticipada variará de la siguiente manera:

300 a 500 psi	Excelente control de calidad
500 a 700 psi	Buen control de calidad
> 700 psi	Pobre control de calidad

Resulta obvio que calcular  $s$  de la manera antes descrita sería un proceso muy laborioso y lento. La mayoría de las calculadoras científicas pueden calcular la desviación estándar de forma directa. Las calculadoras vienen con las ecuaciones matemáticas programadas, y para obtener la desviación estándar de un conjunto de datos el usuario simplemente debe ingresar los datos estadísticos (valores de ensayo) y luego presionar la tecla de función adecuada. El Ejemplo 2.2 ilustra cómo se realiza una evaluación estadística típica de los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia.

El coeficiente de variación es simplemente la desviación estándar expresada como porcentaje del valor promedio. La expresión matemática es la siguiente:

$$V = \frac{s}{\bar{X}} \times 100\%$$

Para los resultados de ensayo graficados en la Figura 2-1:

$$V = \frac{1000}{3500} \times 100 = 29\%$$

La desviación estándar se puede calcular ya sea a partir de un único grupo de ensayos sucesivos de una clase dada de hormigón, o bien a partir de dos grupos de ensayos. En el este último caso se debe utilizar un valor promedio estadístico de la desviación estándar, que se calcula aplicando los métodos estadísticos habituales de la siguiente manera:

$$s_3 = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)(s_1)^2 + (n_2 - 1)(s_2)^2}{n_{\text{total}} - 2}}$$

donde:

$n_1$  = número de ensayos en el grupo 1

$n_2$  = número de ensayos en el grupo 2

$n_{\text{total}} = n_1 + n_2$

$s_1$  o  $s_2$  se calculan de la siguiente manera:

$$s = \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Para simplificar los cálculos,

$$s = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + \dots + X_n^2 - n\bar{X}^2}{n - 1}}$$

$$o \quad s = \sqrt{\frac{(X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + \dots + X_n^2) - \frac{(X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n)^2}{n}}{n - 1}}$$

donde  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  son los resultados de los ensayos de resistencia individuales y  $n$  es el número total de ensayos de resistencia realizados.

### 5.3.2 Resistencia promedio requerida

Si las instalaciones donde se elabora el hormigón llevan un registro en base a un mínimo de 30 ensayos de resistencia consecutivos representativos de materiales y condiciones similares a las anticipadas (o un registro en base a un número de ensayos consecutivos comprendido entre 15 y 29 con la desviación estándar calculada modificada por el factor aplicable de la Tabla 5.3.1.2), la resistencia utilizada como base para seleccionar la dosificación del hormigón para una resistencia a la compresión especificada,  $f'_c$ , mayor o igual que 5000 psi debe ser el mayor de los siguientes valores:

$$f'_{cr} = f'_c + 1,34 s$$

Tabla 5.3.2.1, (5-1)

$$y \quad f'_{cr} = 0,90 f'_c + 2,33 s - 500 \quad \text{Tabla 5.3.2.1, (5-2)}$$

Para resistencias a la compresión especificadas,  $f'_c$ , superiores a 5000 psi, la resistencia usada como base para seleccionar la dosificación del hormigón debe ser el mayor de los siguientes valores:

$$f'_{cr} = f'_c + 1,34 s \quad \text{Tabla 5.3.2.1, (5-1)}$$

$$y \quad f'_{cr} = 0,90 f'_c + 2,33 s \quad \text{Tabla 5.3.2.1, (5-3)}$$

Si no se conoce la desviación estándar, la resistencia promedio requerida,  $f'_{cr}$ , usada como base para seleccionar la dosificación del hormigón se debe determinar de la Tabla 5.3.2.2:

Para $f'_c$ menor que 3000 psi	$f'_{cr} = f'_c + 1000$ psi
comprendida entre 3000 y 5000 psi	$f'_{cr} = f'_c + 1200$ psi
mayor que 5000 psi	$f'_{cr} = f'_c + 1,10 f'_c + 700$ psi

Las fórmulas para calcular las resistencias meta requeridas se basan en los siguientes criterios:

1. Una probabilidad de 1 en 100 de que el promedio de 3 ensayos de resistencia consecutivos estará por debajo de la resistencia especificada,  $f'_c$ :  $f'_{cr} = f'_c + 1,34 s$ , y
2. Una probabilidad de 1 en 100 de que el resultado de un ensayo de resistencia individual estará más de 500 psi por debajo de la resistencia especificada  $f'_c$ :  $f'_{cr} = f'_c + 2,33 s - 500$  (para resistencias menores o iguales que 5000 psi), y
3. Una probabilidad de 1 en 100 de que el resultado de un ensayo de resistencia individual estará más de  $0,9f'_c$  por debajo de la resistencia especificada  $f'_c$  (para resistencias mayores que 5000 psi):  $f'_{cr} = 0,90 f'_c + 2,33 s$ .

Con el Criterio (1) se obtendrán resistencias meta mayores que con el Criterio (2) cuando las desviaciones estándares son bajas o moderadas, de hasta 500 psi. Sin embargo, para desviaciones estándares más elevadas el criterio determinante será en Criterio (2).

La intención de los requisitos de resistencia promedio de la Sección 5.3.2 es proporcionar un nivel de seguridad aceptable de que las resistencias del hormigón son aceptables desde los siguientes puntos de vista: (1) el promedio de los ensayos de resistencia a lo largo de un período de tiempo apreciable (tres ensayos consecutivos) es mayor o igual que la resistencia a la compresión especificada,  $f'_c$ ; o (2) el resultado de un ensayo de resistencia individual no está más de 500 psi por debajo de  $f'_c$  (para resistencias menores o iguales que 5000 psi); o (3) el resultado de un ensayo de resistencia individual no está más de  $0,90f'_c$  por debajo de  $f'_c$  (para resistencias superiores a los 5000 psi).

### 5.3.3 Documentación de la resistencia promedio

Los procedimientos de aprobación de la mezcla son necesarios para asegurar que el hormigón entregado realmente satisfaga los requisitos de resistencia. Los pasos a seguir para la aprobación de una mezcla se pueden resumir de la siguiente manera:

1. Determinar la desviación estándar anticipada a partir de las experiencias previas.
  - a. Esto se hace examinando un registro de 30 ensayos consecutivos realizados sobre una mezcla similar.
  - b. Si resulta difícil hallar una mezcla similar para la cual se hayan realizado 30 ensayos consecutivos, la desviación estándar se puede calcular en base a dos mezclas, siempre y cuando el número total de ensayos sea mayor o igual que 30. En este caso las desviaciones estándar se calculan por separado y luego se promedian usando el método estadístico descrito en párrafos precedentes.

2. Usar la desviación estándar para seleccionar la resistencia meta apropiada, el mayor de los valores de las Tablas 5.3.2.1 (5-1), (5-2) y (5-3).
  - a. Por ejemplo, si la desviación estándar es igual a 450 psi, la sobrerresistencia debe ser el mayor de los siguientes valores:  
 $1,34(450) = 603$  psi  
 $2,33(450) - 500 = 549$  psi  
  
Por lo tanto, para una resistencia de 3000 psi, la resistencia promedio usada como base para seleccionar la dosificación de la mezcla de hormigón debe ser de 3600 psi.
  - b. Observar que si no hay registros de ensayos aceptables disponibles la resistencia promedio debe ser 1200 psi mayor que  $f'_c$  (es decir, una resistencia promedio de 4200 psi para un hormigón con una resistencia especificada de 3000 psi), ver Tabla 5.3.2.2.
3. Proveer documentación que establezca que la mezcla propuesta proporcionará la resistencia promedio requerida. Esta documentación pueden consistir en:
  - a. Un registro de 30 ensayos del hormigón en obra. Este generalmente será el mismo registro usado para documentar la desviación estándar, pero puede corresponder a un conjunto de 30 resultados diferentes; o bien
  - b. Datos de ensayos realizados en laboratorio, obtenidos de una serie de pastones de prueba.

Si la documentación de la resistencia promedio para resistencias superiores a 5000 psi se basan en pastones de prueba preparados en laboratorio está permitido aumentar el valor de  $f'_c$  calculado en la Tabla 5.3.2.2 para tomar en cuenta la posibilidad que la resistencia obtenida en las pruebas en laboratorios sea menor que la resistencia correspondiente a la producción real.

El artículo 5.3.3.2(c) establece tolerancias para el asentamiento y el contenido de aire de las mezclas dosificadas en base a pastones de prueba preparados en laboratorio. Los límites de tolerancia se establecen como valores máximos permitidos, ya que la mayoría de las especificaciones, independientemente de su forma, permiten establecer un valor máximo para el asentamiento o el contenido de aire. Estas tolerancias para el asentamiento y el contenido de aire solamente son aplicables en caso que se utilicen pastones de prueba, y no en el caso que se utilicen registros de ensayos realizados sobre el hormigón en obra. El Ejemplo 2.3 ilustra la selección de la dosificación de un hormigón en base a pastones de prueba.

## **5.4 DOSIFICACIÓN SIN EXPERIENCIA EN OBRA NI PASTONES DE PRUEBA**

Si no hay información recabada de la experiencia en obra ni de pastones de prueba, para seleccionar la relación agua-material cementicio se pueden usar "otras experiencias o información." Sin embargo, esta opción solamente se permite con la aprobación del ingeniero/arquitecto responsable por el proyecto. Observar que necesariamente esta opción debe ser conservadora, y requiere una sobrerresistencia meta bastante elevada (1200 psi). Si, por ejemplo, la resistencia especificada es de 3000 psi, la resistencia usada como base para seleccionar la dosificación de la mezcla de hormigón (relación agua-material cementicio) debe ser de 4200 psi. Por motivos de economía, esta opción se debería usar exclusivamente en aquellos casos en que no se justifica el costo adicional que implicaría obtener datos sobre pastones de prueba. Observar también que esta alternativa se aplica solamente para resistencias a la compresión especificadas de hasta 5000 psi; para resistencias más elevadas se exige que la dosificación se base en la experiencia en obra o en pastones de prueba. La edición 1999 del Código limitaba la máxima resistencia dosificada sin experiencia en obra ni pastones de prueba a 4000 psi.

## **5.6 EVALUACIÓN Y CONFORMIDAD DEL HORMIGÓN**

### **5.6.1 Técnicos que realizan los trabajos en laboratorio y en obra**

Los procedimientos de ensayo para el hormigón indicados en el Código demandan personal con conocimientos y habilidades específicas. La experiencia ha demostrado que solamente los técnicos en obra correctamente capacitados y el personal de laboratorio certificado bajo programas reconocidos a nivel nacional pueden asegurar el nivel necesario para obtener resultados de ensayo significativos. En el Código 2002 se agregaron requisitos en la Sección 5.6.1 que exigen que los ensayos en obra sobre hormigón fresco y los procedimientos requeridos para preparar las probetas de hormigón para los ensayos de resistencia deben ser ejecutados por "un técnico en ensayos en obra calificado." Los procedimientos habitualmente realizados en obra y que deberán ser ejecutados por técnicos calificados incluyen el muestreo del hormigón fresco; el ensayo de asentamiento, contenido de aire y temperatura; y la preparación y curado de las probetas para ensayo. Los técnicos a cargo de estas tareas en obra pueden ser Técnicos en Ensayos de Hormigón en Obra certificados a través del Programa de Certificación Grado I de ACI.

La Sección 5.6.1 también requiere que todos los ensayos de laboratorio requeridos sean realizados por "técnicos de laboratorio calificados." Los técnicos de laboratorio que realizan ensayos del hormigón pueden ser Técnicos en Ensayos de Hormigón en Laboratorio o Técnicos en Ensayos de Resistencia del Hormigón certificados por ACI, o bien técnicos certificados en los requisitos de ASTM C 1007.

La siguiente discusión del Capítulo 5 del Código se ocupa de la dosificación de las mezclas de hormigón por resistencia, en base a conceptos probabilísticos.

### **5.6.2 Frecuencia de los ensayos**

La dosificación de un hormigón de acuerdo con el enfoque probabilístico del Código requiere un número estadísticamente aceptable de ensayos de resistencia. Exigiendo la realización de ensayos de resistencia siguiendo una frecuencia mínima especificada se obtiene una base estadística.

A continuación resumimos el criterio de frecuencia mínima indicado en el Código para la toma de muestras para los ensayos de resistencia \*\*, en base a un criterio diario y a un criterio por proyecto (el más estricto de los cuales será el determinante \*\*\*) para cada clase de hormigón.

#### **5.6.2.1 Mínimo número de ensayos de resistencia por día** – Este número no debe ser menor que:

- Un ensayo por día, ni menor que
- Un ensayo cada 150 yardas cúbicas de hormigón colocado, ni menor que
- Un ensayo cada 500 pies cuadrados de área superficial de losas o tabiques colocados.

#### **5.6.2.2 Mínimo número de ensayos de resistencia por proyecto** – Este número no debe ser menor que:

- Cinco ensayos de resistencia de cinco (5) pastones seleccionados aleatoriamente o de cada pastón si el número de pastones es menor que cinco.

Si la cantidad total de hormigón colocado en un proyecto es menor que 50 yardas cúbicas, el artículo 5.6.2.3 permite obviar los ensayos de resistencia si la autoridad fiscalizadora así lo permite.

De acuerdo con la norma ASTM para la elaboración de probetas de hormigón en obra (ASTM C 31), las probetas de ensayo deben ser cilíndricas, 6 × 12 in., a menos que las especificaciones técnicas establezcan otras dimensiones.

Ahora que se ha popularizado el uso de hormigones de alta resistencia (resistencias superiores a 10.000 psi), las probetas cilíndricas normalizadas requieren equipos de ensayo de muy elevada capacidad, y no todos los laboratorios tienen estos equipos. En consecuencia, la mayoría de los proyectos en los cuales se usará hormigón de muy alta resistencia específicamente permiten utilizar probetas cilíndricas 4 × 8 in. Las probetas 4 × 8 in. requieren aproximadamente la mitad de la capacidad de ensayo que requieren las probetas 6 × 12 in. Además, para su control de calidad interno la mayoría de los productores de hormigón prefabricado utilizan probetas cilíndricas 4 × 8 in.

---

\*\* Ensayo de resistencia = Promedio de las resistencias de dos probetas cilíndricas (ver 5.6.1.4)

\*\*\* Para un proyecto dado, si el volumen total de hormigón es tal que con la frecuencia de los ensayos requerida por 5.6.1.1 para una clase determinada de hormigón habrá menos de cinco ensayos, el criterio determinante será el criterio por proyecto.

Se debe observar que el número total de probetas cilíndricas preparadas para un proyecto normalmente será mayor que el número mínimo indicado en el Código necesario para determinar la conformidad de la resistencia del hormigón (dos probetas por cada ensayo de resistencia). Para un determinado proyecto sería prudente incluir probetas para realizar ensayos a 7 días o para curarlas en obra y verificar el desarrollo de resistencia temprana para el desencofrado, más una o dos probetas de reserva, en caso que alguna probeta se rompa o que sea necesario repetir un ensayo.

El Ejemplo 2.4 ilustra los criterios de frecuencia descritos en los párrafos precedentes para un proyecto de gran envergadura (5.6.2.1 es determinante). El Ejemplo 2.5 ilustra el caso de un proyecto menor (5.6.2.2 es determinante).

**5.6.3.3 Conformidad del hormigón** – El nivel de resistencia de una clase individual de hormigón se considera satisfactorio si se satisfacen los dos criterios siguientes:

1. Ningún resultado de un ensayo de resistencia individual (el promedio de las resistencias de un mínimo de dos probetas de un pastón) debe estar más de 500 psi por debajo de la resistencia a la compresión especificada cuando  $f_c$  es menor o igual que 5000 psi (por ejemplo, menor que 2500 psi para una resistencia a la compresión especificada del hormigón igual a 3000 psi); ni más de 10 por ciento por debajo de  $f_c$  cuando  $f_c$  es mayor que 5000 psi.
2. El promedio de los resultados de tres ensayos de resistencia consecutivos cualesquiera debe ser mayor o igual que la resistencia a la compresión especificada,  $f_c$ .

Los Ejemplos 2.6 y 2.7 ilustran resultados de ensayos de resistencia "aceptables" (o conformes) y "no aceptables" (o no conformes o de baja resistencia).

### **5.6.5 Investigación a realizar cuando los resultados de los ensayos indican que la resistencia es baja**

Si el promedio de los resultados de tres ensayos consecutivos es menor que la resistencia especificada se deben tomar medidas para aumentar el nivel de resistencia del hormigón (ver 5.6.3.4). Si el resultado de un ensayo de resistencia individual está más de 500 psi por debajo de la resistencia especificada cuando  $f_c$  es menor o igual que 5000 psi, o está más de 10 por ciento por debajo de  $f_c$  cuando  $f_c$  es mayor que 5000 psi, es posible que haya problemas aún más serios. Es por ello que se debe realizar una investigación de acuerdo con los procedimientos indicados en la Sección 5.6.5.

Observar que, para determinar la conformidad del hormigón, el resultado de un ensayo de resistencia individual (un "ensayo") siempre es la resistencia promedio de dos probetas ensayadas a la edad especificada, que normalmente es de 28 días. Debido a las numerosas variables potenciales que se presentan en la elaboración y el manipuleo del hormigón, la conformidad del hormigón nunca se basa en el ensayo de una única probeta. Dos causas habituales que provocan bajos resultados de ensayo<sup>2,9</sup> son: (1) el incorrecto manipuleo y ensayo del hormigón, detectado como factor contribuyente en la mayoría de los casos investigados; y (2) la reducción de la resistencia del hormigón debida a un error en la producción, o la adición de demasiada agua en obra. Esto último generalmente ocurre cuando la colocación del hormigón se demora o cuando se requieren hormigones de asentamiento elevado. Un elevado contenido de aire provocado por la sobredosificación de un aditivo incorporador de aire en la planta elaboradora también puede ser la causa de las bajas resistencias.

Si se informa una resistencia insuficiente, es fundamental realizar una investigación siguiendo una secuencia lógica de posibles causas y efectos. Antes de tomar ninguna medida se deben revisar todos los informes de ensayos y analizar todos los resultados. Se debe investigar si los resultados de los ensayos se ajustan a algún patrón que permita inferir la causa. Hay algo que indique que se han violado las especificaciones? Es necesario observar el asentamiento, el contenido de aire, la temperatura del hormigón, la temperatura ambiente, el número de días que las probetas permanecieron en obra y en qué condiciones de curado, y cualquier defecto de las probetas que se haya informado.

Si la deficiencia justifica una investigación, en primer término se debe verificar la precisión de los ensayos, y luego comparar los requisitos estructurales con la resistencia medida. En las primeras etapas de la investigación se debe prestar particular atención al manipuleo y ensayo de las probetas. Probablemente si hay discrepancias menores en el curado de los cilindros en climas moderados, esto no afectará mucho la resistencia, pero si las discrepancias son significativas puede haber una reducción importante de la resistencia. Casi todas las deficiencias relacionadas con el manipuleo y el ensayo de las probetas disminuirá su resistencia. Si la reducción es significativa puede que haya sido originada por varias violaciones

simultáneas. Los ejemplos de este tipo de violaciones incluyen: probetas que permanecen en obra demasiados días; probetas curadas a una temperatura superior a 80°F; probetas congeladas; probetas que han sufrido impactos durante su transporte; demora del curado húmedo en el laboratorio; y falta de cuidado al aplicar la carga a las probetas.

Para investigar el hormigón colocado en obra es fundamental conocer en qué parte de la estructura se encuentra el "hormigón ensayado" y de cuál pastón (camión) se tomó el hormigón. Esta información debe formar parte de los datos registrados en el momento en que se moldean las probetas. Si se encuentra que los resultados de los ensayos son deficientes, puede ser necesario realizar ensayos de resistencia sobre testigos tomados del hormigón colocado y endurecido para verificar la conformidad con el Código y con la documentación técnica. Si la resistencia es mayor que la requerida no tiene sentido investigar la resistencia del hormigón colocado y endurecido. Sin embargo, si los procedimientos de ensayo se ajustan a las normas y los resultados de los ensayos indican que la resistencia del hormigón es menor que la requerida para el elemento en cuestión, es posible que sea necesario investigar el hormigón colocado y endurecido (ver 5.6.5).

Los laboratorios deben ser responsables por las deficiencias de sus procedimientos. El uso de personal calificado es de importancia fundamental. El personal a cargo de la toma de muestras de hormigón, la preparación de las probetas cilíndricas, y de la operación de los equipos de laboratorio debe estar certificado bajo el programa de certificación de ACI o su equivalente (ver 5.6.1).

Si fuera necesario ensayar testigos de hormigón, la extracción de los testigos del área cuestionada se debe realizar de acuerdo con los procedimientos descritos en ASTM C 42. El ensayo de los testigos de hormigón se debe realizar con sumo cuidado, tanto en la operación del propio ensayo como en la interpretación de los resultados. ASTM C 42 presenta procedimientos detallados. Los siguientes lineamientos ayudan a garantizar que los procedimientos de extracción y ensayo de los testigos sean adecuados:

1. Esperar 14 días (mínimo) antes de extraer los testigos.
2. Extraer tres testigos del área cuestionada.
3. Extraer los testigos usando brocas de diamante.
4. Extraer testigos de un diámetro de 2-1/2 in. (mínimo) o dos veces el tamaño máximo del agregado.
5. Evitar que en los testigos haya cualquier tipo de armadura.
6. La longitud del testigo debe ser como mínimo igual a 1 × diámetro del testigo, pero preferentemente debe ser igual a 2 × diámetro del testigo.
7. Si fuera posible, tomar un testigo de la totalidad del espesor del elemento.
8. Dejar una longitud adicional de 2 in. en el extremo del testigo, la cual luego se quebrará.
9. Usar cuñas de madera para retirar las porciones de los extremos que han de ser quebradas.
10. Aserrar los extremos quebrados para lograr superficies planas.
11. Si bajo condiciones de servicio el hormigón está seco, secar al aire los testigos durante 7 días (60 a 70°F, humedad relativa ambiente 60%). Ensayar los testigos secos.
12. Si bajo condiciones de servicio el hormigón está húmedo, sumergir los testigos en agua (73,4 ± 3°F) durante 40 horas. Ensayar los testigos húmedos.
13. Enrasar los extremos de los testigos con una capa de material de 1/8 in. de espesor (o menos).
14. Centrar correctamente el testigo en el aparato de ensayo.
15. Si la relación entre la longitud y el diámetro del testigo es menor que 2, corregir la resistencia como se indica a continuación (interpolación linealmente entre los valores listados):

<u>Relación longitud-diámetro</u>	<u>Factor de corrección de la resistencia</u>
1,94 – 2,10	1,00
1,75	0,98
1,50	0,96
1,25	0,93
1,00	0,87

Además de los procedimientos indicados en ASTM C 42, se agregó un nuevo párrafo en el Comentario de la Sección 5.6.5 del Código 2002 que advierte que, cuando para obtener los testigos se utiliza una broca enfriada con agua, el proceso provoca un gradiente de humedad entre el exterior y el interior de los testigos, el cual afectará adversamente su resistencia a la compresión. Por lo tanto, se impone una restricción al inicio de los ensayos sobre los testigos a fin de permitir un tiempo suficiente para que este gradiente de humedad se disipe.

En la edición 2002 del Código hay varios cambios significativos que afectan el almacenamiento y ensayo de los testigos de hormigón. Los requisitos de 5.6.5.3 fueron totalmente revisados, y ahora exigen que se retire el agua superficial de los testigos usando un trapo seco inmediatamente después de su extracción y que se coloquen en bolsas o recipientes impermeables antes de su transporte y almacenamiento. Los testigos se deben ensayar no menos de 48 horas antes ni más de 7 días después de su extracción, a menos que el profesional de diseño apruebe una edad diferente. En las ediciones anteriores del Código las condiciones de almacenamiento y restricciones referidas al momento de ensayar los testigos eran diferentes si el hormigón se iba a utilizar en estructuras que bajo condiciones de servicio estarían "secas" o en estructuras que tendrían "humedad superficial."

A la hora de evaluar los resultados de los ensayos realizados sobre los testigos, el hecho de que las resistencias de los testigos pueden no ser iguales a la resistencia especificada para las probetas moldeadas no debe ser motivo de preocupación. Las resistencias especificadas para las probetas moldeadas incluyen un amplio margen para considerar las incógnitas referidas a la colocación y condiciones de curado en obra además de la variabilidad normal. En los testigos que se extraen de la estructura real las incógnitas ya han ejercido su influencia, y por lo tanto se puede reducir el margen de la resistencia medida por encima de la resistencia requerida.

La Sección 5.6.5.4 establece que un hormigón se considera estructuralmente adecuado si la resistencia promedio de tres testigos es como mínimo igual al 85 por ciento de  $f'_c$ , y ninguna de las resistencias individuales es menor que el 75 por ciento de la resistencia a la compresión especificada. Un hormigón se puede considerar aceptable desde el punto de vista de la resistencia si los resultados de los ensayos realizados en testigos para una ubicación dada satisfacen estos requisitos. El ingeniero estructural debería examinar aquellos casos en los cuales la resistencia de los testigos no satisface estos criterios, a fin de determinar si hay algún motivo de preocupación desde el punto de vista del comportamiento estructural. Si los resultados obtenidos a partir de ensayos correctamente realizados son tan bajos que ponen en duda la integridad estructural es posible que sea necesario implementar otras acciones.

Como último recurso, en caso que existan dudas importantes, para determinar si un elemento estructural es adecuado se pueden especificar ensayos de carga. Generalmente estos ensayos solamente son adecuados para los elementos solicitados a flexión – losas, vigas y similares – pero algunas veces se pueden aplicar a otros elementos. En cualquier caso los ensayos de carga son ensayos altamente especializados que solamente deben ser realizados e interpretados por un ingeniero plenamente capacitado en las técnicas correspondientes. Los procedimientos para los ensayos de carga y los criterios para su interpretación se especifican en el Capítulo 20 del Código.

En el caso poco frecuente que un elemento estructural no pase el ensayo de carga, o si el análisis estructural de un elemento inestable indica que éste no es adecuado, se deben implementar medidas correctivas adecuadas. Dependiendo de las circunstancias particulares de cada caso, las alternativas son:

- Reducir la carga aplicada para que tenga un nivel consistente con la resistencia del hormigón.
- Mejorar la construcción para llevar su capacidad de carga a los valores anticipados. Esto puede implicar agregar nuevos elementos estructurales o aumentar las dimensiones de los elementos existentes.
- Reemplazar el hormigón no aceptable (o no conforme).

## REFERENCIAS

- 2.1 *Design and Control of Concrete Mixtures*, 13<sup>o</sup> Edición, Publicación EB001T, Portland Cement Association, Skokie, IL, 1988.
- 2.2 ASTM D 3963-99, “Standard Specification for Fabrication and Jobsite Handling of Epoxy-Coated Reinforcing Steel Bars”, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, 1999.
- 2.3 ASTM A 775-01, “Standard Specification for Epoxy-Coated Steel Reinforcing Bars”, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, 2001.
- 2.4 ASTM A 934-01, “Standard Specification for Epoxy-Coated Prefabricated Steel Reinforcing Bars,” American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, 2001.
- 2.5 ACI Committee 211.1, “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete (ACI 211.1-9 (Reaprobada en 1997), Revisada en 1985),” American Concrete Institute, Farmington Hills, 1997.
- 2.6 ACI Committee 211.2, “Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98),” American Concrete Institute, Farmington Hills, 1998.
- 2.7 ACI Committee 214, “Recommended Practice for Evaluation of Compression Test Results of Concrete (ACI 214-77, Reaprobada en 1997),” American Concrete Institute, Farmington Hills, 1997.
- 2.8 “Guideline Manual to Quality Assurance / Quality Control” NRMCA Publication 190, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Springs, MD 1999.
- 2.9 “What, Why & How? Low Concrete Cylinder Strength,” *Concrete in Practice*, CIP-9, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, MD, 2000.

## Ejemplo 2.1 – Selección de la relación agua-material cementicio por resistencia y durabilidad

Se pide dosificar el hormigón para una losa de un muelle de carga que estará expuesto a condiciones húmedas en un clima con temperaturas de congelamiento y deshielo, aunque no estará expuesto a sales anticongelantes. Para el diseño estructural se ha especificado una resistencia a la compresión  $f'_c$  de 3000 psi. Se especifica cemento Tipo I y agregado de peso normal con un tamaño máximo de 3/4 in.

Cálculos y discusión	Referencia del Código
1. Determinar la resistencia mínima requerida y la máxima relación w/c para el trabajo propuesto a fin de satisfacer tanto los requisitos de resistencia como los requisitos correspondientes a las condiciones de exposición.	5.2.1
Para los hormigones expuestos a temperaturas de congelamiento y deshielo en estado húmedo la Tabla 4.2.2 requiere que la relación agua-material cementicio sea menor o igual que 0,45 y que la resistencia mínima $f'_c$ sea de 4500 psi.	4.2.2
Como la resistencia requerida para las condiciones de exposición es mayor que la resistencia requerida por el diseño estructural ( $f'_c = 3000$ psi), la resistencia requerida por las condiciones de exposición será determinante ( $f'_c = 4500$ psi).	
2. Seleccionar una relación w/c para satisfacer la resistencia requerida determinante, $f'_c = 4500$ psi.	
Los hormigones expuestos a temperaturas de congelamiento y deshielo deben tener aire incorporado; el contenido de aire requerido se indica en la Tabla 4.2.1. Para los hormigones en regiones frías y expuestos a condiciones de congelamiento y deshielo se requiere un contenido de aire meta de 6% para un tamaño máximo de agregado de 3/4 in.	4.2.1
La selección de la relación agua-material cementicio para la resistencia requerida se debe basar en pastones de prueba o en datos obtenidos en obra a partir de los materiales que se utilizarán en la construcción, para determinar la relación entre la relación w/c y la resistencia.	5.3
Asumir que los datos de resistencia del Ejemplo 2.2, para los cuales se ha establecido una desviación estándar de 353 psi, son representativos de materiales y condiciones similares a las que se anticipan para el trabajo propuesto:	5.3.1.1
<ul style="list-style-type: none"> <li>a. hormigón de peso normal con incorporación de aire</li> <li>b. la resistencia especificada (4000 psi) difiere en menos de 1000 psi de la requerida para el trabajo propuesto (4500 psi)</li> <li>c. hay 30 resultados de ensayos de resistencia disponibles.</li> </ul>	
Para una desviación estándar de 353 psi la resistencia a la compresión promedio requerida, $f'_c$ , a utilizar como base para dosificar el hormigón debe ser igual al mayor de los siguientes valores:	5.3.2
$f'_{cr} = f'_c + 1,34 s = 4500 + 1,34 (353) = 5000$ psi	Ec. (5-1)
$f'_{cr} = f'_c + 2,33 s - 500 = 4500 + 2,33 (353 - 500) = 4800$ psi	Ec. (5-2)
Por lo tanto $f'_{cr} = 5000$ psi.	

Nota: La resistencia promedio requerida para el diseño de la mezcla debe ser igual a la resistencia especificada más una tolerancia para considerar la variabilidad de los materiales, la variabilidad de los métodos de mezclado, transporte y colocación del hormigón, y la variabilidad de la preparación, curado y ensayo de las probetas. Para este ejemplo, con una desviación estándar de 353 psi, la tolerancia considerada para todas estas variables es de 500 psi.

La Referencia 2.1 presenta curvas de resistencia típicas obtenidas en base a ensayos realizados sobre pastones de prueba. Usando la curva de resistencia de la Figura 7-1 de la Referencia 2.1, reproducida en la Figura 2-2, la relación agua-material cementicio (w/c) requerida para una  $f_c$  de 5000 psi es aproximadamente igual a 0,38. (La curva ilustrada en la Figura 2-2 se utiliza exclusivamente a título ilustrativo; en una situación de diseño real se debe utilizar una curva w/c - resistencia requerida que sea representativa de los materiales y las condiciones locales).

Como la relación w/c requerida (0,38) para la resistencia especificada  $f_c = 4500$  es menor que el valor 0,45 requerido por la Tabla 4.2.2, para establecer la dosificación de la mezcla debemos usar el valor 0,38. Observar que la resistencia especificada,  $f_c = 4500$ , es la resistencia que se anticipa será igualada o superada por el promedio de cualquier conjunto de tres ensayos de resistencia consecutivos. También se anticipa que ninguno de los resultados de los ensayos individuales estará más de 500 psi por debajo de la resistencia de 4500 psi especificada.

5.6.3.3

Continuando con este ejemplo, el fabricante del hormigón probablemente podrían utilizar los registros de ensayo del Ejemplo 2.2 para demostrar que la mezcla de hormigón en base a la cual se desarrollaron los registros producirá la resistencia promedio requerida,  $f_{cr}$ , para este proyecto. Para documentar la potencial resistencia promedio de la mezcla de hormigón, el fabricante sólo debe seleccionar 10 ensayos consecutivos del total de 30 ensayos que representen un promedio mayor que el promedio requerido de 5000 psi. En realidad, el promedio de los 30 resultados de ensayo (4835 psi) se acerca lo suficiente para calificar como la misma mezcla de hormigón que se utilizará en la obra.

5.3.3

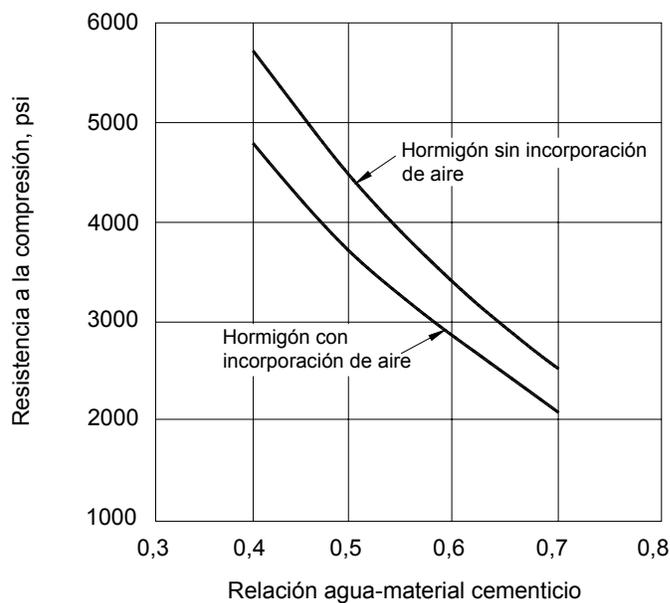


Figura 2-2 – Curvas de resistencia típicas en base a pastones de prueba o datos obtenidos en obra

## Ejemplo 2.2 – Informe de los ensayos de resistencia

Calcular el promedio y la desviación estándar para los resultados de 30 ensayos de resistencia indicados a continuación, usando la expresión para la desviación estándar indicada en R5.3.1. Las especificaciones técnicas requieren que el hormigón, que se usará para construir las columnas de una estructura, sea de peso normal con incorporación de aire y que tenga una resistencia especificada de 4000 psi.

Ensayo No.	Fecha del ensayo	Probeta #1 a los 28 días	Probeta #2 a los 28 días	Promedio a los 28 días	Promedio a los 28 días (3 ensayos consecutivos)
1	05-Marzo-99	4640	4770	4705	
2	06-Marzo-99	4910	5100	5005	
3	10-Marzo-99	4570	4760	4665	
4	12-Marzo-99	4800	5000	4665	
5	13-Marzo-99	5000	4900	4950	4792
6	17-Marzo-99	4380	4570	4475	4775
7	19-Marzo-99	4630	4820	4725	4717
8	21-Marzo-99	4800	4670	4735	4645
9	25-Marzo-99	5020	4940	4980	4813
10	28-Marzo-99	4740	4900	4820	4845
11	30-Marzo-99	4300	4110	4205	4668
12	02-Abril-99	4280	3620	3950	4325
13	05-Abril-99	4740	4880	4810	4322
14	08-Abril-99	4870	5040	4955	4592
15	09-Abril-99	4590	4670	4630	4798
16	15-Abril-99	4420	4690	4555	4713
17	16-Abril-99	4980	5070	5025	4737
18	19-Abril-99	4900	4860	4880	4820
19	20-Abril-99	5690	5570	5630	5178
20	22-Abril-99	5310	5310	5310	5273
21	24-Abril-99	5080	4970	5025	5322
22	28-Abril-99	4640	4440	4540	4958
23	01-Mayo-99	5090	5080	5085	4883
24	03-Mayo-99	5430	5510	5470	5032
25	07-Mayo-99	5290	5360	5325	5293
26	10-Mayo-99	4700	4770	4735	5177
27	11-Mayo-99	4880	5040	4960	5007
28	15-Mayo-99	5000	4890	4945	4880
29	16-Mayo-99	4810	4670	4740	4882
30	18-Mayo-99	4250	4400	4325	4670

### Cálculos y discusión

### Referencia del Código

El cálculo de la resistencia promedio y la desviación estándar se presenta en la siguiente tabla. La desviación estándar obtenida (353 psi) representa un excelente control de calidad para el hormigón de 4000 psi especificado.

Observar que el hormigón entregado para este trabajo satisface los requisitos de conformidad del artículo 5.6.3.3; ninguno de los ensayos de resistencia individuales (promedio a los 28 días) de dos probetas está más de 500 psi por debajo de la resistencia especificada (ninguno de los promedios a los 28 días es menor que 4000 – 500 psi = 3500 psi), y que el promedio de tres ensayos consecutivos cualesquiera es mayor que la resistencia especificada (4000 psi).

Ensayo No.	Resistencia a los 28 días, X, psi	$X - \bar{X}$ , psi	$(X - \bar{X})^2$
1	4705	-130	16.900
2	5005	170	28.900
3	4665	-170	28.900
4	4900	65	4225
5	4950	115	13.225
6	4475	-360	129.600
7	4725	-110	12.100
8	4735	-100	10.000
9	4980	145	21.025
10	4820	-15	255
11	4205	-630	396.900
12	3950	-885	783.255
13	4810	-25	625
14	4955	100	10.000
15	4630	-205	42.025
16	4555	-280	78.400
17	5025	190	36.100
18	4880	45	2025
19	5630	795	632.025
20	5310	475	255.625
21	5025	190	36.100
22	4540	-295	87.025
23	5085	250	62.500
24	5470	635	403.225
25	5325	490	240.100
26	4735	-100	10.000
27	4960	125	15.625
28	4945	110	12.100
29	4740	-95	9025
30	4325	-510	260.100
$\Sigma$	145.060		3.607.850

Número de ensayos = 30

Resistencia máxima = 5630 psi

Resistencia mínima = 3950 psi

Resistencia promedio =  $\frac{145.060}{30} = 4835$  psi

Desviación estándar =  $\sqrt{\frac{3.607.850}{29}} = 353$  psi

La única resistencia menor que la resistencia especificada (3950 psi) es un resultado individual muy bajo obtenido para la probeta #2 (3620 psi). La gran diferencia entre la probeta #2 (3620 psi) y la probeta #1 (4280 psi), ambas moldeadas del mismo pastón, parecería indicar un posible problema en los procedimientos de manipuleo y ensayo de la probeta #2.

Es interesante observar que los datos estadísticos obtenidos a partir de los 30 resultados de ensayos indicados se pueden utilizar para establecer una mezcla de diseño para otros proyectos posteriores, siempre que el hormigón requerido en el nuevo proyecto sea de peso normal, con incorporación de aire, y que tenga una

resistencia especificada comprendida entre 3000 y 5000 psi (4000 psi  $\pm$  1000 psi). En este caso la resistencia meta para dosificar la nueva mezcla se calcularía usando la desviación estándar de 353 psi en las Ecuaciones (5-1) y (5-2) del código. Esta desviación estándar, la cual es baja, debería permitirle al fabricante de hormigón elaborado producir mezclas económicas para proyectos donde se utilizarán hormigones similares. Los datos obtenidos de los ensayos de resistencia de este ejemplo se usan para demostrar que la mezcla de hormigón usada para este proyecto califica para el trabajo propuesto en el Ejemplo 2.1.

---

## Ejemplo 2.3 – Dosificación del hormigón en base a pastones de prueba

---

Establecer una relación agua-material cementicio para una mezcla de hormigón en base a la resistencia a su compresión especificada de manera de satisfacer los requisitos de diseño estructural.

Especificaciones técnicas:

$f'_c = 3000$  psi (hormigón de peso normal) a los 28 días

Tamaño máximo de los agregados = 3/4 in.

Contenido total de aire = 5%

Máximo asentamiento = 4 in.

Arena Kona y grava

Cemento pórtland Tipo I

---

<b>Cálculos y discusión</b>	<b>Referencia del Código</b>
<p>1. Como no hay resultados de ensayos de resistencia disponibles, usar la Tabla 5.3.2.2 para establecer la resistencia meta, <math>f'_{cr}</math>.</p> <p>Para <math>f'_c = 3000</math> psi, <math>f'_{cr} = f'_c + 1200 = 3000 + 1200 = 4200</math> psi</p>	5.3.2.2
<p>2. Procedimiento en base a pastones de prueba</p> <p>Los pastones de prueba se deben preparar con los mismos materiales propuestos para la obra. Se deben producir tres (3) mezclas de hormigón diferentes con tres (3) relaciones agua-material cementicio (w/c) diferentes para obtener un rango de resistencias que comprenda a la resistencia meta, <math>f'_{cr}</math>. Los pastones de prueba deben tener un asentamiento que no difiera en más de <math>\pm 0,75</math> in. del máximo valor especificado (3,25 a 4,75 in.) y el contenido de aire no debe diferir en <math>\pm 0,50\%</math> del máximo permitido por las especificaciones técnicas. Se deben preparar tres (3) probetas cilíndricas por cada pastón de prueba, y estas probetas se deben ensayar a la edad de 28 días. Luego los resultados de los ensayos se grafican para obtener la curva de resistencia en función de la relación agua-material cementicio a utilizar para establecer una relación w/c adecuada para la resistencia meta <math>f'_{cr}</math>.</p> <p>Para ilustrar el procedimiento en base a pastones de prueba, supondremos que los pastones de prueba y los datos obtenidos de los ensayos son los indicados en la Tabla 2-3. En base a los resultados de los ensayos de resistencia graficados en la Figura 2-3 para los tres pastones de prueba, la máxima relación w/c a utilizar como base para dosificar la mezcla de hormigón es igual a 0,49. Este valor se obtuvo por interpolación.</p> <p>Al usar una relación agua-material cementicio de 0,49 para producir un hormigón con una resistencia especificada de 3000 psi se obtiene un grado de sobrerresistencia considerable. Con referencia a la Figura 2-2 del Ejemplo 2.1, para una relación w/c igual a 0,49 se puede anticipar un nivel de resistencia de aproximadamente 3800 psi si el hormigón tiene aire incorporado. Es evidente que cuando no hay datos suficientes para establecer una desviación estándar el grado de sobrerresistencia requerido para la mezcla es elevado.</p> <p>A medida que la construcción avance habrá más resultados de ensayos de resistencia disponibles, y se podrá reducir la sobrerresistencia de <math>f'_{cr}</math> con respecto al valor de <math>f'_c</math> especificado (1200 psi) usando una desviación estándar calculada a partir de los datos obtenidos en la propia obra. De este modo se logrará una mezcla más económica.</p>	5.3.3.2

Tabla 2-3 – Datos de los pastones de prueba

Pastones de prueba	Pastón No.1	Pastón No.2	Pastón No.3
Relación w/c seleccionada	0,45	0,55	0,65
Asentamiento medido, in.	3,75	4,25	4,50
Contenido de aire medido, %	4,4	5,3	4,8
Resultados de los ensayos, psi:			
Probeta #1	4650	3900	2750
Probeta #2	4350	3750	2900
Probeta #3	4520	3650	2850
Promedio	4510	3770	2830

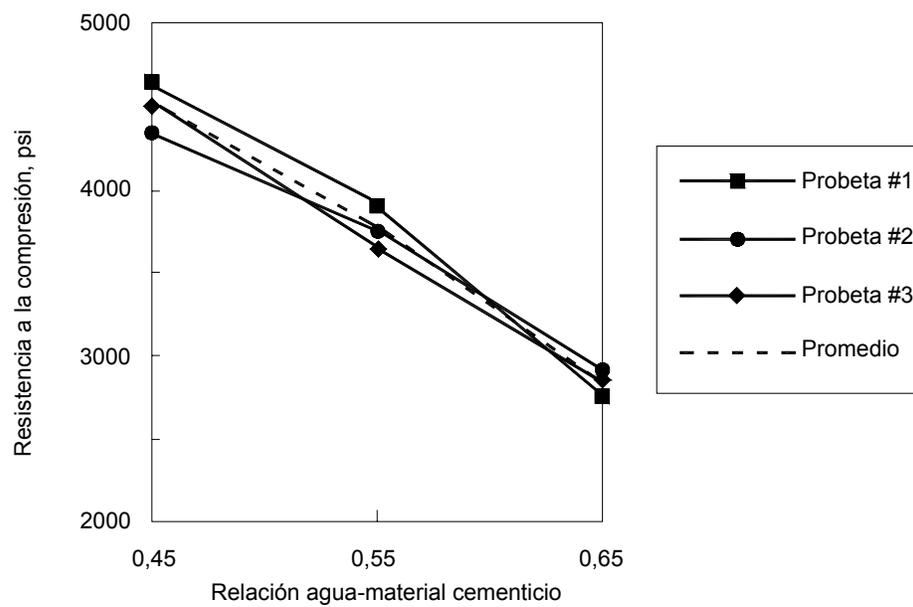


Figura 2-3 – Curva de resistencia en base a los pastones de prueba

---

## Ejemplo 2.4 – Frecuencia de los ensayos de resistencia

---

Determinar el mínimo número de probetas que se deben moldear para satisfacer los requisitos de frecuencia mínima para la toma de muestras para ensayos de resistencia. La cantidad de hormigón colocado es de 200 yardas cúbicas por día durante 7 días, y este hormigón es transportado en camiones mezcladores de 10 yardas cúbicas. Se trata de un proyecto de gran envergadura donde el número mínimo de probetas de ensayo requeridas por día de colocación de hormigón (ver 5.6.2.1) es mayor que el número de probetas requeridas para la totalidad del proyecto (ver 5.6.2.2).

---

<b>Cálculos y discusión</b>	<b>Referencia del Código</b>
1. Volumen total de hormigón del proyecto = $200 (7) = 1400 \text{ yd}^3$	
2. Número total de camiones (pastones) requeridos $\approx 1400/10 \approx 140$	
3. Número de camiones (pastones) que se deben muestrear por día = $200/150 = 1,3$	5.6.2.1
4. Se deben tomar muestras de dos camiones por día	
5. Número de camiones que se deben muestrear durante la ejecución del proyecto = $2 (7) = 14$	
6. Número de probetas que se deben moldear durante la ejecución del proyecto = $14 \times (2 \text{ probetas por ensayo})$ = 28 (mínimo)	5.6.2.4

Se debe observar que la cantidad total de probetas que se deben moldear para este proyecto solamente representa un número mínimo requerido por el código para determinar la conformidad del hormigón. Se deberían moldear probetas adicionales para realizar ensayos a los 7 días, para contar con probetas curadas en obra que permitan verificar el desarrollo de la resistencia temprana para decidir el desencofrado, o para determinar cuándo postesar los tendones de pretensado. Además, se deberían preparar una o dos probetas de reserva, en caso que alguna de las probetas se rompa o que sea necesario repetir un ensayo.

---

## Ejemplo 2.5 – Frecuencia de los ensayos de resistencia

---

Determinar el mínimo número de probetas que se deben moldear para satisfacer los requisitos de frecuencia mínima para la toma de muestras para ensayos de resistencia. El hormigón se usará para colar una losa de 100 ft × 75 ft × 7-1/2 in., y se transportará en camiones mezcladores de 10 yardas cúbicas. Se trata de un proyecto menor en el cual el número mínimo de probetas requerido se basa en el criterio de frecuencia indicado en el artículo 5.6.2.2.

---

Cálculos y discusión	Referencia del Código
1. Superficie del hormigón a colocar = $100 \times 75 = 7500 \text{ ft}^2$	
2. Volumen total de hormigón usado en el proyecto = $7500 \times 7,5 \times \frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in.}} / 27 = 174 \text{ yd}^3$	
3. Total de camiones (pastones) requeridos $\approx 174 / 10 \approx 18$	
4. Número de camiones (pastones) que se deben muestrear por día $= 174 / 150 = 1,2$ $= 75000 / 5000 = 1,5$	5.6.2.1
5. Pero el número mínimo de camiones (pastones) que se deben muestrear durante la ejecución del proyecto es 5.	5.6.2.2
6. Número total de probetas que se deben moldear para el proyecto $= 5 \times (2 \text{ probetas por ensayo})$ $= 10 \text{ (mínimo)}$	5.6.2.4

Nuevamente enfatizamos que este número corresponde a un mínimo establecido en el código para determinar la conformidad o aceptación del hormigón. Sería más prudente contar con probetas adicionales.

---

## Ejemplo 2.6 – Conformidad del hormigón

---

La siguiente tabla muestra los resultados de los ensayos de resistencia correspondientes a cinco camiones (pastones) de hormigón entregados en obra. Por cada pastón se moldearon dos probetas cilíndricas, las cuales se ensayaron a los 28 días. La resistencia especificada del hormigón es  $f'_c = 4000$  psi. Determinar si el hormigón es aceptable en base a los criterios de resistencia del artículo 5.6.3.3.

Ensayo No.	Probeta #1	Probeta #2	Promedio del ensayo	Promedio de 3 ensayos consecutivos
1	4110	4260	4185	---
2	3840	4080	3960	---
3	4420	4450	4435	4193
4	3670	3820	3745	4047
5	4620	4570	4595	4258

---

### Cálculos y discusión

### Referencia del Código

---

El promedio de los resultados correspondientes a dos probetas representa el resultado de un único ensayo. A pesar de que la menor de las cinco resistencias obtenidas en los ensayos (3745 psi) es menor que la resistencia especificada (4000 psi) el hormigón se considera aceptable, ya que no es más de 500 psi menor que el valor especificado ( $3745 \text{ psi} > 4000 - 500 \text{ psi} = 3500 \text{ psi}$ ) – hormigón para el cual  $f'_c$  es menor o igual que 5000 psi. Los resultados listados también satisfacen el segundo criterio de aceptación, basado en el promedio de tres (3) ensayos consecutivos, El procedimiento para evaluar la aceptación en base a los resultados de tres ensayos de resistencia consecutivos se ilustra en la columna de la derecha. El valor 4193 psi es el promedio de los tres primeros ensayos consecutivos:  $(4185 + 3960 + 4435) / 3 = 4193$ . El promedio de los tres ensayos consecutivos siguientes se calcula como  $(3960 + 4435 + 3745) / 3 = 4047$  psi, dejando de lado el primero de los valores considerado en el promedio anterior (4185). El promedio de los tres ensayos consecutivos siguientes se calcula dejando de lado el valor 3960 psi. Cualquiera sea el número de ensayos de resistencia realizados, los promedios de tres ensayos consecutivos se calculan del mismo modo. Por lo tanto, en base a los criterios de conformidad especificados en el Código para la resistencia del hormigón, los resultados de los cinco ensayos son aceptables, tanto desde el punto de vista de los resultados individuales como desde el punto de vista de los promedios de tres ensayos consecutivos.

---

## Ejemplo 2.7 – Conformidad del hormigón

---

La siguiente tabla muestra los resultados de los ensayos de resistencia correspondientes a cinco camiones (pastones) de hormigón entregados en obra. Por cada pastón se moldearon dos probetas cilíndricas, las cuales se ensayaron a los 28 días. La resistencia especificada del hormigón es  $f'_c = 4000$  psi. Determinar si el hormigón es aceptable en base a los criterios de resistencia del artículo 5.6.3.3.

Ensayo No.	Probeta #1	Probeta #2	Promedio del ensayo	Promedio de 3 ensayos consecutivos
1	3620	3550	3585	---
2	3970	4060	4015	---
3	4080	4000	4040	3880*
4	4860	4700	4780	4278
5	3390	3110	3250**	4023

\* Este promedio de tres ensayos consecutivos no es aceptable.

\*\* Hay un ensayo que está más de 500 psi por debajo del valor especificado.

---

### Cálculos y discusión

### Referencia del Código

La investigación que se debe realizar cuando los resultados de los ensayos de resistencia no son aceptables se describe en la Sección 5.6.5. Si el promedio de tres ensayos consecutivos es menor que la resistencia especificada se deben tomar medidas para aumentar la resistencia del hormigón. Si el resultado de un ensayo individual está más de 500 psi por debajo de la resistencia especificada de un hormigón con una  $f'_c$  menor o igual que 5000 psi, es posible que existan problemas graves que requieren una investigación para asegurar la integridad estructural. También en este caso se deben tomar medidas para aumentar el nivel de resistencia. Para poder investigar las causas de esta menor resistencia es fundamental conocer en qué parte de la estructura está ubicado el hormigón cuestionado; sólo así el ingeniero podrá evaluar los efectos de la falta de resistencia sobre la capacidad estructural del elemento.

5.6.5

En base a la experiencia,<sup>2,9</sup> se ha determinado que las dos causas más habituales que provocan que los resultados de los ensayos sean bajos son: (1) el incorrecto manipuleo y ensayo del hormigón, y (2) la reducción de la calidad del hormigón debido a un error en la producción o a la adición de un exceso de agua en obra, lo cual ocurre cuando la colocación del hormigón se demora o cuando se requieren hormigones de asentamiento elevado. Un elevado contenido de aire también puede ser la causa de las bajas resistencias.

Los resultados de los ensayos realizados para el hormigón del Camión 5 son menores que el valor especificado (particularmente el valor correspondiente a la probeta #2), para el cual se determinó una resistencia promedio de apenas 3250 psi. (Observar que ninguna de las decisiones de aceptación se basan en la probeta individual para la cual se obtuvo un valor de resistencia muy bajo (3110 psi)). Debido a las numerosas variables que afectan la producción, el muestreo y los procedimientos de ensayo del hormigón, la aceptación (o el rechazo) del hormigón siempre se debe basar en el promedio de al menos dos probetas.)