

La Figura 5.8. muestra como varía la probabilidad de aceptación cuando se entregan hormigones que pertenecen a poblaciones distintas, cuyas medias varían entre 17 y 30 MPa. En todos los casos el desvío estándar es igual a 3 MPa, que se mantiene constante pues es propio de la planta que elaboró y entregó el hormigón. El número de muestras ensayadas por lote es igual a 5.

En la Figura 5.9. se representan las curvas OC en función del porcentaje de defectuosos. En el mismo gráfico se agregó una curva que indica las probabilidades de aceptación cuando se incrementa a 15 el número de ensayos.

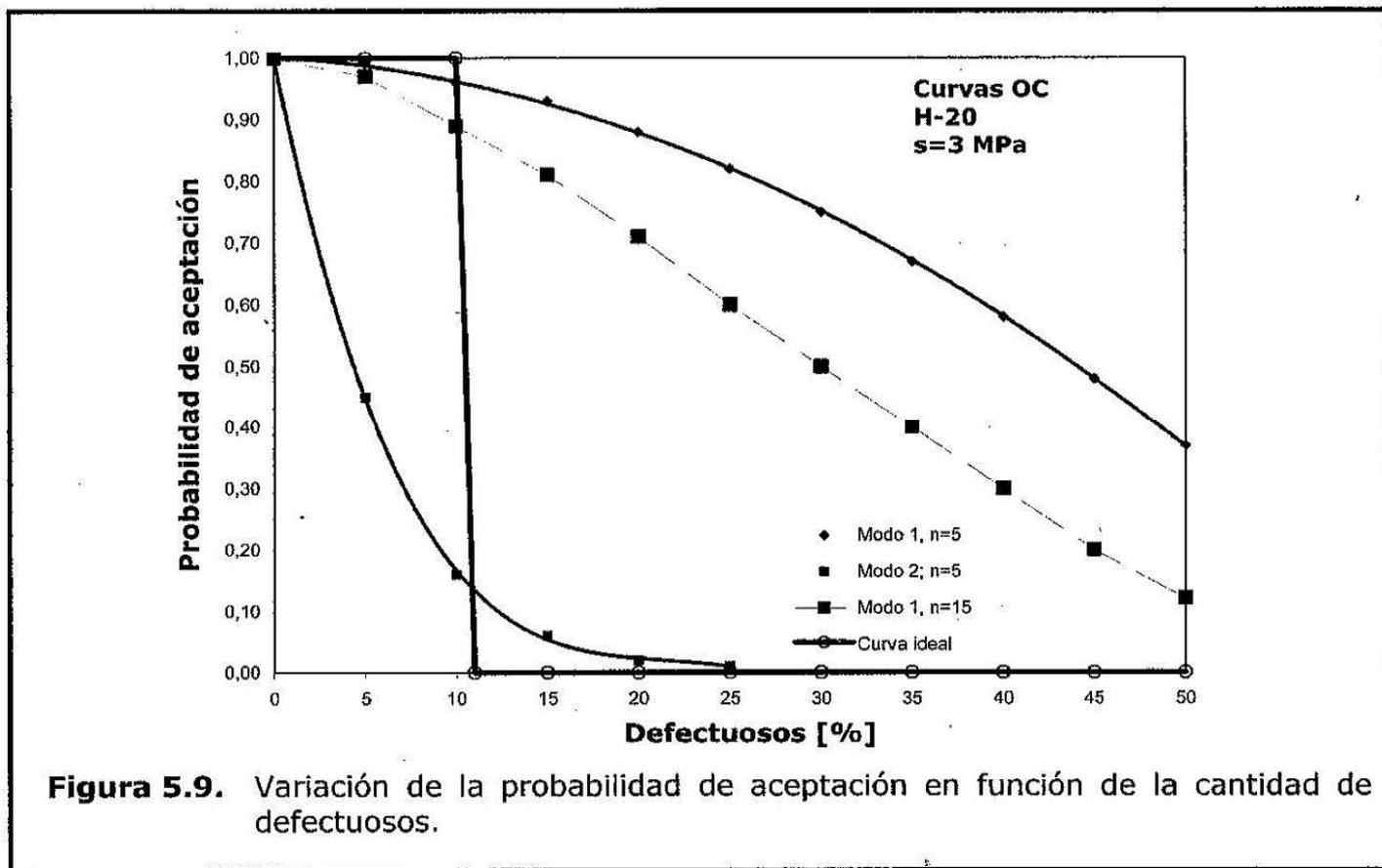


Figura 5.9. Variación de la probabilidad de aceptación en función de la cantidad de defectuosos.

Las ordenadas de las curvas OC nos dan la probabilidad de aceptar un lote para una determinada resistencia media o un porcentaje de defectuosos. Si la resistencia es menor que la especificada, o el número de defectuosos es mayor que el admisible, esa ordenada es el riesgo del consumidor de aceptar lo que no es conforme. El complemento a 100 % de cada ordenada, cuando la resistencia es superior a la especificada, es el riesgo del productor de que le rechacen un material que es conforme.

Se aprecia que al recibir un lote con cinco ensayos aplicando el Modo 1, existe una probabilidad elevada de aceptar como buenos a suministros que pertenecen a poblaciones con resistencias menores que la especificada. Esa probabilidad se reduce si utilizamos el criterio del Modo 2.

La misma Figura 5.9. incluye la curva que debería representar el criterio de aceptación ideal, donde los errores de tipo I y II serían nulos. Este criterio es imposible de materializar en la práctica.

El ejemplo es ilustrativo de los errores que se pueden cometer cuando se reciben lotes con un número reducido de ensayos y criterios de conformidad del tipo de los indicados en (5.10) y (5.11).

Líneas de equiprobabilidad

En las curvas OC anteriores se partió del supuesto que conocíamos el desvío estándar. Pero cuando σ no es conocida o puede variar, la probabilidad de aceptación del hormigón ensayado dependerá de μ y σ . En estas circunstancias, el uso de una familia de líneas de equiprobabilidad reflejará mejor la efectividad del criterio de aceptación adoptado. Ello fue desarrollado por Chen Ji-fa et al [505].

De la mencionada publicación, en las Figuras 5.10. y 5.11. se reproducen las líneas de equiprobabilidad para tamaños muestrales con n igual a 3 y 6. Para poder incluir en un mismo gráfico a los distintos valores límites o de corte a y b , los autores adoptaron como:

abscisas: $M = (\mu - a) / (a - b)$

ordenadas: $S = \sigma / (a - b)$

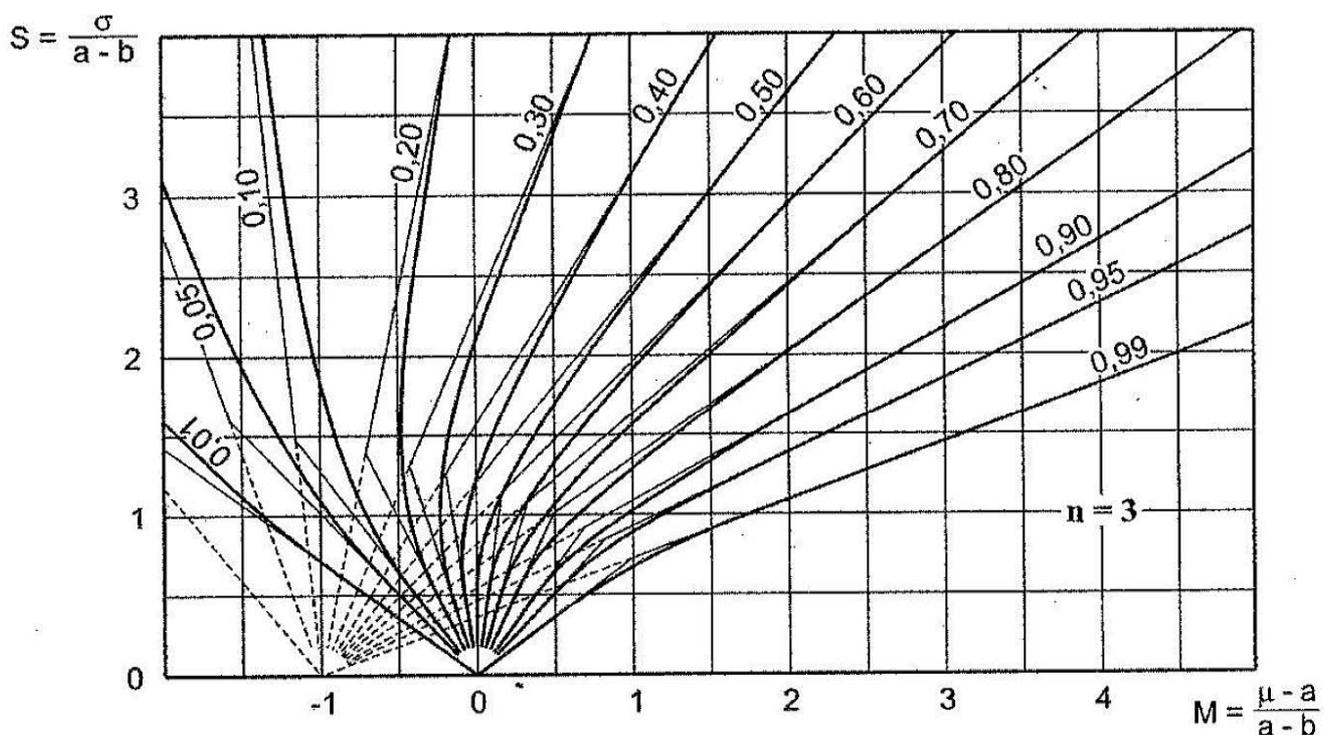
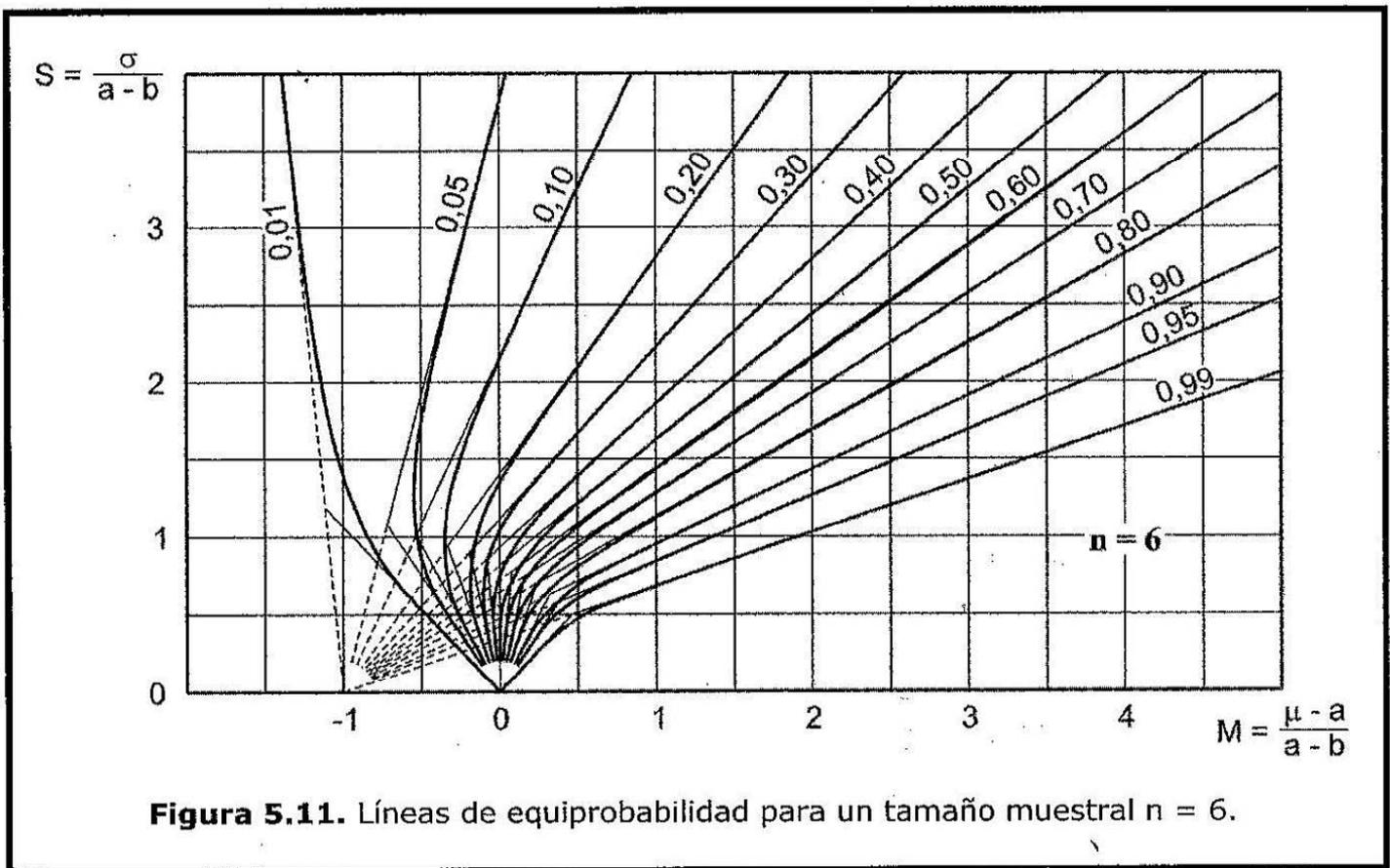


Figura 5.10. Líneas de equiprobabilidad para un tamaño muestral $n = 3$.

Cada línea reúne los pares de valores μ y σ con igual probabilidad de aceptación. Cada Figura incluye 13 líneas de equiprobabilidad, cuyas respectivas probabilidades de aceptación varían entre $L = 0,01$ y $L = 0,99$ y se indican sobre las mismas líneas.

Se aprecia que cuando el tamaño de la muestra es pequeño ($n = 3$), las líneas de equiprobabilidad están espaciadas, indicando que cuando la calidad empeora (μ decrece o σ se incrementa) la probabilidad de aceptación decrece lentamente. En cambio, cuando $n=6$, las líneas de equiprobabilidad están más cercanas entre sí; la probabilidad de aceptación decrece más rápido indicando una mejora en la efectividad del ensayo con el aumento del tamaño de la muestra.

Chen Ji-fa también analiza los criterios de conformidad del tipo de los definidos por las expresiones (5.13) a (5.16). Muestra que cuando el desvío estándar es reducido, el límite del valor mínimo b no es significativo y la aceptación se define por el límite a de la media móvil. Por el contrario, cuando el desvío estándar es elevado y/o la media móvil se aleja del valor de corte a , entonces el que define la aceptación es el límite del valor mínimo b .



5.6. Control de conformidad y criterios de conformidad en el Reglamento CIRSOC 201-2005

El control de conformidad constituye el conjunto de acciones y decisiones destinadas a establecer si el hormigón que se colocó en una estructura cumple con los requisitos

especificados en el Proyecto. A ese efecto se aplican los criterios de conformidad que se basan en la realización de ensayos normalizados que miden las propiedades especificadas.

El Reglamento establece criterios de conformidad para las siguientes propiedades del hormigón fresco y endurecido: resistencia, durabilidad, consistencia, exudación, masa de la unidad de volumen del hormigón fresco, temperatura, razón agua/cemento, contenido de aire y contenido de material fino que pasa el tamiz IRAM 300 mm.

Los criterios de conformidad establecidos en este Reglamento tienen en cuenta la existencia de sistemas de control de producción en la planta elaboradora y los controles de recepción realizados por el Director de Obra inmediatamente antes de colocar el hormigón en los moldes. Pero la conformidad se establece exclusivamente con los resultados de ensayos de muestras tomadas en la Obra.

En el artículo 5.5. analizamos la importancia de los errores de estimación que tienen los criterios de conformidad de resistencia basados en un número reducido de ensayos. Vimos que, con el criterio del Código ACI 318, el riesgo del consumidor de aceptar hormigones con resistencia inferior a la especificada es elevado. Sin perjuicio de ello el criterio funciona bien en el ámbito de las obras de hormigón de USA. Un criterio similar también da buenos resultados en Canadá. Al evaluar estos dos aspectos aparentemente contradictorios se consideró que su explicación está en el nivel tecnológico y las condiciones en que operan las plantas en esos países. Controles de producción y normas de ética comercial rigurosas complementan a los criterios de conformidad y reducen el riesgo del consumidor. Aunque esto último no se puede evaluar en términos probabilísticos.

Para poder aplicar los criterios de conformidad de resistencia del ACI 318 en la Argentina, sin modificarlos, se consideró necesario asegurar la existencia de los aspectos complementarios mencionados en el párrafo anterior. Para los casos en que ello no ocurra, se optó por reducir el riesgo del consumidor y se aumentaron los valores límite de aceptación o valor de corte en los criterios de conformidad.

Los conceptos anteriores llevaron a definir dos modos de producción y sus respectivos criterios de conformidad. Esos modos se definen en los párrafos siguientes y se describen exhaustivamente en el artículo 5.6.1.

Modo 1. El hormigón es producido en una planta elaboradora que opera con un sistema de calidad. La planta puede estar instalada dentro o fuera del recinto de la obra, pero en ambos casos el Director de Obra tiene acceso al control de producción de la planta y conoce sus registros.

Modo 2. El hormigón es producido por una planta elaboradora que está emplazada fuera del recinto de la obra y no tiene un sistema de calidad. En este caso, la Dirección de Obra desconoce los controles de producción de la planta.

La utilización de dos criterios de conformidad de resistencia aplicados según el modo de producción y control es una solución original del Reglamento CIRSOC 201-2005. No se conocen antecedentes similares en otros reglamentos de seguridad de obras civiles.

Para determinar los límites de los criterios de conformidad del Modo 2, el INTI-CIRSOC desarrolló un programa de cálculo basado en los desarrollos de Chen Ji-fa et al [505], que permite calcular la probabilidad de aceptación para cada situación dada por un determinado conjunto de valores de: f'_c , s , n y valores de corte a y b según las expresiones (5.10) y (5.11). Con ese programa se evaluaron distintas combinaciones posibles y se adoptaron los límites indicados en el artículo 5.6.3.

5.6.1. Conformidad con la resistencia especificada. Cantidad de ensayos y dimensiones de los lotes

La conformidad de la resistencia del hormigón colocado en una parte o en toda la estructura se determina mediante resultados de ensayos de probetas moldeadas con muestras de hormigón extraídas a pie de obra y realizados a la edad de diseño.

Se considera como resultado de un ensayo (f'_{ci}) al valor que se obtiene como promedio de las resistencias de dos o más probetas moldeadas de la misma muestra y ensayadas a la misma edad. Se deberá cumplir que la diferencia entre las resistencias extremas del grupo que constituye cada ensayo, sea menor del quince por ciento (15 %) de la resistencia media de las probetas que constituyen el grupo. Si dicho valor resultara mayor, se rechazará el ensayo correspondiente y se investigarán los procedimientos de moldeo, curado y ensayo de las probetas, con el objeto de analizar si los mismos se están realizando en un todo de acuerdo con las normas. En el caso de que el grupo esté constituido por tres (3) probetas, si la diferencia entre las resistencias extremas es mayor del quince por ciento (15 %), pero las resistencias de dos de ellas difieren en menos del diez por ciento (10 %) con respecto a su resistencia promedio, se puede descartar el tercer resultado y aceptar el ensayo, tomando como resistencia del mismo el promedio de las dos aceptadas.

Los elementos estructurales de igual f'_c se agrupan en conjuntos sucesivos denominados lotes. La conformidad de la resistencia se determinará para cada lote.

El número de muestras por lote debe ser igual o mayor que cinco (5). Cuando el lote comprende dos niveles o plantas del edificio, el número mínimo es de tres (3) muestras por planta, con lo cual resultan seis (6) ó más muestras para ese lote del edificio.

En cada muestra se realizará como mínimo un ensayo (dos probetas) a la edad de diseño.

La dimensión de los lotes para el Modo 2 se indica en la Tabla 5.6. {4.2.2.3}. En el Modo 1, la dimensión de los lotes se toma igual al doble de la establecida para el Modo 2, siempre que el número de lotes sea igual o mayor que tres (3).

Puede ocurrir que se esté trabajando en Modo 1 y se deba hormigonar un conjunto de elementos estructurales cuyas dimensiones dupliquen los límites dados en la Tabla 4.1. del Reglamento CIRSOC 201-2005. Si la colocación del hormigón se hace en forma continua durante una jornada de trabajo y se utiliza una misma mezcla, se puede considerar que todo ese volumen constituye un único lote {4.2.2.3}. En ese caso se puede extraer una muestra cada cien metros cúbicos de hormigón.

Tabla 5.6. Dimensiones máximas de lotes para el Modo 2

Límite superior	Tipo de elementos estructurales		
	Estructuras que tienen elementos comprimidos (1)	Estructuras que tienen sólo elementos sometidos a flexión (2)	Estructuras Macizas (3)
Volumen de hormigón	100 m ³	100 m ³	100 m ³
Número de pastones	50	50	100
Superficie construida	500 m ²	1000 m ²	-----
Número de plantas	2	2	-----
(1) Elementos comprimidos como: pilares, pilas, muros portantes, pilotes, etc. (2) Esta columna incluye entresijos de hormigón sobre pilares metálicos, tableros, muros de sostenimiento, etc. (3) Este límite no es de aplicación a edificios.			

5.6.2. Criterios de conformidad de resistencia para el Modo 1 de Control

Los criterios de conformidad de resistencia del Modo 1 son iguales a los del Código ACI 318. En el Reglamento CIRSOC 201-2005, el Modo 1 de control es de aplicación cuando las obras están abastecidas por plantas elaboradoras que operan con un sistema de calidad que cumple con la norma IRAM-IACC-ISO 9001 o con las especificaciones establecidas en el Capítulo 4 del Reglamento CIRSOC 201-2005 {4.2.3}. Dicho cumplimiento tiene que ser certificado por un organismo acreditado por el OAA (Organismo Argentino de Acreditación). Además, la Dirección de Obra debe tener libre acceso a la Planta Elaboradora y a sus registros de calidad.

Cuando la Planta Elaboradora esté instalada en el recinto físico de la obra, y el Director de Obra supervise directamente el sistema de control de producción, se puede asumir que existe una elevada probabilidad de que el hormigón colocado en la estructura esté elaborado con los materiales, la dosificación y las condiciones de medición y mezclado previstas. Todo ello reduce el riesgo del consumidor pues el propio equipo de dirección está verificando que las muestras pertenecen a un mismo hormigón (una misma población). Entonces el Reglamento permite considerar que, a los efectos de la aplicación del Modo 1, la supervisión es equivalente a tener un sistema de calidad certificado.

En todos los casos, el sistema de producción y control debe verificar las siguientes condiciones:

- El hormigón se elabora en forma continua.
- Existe un control de recepción de los materiales y se verifican periódicamente las condiciones de empleo de los mismos.
- Los acopios de materiales permiten producir hormigón durante 2 días, como mínimo.
- La medición de todos los materiales se realiza en masa, con registro continuo de pesadas y verificación periódica de los equipos de pesado y mezcladoras.
- La mezcla de hormigón se dosifica con métodos racionales y se corrigen las pesadas para tener en cuenta la humedad de los materiales.

- Se extraen muestras periódicas de hormigón para hacer el seguimiento de sus propiedades en estado fresco y de la resistencia a la edad de diseño y a una edad anterior que se pueda correlacionar con la de diseño.
- El control de producción se basa en el seguimiento de la resistencia utilizando matemática estadística y cartas de control.
- Se verifica periódicamente la desviación normal y la resistencia característica con un mínimo de 30 ensayos.
- Se utilizan tablas y gráficos de control tales como: valores individuales, media móvil, característica móvil, "cusum", etc., para hacer el seguimiento de las variaciones de resistencia, con detección de variaciones y sus tendencias.

La planta debe demostrar, con su controles de producción, que el hormigón al cual pertenece el lote entregado en la obra tiene una resistencia igual o mayor que la especificada. Como la planta dispone de un número grande de ensayos y esa disponibilidad es una condición para la aplicación del Modo 1, el Reglamento requiere una verificación que se realice con herramientas estadísticas. Para ello y a partir del artículo 5.9., se exige que la media aritmética de los ensayos de resistencia del tipo de hormigón del cual proviene el lote que se evalúa, sea igual o mayor que la resistencia especificada más 1,28 por el desvío estándar {4.2.3.4}.

$$f'_{cm} \geq f'_c + 1,28 s_n \quad (5.17)$$

En la verificación se utiliza un valor de desvío estándar calculado con resultados de ensayos pertenecientes a un período mayor de tres meses. Ese período debe ser anterior a la producción del período que se evalúa pues, como explicamos anteriormente, se considera que el desvío estándar es una constante de la planta, o al menos del tipo de hormigón, por lo cual un valor de s anterior puede aplicarse a períodos subsiguientes. Esto es válido siempre que el valor móvil del desvío estándar de los últimos quince (15) ensayos se mantenga acotado dentro del rango $0,63 s_n - 1,37 s_n$.

Si el desvío no se mantiene acotado significa que algo ha cambiado en el proceso productivo. En ese caso se debe calcular un nuevo desvío estándar utilizando los últimos resultados del período en análisis, en el cual se verifique además que todo el hormigón de una misma clase pertenece a la misma población y que está tiene una distribución de frecuencias aproximadamente simétrica.

El cumplimiento de todas las condiciones precedentes habilita para aplicar los criterios de conformidad del Modo 1. Se procede entonces a recibir el lote exclusivamente con los resultados de los ensayos de las muestras extraídas en obra por la Dirección de Obra y ensayadas bajo su responsabilidad.

Se considera que el hormigón evaluado posee la resistencia especificada cuando {4.2.3.5} se cumplen las siguientes condiciones:

- a) La resistencia media móvil de todas las series posibles de tres ensayos consecutivos cualesquiera es igual o mayor que la resistencia especificada.

$$f'_{cm3} \geq f'_c \quad (5.18)$$

- b) El resultado de cada uno de los ensayos es igual o mayor que la resistencia especificada menos **3,5 MPa**.

$$f'_{ci} \geq f'_c - 3,5 \text{ MPa} \quad (5.19)$$

5.6.3. Criterios de conformidad para el Modo 2 de Control

El Modo 2 se aplica cuando se desconocen las condiciones de operación de la planta elaboradora. La recepción del lote se hace en forma similar a lo descrito en el artículo 5.6.2., salvo que los criterios de conformidad utilizan valores límites mayores.

Estos criterios fueron diseñados para que, cuando un lote es recibido con cinco (5) ensayos, y dicho lote pertenece a una población en la cual el 20 % del hormigón posee resistencias por debajo de f'_c y su desvío estándar es igual a 5 MPa, entonces la probabilidad de aceptar dicho lote no conforme es igual al 20 %.

En este caso se considerará que el hormigón evaluado posee la resistencia especificada si se cumplen las dos condiciones siguientes {4.2.4}:

- a) La resistencia media móvil de todas las series posibles de tres ensayos consecutivos, correspondientes al hormigón evaluado, es igual o mayor que la resistencia especificada más 5 MPa.

$$f'_{cm3} \geq f'_c + 5 \text{ MPa} \quad (5.20)$$

- b) El resultado de cada uno de los ensayos será igual o mayor que la resistencia especificada:

$$f'_{ci} \geq f'_c \quad (5.21)$$

5.7. La resistencia media a utilizar para el diseño de la mezcla (dosificación) y la resistencia especificada

En el artículo 5.5. hemos visto que todos los criterios de conformidad tienen una cierta probabilidad de cometer errores al estimar la calidad de un lote, y que el riesgo α del productor es que le rechacen por malo a un hormigón con resistencia superior a la especificada (error de tipo I).

Por esa razón, hace a la política del que elabora el hormigón tomar sus propias precauciones para reducir la probabilidad α de rechazo. Una posibilidad es elaborar un hormigón con menor cantidad de defectuosos probables que el especificado. Esto último es lo que indica el Reglamento CIRSOC 201-2005, en coincidencia con el Código ACI 318-05.

Recordemos que la resistencia especificada f'_c corresponde al fractil del 10 % de defectuosos y se la puede estimar a partir de los valores individuales de ensayos de probetas de una misma población, aplicando la expresión (5.22) donde, como sabemos, el coeficiente 1,28 corresponde a dicho fractil en la distribución de Gauss.

$$f'_c = f'_{cm} - 1,28 s_n \quad (5.22)$$

Cuando se debe construir una estructura proyectada para una f'_c dada, el Reglamento CIRSOC 201-2005 indica {5.2.2} que la mezcla de hormigón a utilizar en esa estructura debe dosificarse con una resistencia media f'_{cr} que resulta de las expresiones (5.23) a (5.26), según el modo de control a aplicar en obra. Debe quedar claro que f'_{cr} es la resistencia que se obtiene en el laboratorio, como promedio de los resultados de las probetas moldeadas con el pastón ajustado durante la dosificación de la mezcla que luego se usará en obra.

En el Modo de Control 1, la resistencia de diseño de la mezcla debe ser mayor que los valores que resulten de aplicar las siguientes expresiones:

$$f'_{cr} = f'_c + 1,34 s_n \quad (5.23)$$

$$f'_{cr} = f'_c + 2,33 s_n - 3,5 \quad (5.24)$$

En el Modo de Control 2, la resistencia de diseño de la mezcla debe ser mayor que el valor que resulte de aplicar las siguientes expresiones:

$$f'_{cr} = (f'_c + 5) + 1,34 s_n \quad (5.25)$$

$$f'_{cr} = f'_c + 2,33 s_n \quad (5.26)$$

El coeficiente 1,34 de las expresiones (5.23) y (5.25) corresponde al fractil del 1 % de defectuosos en la distribución de Gauss de las medias móviles de tres ensayos consecutivos {5.2.2.2} {C.5.2.2.2}, y resulta de considerar:

$$f'_{cr} = f'_c + (2,33 / \sqrt{3}) s_n = f'_c + 1,34 s_n \quad (5.27)$$

Donde el coeficiente 2,33 corresponde al fractil del 1 % de defectuosos en la distribución de Gauss de los valores individuales. Dicho coeficiente es el mismo que aparece en las expresiones (5.24) y (5.26).

Queda claro que el Reglamento CIRSOC 201-2005 está especificando que la mezcla se dosifique para una probabilidad del 1 % de defectuosos con respecto de la resistencia de corte. Para el Modo de Control 1, la expresión (5.23) resulta para una probabilidad del 1 %

de que el promedio de tres resultados de ensayos consecutivos o media móvil sea menor que la resistencia especificada (f'_c). La expresión (5.24) resulta de establecer igual probabilidad de que cada resultado de ensayo o valor individual no se encuentre en más de 3,5 MPa por debajo de la resistencia especificada (f'_c).

De igual manera, en el Modo de Control 2 la expresión (5.25) corresponde a una probabilidad del 1% de que el promedio de tres resultados de ensayos consecutivos sea menor que la resistencia especificada (f'_c) incrementada en 5 MPa. La expresión (5.26) resulta de establecer igual probabilidad de que cada resultado de ensayo sea menor que la resistencia especificada (f'_c).

En el momento de dosificar la mezcla surge el problema de tener que adoptar el valor del desvío estándar s_n . En una planta de hormigón en operación, este valor es característico de la planta y depende de la idoneidad del personal afectado a su producción, del equipamiento y del sistema de calidad. Si se trata de una planta de hormigón elaborado, el desvío estándar a utilizar es el resultante de los últimos meses de producción. Cuando el problema se plantea en una obra puntual que utilizará una planta emplazada en el propio obrador, el desvío estándar debe adoptarse de acuerdo con los antecedentes de esa misma planta operando en obras anteriores. El Reglamento CIRSOC 201-2005 da indicaciones para la adopción del desvío estándar según sea el número de ensayos disponibles en los antecedentes {5.2.2.3} {5.2.3} {C5.2}. En caso de no disponerse de antecedentes, el Reglamento también indica los valores de desvío estándar que deben aplicarse para determinar la resistencia de diseño de la mezcla, en función de la resistencia especificada {5.2.2.5} {C5.2}.

5.8. Evaluación del desarrollo de la resistencia efectiva

En el artículo 5.3. definimos el concepto de resistencia efectiva, que es la que desarrolla el hormigón en la estructura. Los criterios de conformidad que analizamos en los artículos 5.4. a 5.6. nos permiten evaluar si el hormigón que hemos elaborado y transportado a obra posee la resistencia especificada en el Proyecto. Pero ese material todavía debe superar la influencia de las operaciones de colocación y compactación dentro de los encofrados y especialmente la de la protección durante las primeras edades y del curado hasta alcanzar la resistencia deseada. Todas estas operaciones tienen un rol importante en el desarrollo de la resistencia efectiva.

En general se admite que el hormigón colocado alcanzará la resistencia efectiva que requiere la estructura si dicho material posee una resistencia potencial conforme con la especificada, y las operaciones de colocación, compactación, protección y curado se realizan de acuerdo con las reglas del arte, que son las especificadas en los reglamentos. Esta presunción lleva a que todos los reglamentos de seguridad estructural para edificios, incluyendo al Reglamento CIRSOC 201 en sus tres versiones, no establecen como exigencia general la verificación de la resistencia efectiva.

Sin embargo, existen situaciones en que es necesario conocer la resistencia efectiva que el hormigón de la estructura posee en un determinado momento. En el Reglamento CIRSOC 201-2005 ello es obligatorio u opcional en los casos que se detallan a continuación.

- Para dar por terminado el curado del hormigón {5.10.2.1} o su protección en tiempo frío {5.11.6.3}

- Para establecer la oportunidad en que se pueden realizar las operaciones de desencofrado y desapuntalamiento, evitando los tiempos mínimos establecidos en el Reglamento {6.2.2}.
- Como requisito previo para aplicar las cargas propias del proceso constructivo o las cargas de servicio cuando ello se produce a corta edad.
- Para verificar que el hormigón de un determinado elemento estructural puede soportar las cargas de pretensado.
- Para verificar que un elemento estructural prefabricado puede ser trasladado.
- Otras condiciones que sean necesarias por circunstancias propias de la estructura o de su construcción.

Para las situaciones anteriores, el Reglamento CIRSOC 201-2005 admite dos procedimientos para determinar la resistencia efectiva. Permite utilizar, respectivamente, los resultados de ensayos de una serie de probetas moldeadas y la madurez del hormigón. Ambos procedimientos se describen en los artículos 5.8.1. y 5.8.2.

También puede verificarse la resistencia efectiva mediante el ensayo de probetas testigo o testigos extraídos del hormigón endurecido de la estructura. Pero este método no es aplicable o resulta demasiado traumático para los casos descritos en este artículo y por ello el Reglamento no los incluye.

Por el contrario, los testigos son de aplicación para determinar la resistencia efectiva cuando la evaluación de la resistencia potencial con probetas moldeadas indica que un lote es no conforme. Este tema se analiza en el artículo 5.9.

El Reglamento CIRSOC 201-2005 no incluye ensayos no destructivos para las verificaciones de resistencia efectiva tratadas en los artículos 5.8. y 5.9. No obstante, cuando se deban realizar estudios complementarios para recibir una estructura nueva, terminada, el Reglamento admite el empleo de ensayos no destructivos, con métodos normalizados y suficientemente experimentados, para aportar información sobre la homogeneidad del hormigón y complementar los resultados obtenidos con testigos. Pero no pueden usarse en reemplazo de los resultados de resistencias de testigos o de probetas moldeadas, ni como evidencia para decidir la aprobación o el rechazo de un hormigón cuestionado por falta de resistencia {24.6}.

5.8.1. Método del ensayo de probetas moldeadas {4.3.2.}

El desarrollo de la resistencia efectiva de un elemento o conjunto de elementos estructurales se determinará mediante una serie de probetas cilíndricas que se curan en condiciones similares al mencionado elemento. Las probetas se moldean con la misma mezcla y simultáneamente con el elemento estructural. Luego se las mantiene junto a los elementos estructurales que representan, aplicándoles el mismo curado. Dichas probetas se ensayan a edades crecientes hasta que se alcanza la resistencia efectiva deseada. En ese momento también se libera la realización de la operación que motivó la verificación de la resistencia efectiva.

En el procedimiento descrito se ensaya un mínimo de dos probetas por edad y la resistencia efectiva correspondiente es el promedio de los valores obtenidos con esas probetas.

Conviene dar una idea de las edades de verificación de la resistencia efectiva, que serán distintas según el objetivo. En la verificación para aplicar una carga de pretensado a corta edad, puede ser necesario comenzar los ensayos a las 30 horas y reiterarlos a intervalos sucesivos de 6 horas. Si lo que interesa es determinar el momento del desencofrado puede ser necesario realizar el primer ensayo a los 5 días y repetirlos cada 24 horas.

Es recomendable verificar la resistencia potencial simultáneamente con la determinación de la resistencia efectiva, utilizando probetas moldeadas con el mismo pastón. Todos los ensayos deben realizarse utilizando los métodos descritos en las normas IRAM 1524 y 1546. La cantidad de probetas a ensayar se deberá establecer de acuerdo con las variables a controlar, las diferentes edades de ensayo a las que se estime necesario ensayarlas y la importancia del elemento estructural.

Cuando se construyan elementos estructurales en hormigón pretensado, se recomienda realizar estos controles sobre cada elemento estructural o conjunto de elementos estructurales construidos con un mismo pastón de hormigón.

5.8.2. Método de la madurez del hormigón {4.3.3.}

Sabemos que la hidratación del cemento, y consecuentemente el desarrollo de resistencia del hormigón, está afectado por el transcurso del tiempo y por la temperatura a la que se produce la hidratación. Por lo tanto podemos considerar que la resistencia es una determinada función del tiempo t y de la temperatura T . Las investigaciones realizadas sobre este tema llevaron a definir el concepto de madurez o maduración (maturity) del hormigón como una función del producto del tiempo por la temperatura.

$$\text{Madurez} = f(t \cdot T)$$

Para aplicar el concepto de madurez es necesario determinar la temperatura por debajo de la cual el hormigón no desarrolla resistencia con el tiempo. Diferentes autores consideran que ello ocurre entre los -10 y -20°C , siendo la primera de esas temperaturas la que ha merecido mayor consenso.

La función empírica que posiblemente tenga la mejor correlación con la resistencia es la de Nurse-Saul [506], que presenta la siguiente expresión (5.28):

$$M = \sum(T_i + 10) \Delta t_i \quad (5.28)$$

siendo:

M la madurez en ($^{\circ}\text{C}$ por días).

T_i la temperatura media de curado, en $^{\circ}\text{C}$, durante el intervalo de tiempo Δt_i .

Δt_i el intervalo de tiempo, en días.

La constante 10, en °C, tiene en cuenta lo expresado anteriormente con respecto a que la hidratación se desarrolla para temperaturas mayores que -10°C.

A cualquier edad, la madurez depende de la historia de curado del hormigón y determina el grado de desarrollo de las propiedades de dicho hormigón. Para un determinado hormigón definido por sus proporciones y las propiedades de sus materiales componentes, la resistencia y el módulo de elasticidad son funciones de la madurez.

$$R = f (M) \quad (5.29)$$

$$E = g (M) \quad (5.30)$$

Las expresiones (5.29) y (5.30) son válidas con independencia de la historia del curado. Para igual madurez resulta la misma resistencia y módulo de elasticidad. Ello significa por ejemplo, que si una mezcla tiene 30 MPa de resistencia a 28 días con curado constante a 20°C, y en la obra las temperaturas efectivas en la masa del hormigón son de 40°C, la resistencia de 30 MPa se obtendrá a una edad menor.

El método de la madurez para evaluar el desarrollo de la resistencia efectiva asume la expresión (5.29) y relaciona la resistencia efectiva (R) de un determinado hormigón con el valor de su madurez (M). Dicha expresión vinculante se determina experimentalmente en el laboratorio mediante ensayos a compresión de probetas moldeadas. También se calcula la madurez de las probetas en el momento de cada ensayo. Con el conjunto de valores R_i ; M_i se calcula la curva de regresión que luego se aplica a la evaluación de la resistencia efectiva de la estructura. Se reitera que esa curva es válida únicamente para el hormigón con el cuál fue obtenida. Su obtención y aplicación se detalla en los párrafos que siguen.

Con el mismo hormigón a utilizar en obra (iguales materiales y dosificación) se moldean probetas cilíndricas de un mismo pastón, en cantidad suficiente para ser ensayadas a distintas edades, y una probeta testigo para medir sobre ella las temperaturas de curado en función del tiempo. Es conveniente repetir el moldeo en días distintos. Las edades de ensayo se deben adoptar en función del tipo de estructura a construir y las razones de aplicación del método. Como orientación general, de las siguientes edades se pueden seleccionar las que sean de aplicación a la evaluación a realizar: 6, 9, 12 y 18 horas, y 1, 2, 3, 7, 28, 60 y 90 días.

Las probetas moldeadas se curan en laboratorio según las normas IRAM 1524 ó 1534. Durante el curado se mide la temperatura en el interior de la probeta testigo, a intervalos frecuentes y se registra el valor obtenido y la edad a la que se obtuvo. Con esos valores se calcula la madurez del hormigón a cada edad de ensayo a compresión, aplicando la expresión 5.28. A las edades preestablecidas se ensayan las probetas a compresión. Con los valores de madurez y resistencia correspondientes a cada edad se ajusta la curva de regresión. La Figura 5.12. muestra una curva obtenida con el método descripto.

Con la curva de correlación ajustada se evalúa la resistencia efectiva de la estructura. Para ello se mide la temperatura del hormigón en el interior del elemento estructural o sector de estructura de la cual se quiere conocer la resistencia, a períodos de tiempo preestablecido, utilizando termocuplas u otro tipo de sensor empotrado en la masa del hormigón. Es conveniente registrar temperatura-tiempo en forma continua. Cuanto

menores sean los intervalos entre mediciones sucesivas, más representativo resultará el valor de la madurez. Con los valores (T_i ; t_i) medidos en la estructura y la expresión (5.28) se calcula la madurez del hormigón en el instante de la evaluación. Entrando al gráfico de correlación con la madurez calculada se obtiene la resistencia a compresión que le corresponde.

La aplicación del método exige que el hormigón colocado en la estructura tenga la misma resistencia potencial que el hormigón de laboratorio con el que se obtuvo la curva resistencia-madurez {C.4.3.3}.

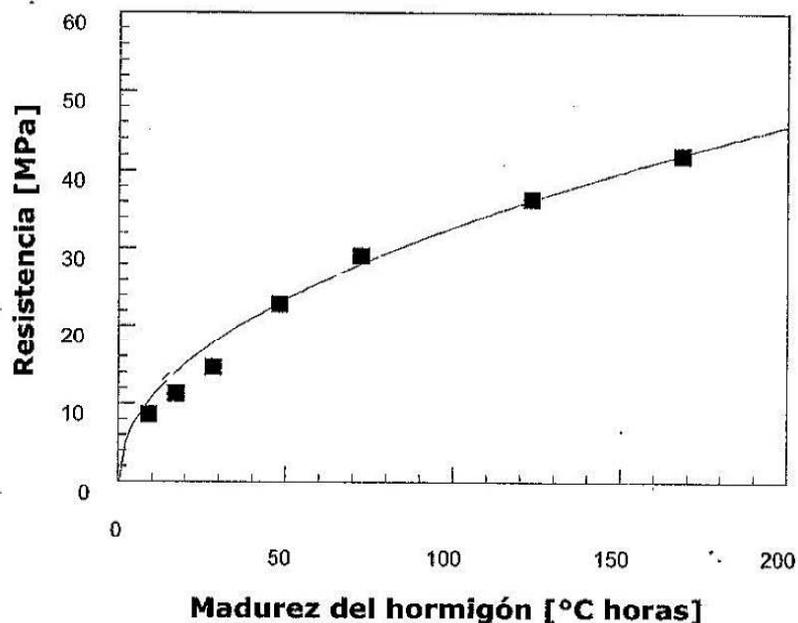


Figura 5.12. Curva Resistencia-Madurez de una mezcla de hormigón.

5.8.3. Ejemplo de aplicación del método de madurez del hormigón

Para construir la bóveda de un túnel de hormigón semi-masivo se utilizó un encofrado metálico deslizante. Por cuestiones programáticas, el desapuntamiento y desencofrado de dicha bóveda se debió realizar a una edad igual o menor que 24 horas, contadas a partir de finalizada la colocación del hormigón. De acuerdo con lo requerido por los Documentos del Proyecto, la resistencia del hormigón en el momento de desapuntar y desencofrar la bóveda debía ser de 3,5 MPa.

Aplicando el método descrito en el artículo 5.8.2., en el laboratorio se obtuvieron los valores de la Tabla 5.7. y la curva de resistencia-madurez de la Figura 5.13.

Posteriormente, en la estructura, con termocuplas colocadas en el hormigón de la bóveda se midió la variación de temperatura a intervalos de 1 hora durante un período de 22 horas (Tabla 5.8.). Con esas temperaturas se calculó la madurez del hormigón en la

estructura, y con dichos valores se entró en el gráfico de correlación resistencia-madurez de la Figura 5.13. y se estimaron las resistencias a compresión a las edades de 16, 18, 20 y 22 horas, que se indican en la Tabla 5.9. Ello permitió determinar que a las 20 horas el hormigón tenía una resistencia efectiva de 3,9 MPa, que superaba la requerida por el proyecto (3,5 MPa) para desencofrado de la bóveda.

Tabla 5.7. Resistencia y madurez obtenidas en laboratorio

Edad	Resistencia a compresión	Madurez
Horas	MPa	°C horas
15,5	1,0	446
17,5	1,2	510
21,5	2,4	639
24,0	3,3	719
39,5	6,2	1198
44,5	6,9	1350
48,0	7,5	1455

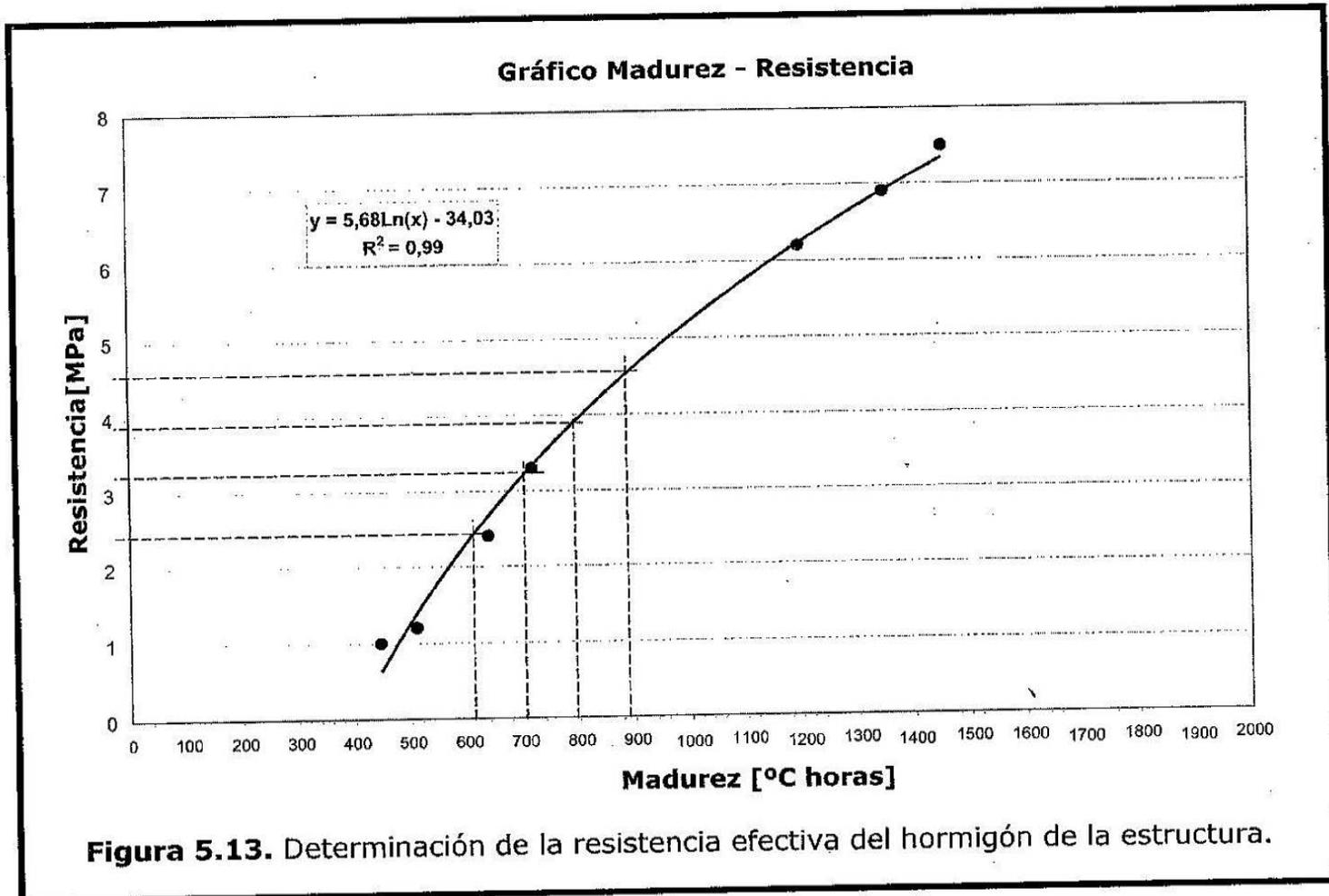


Tabla 5.8. Temperatura y madurez en la estructura

Edad	Temperatura hormigón	Madurez
Horas	°C	°C horas
0,0	23,0	0
1,0	23,0	33
2,0	23,2	66
3,0	23,8	100
4,0	24,5	134
5,0	25,5	169
6,0	26,8	205
7,0	27,8	242
8,0	28,9	281
9,0	29,9	320
10,0	31,1	360
11,0	31,8	402
12,0	32,0	444

Edad	Temperatura hormigón	Madurez
Horas	°C	°C horas
13,0	32,3	486
14,0	32,8	529
15,0	33,1	571
16,0	33,8	615
17,0	34,1	659
18,0	34,3	703
19,0	35,1	748
20,0	35,2	793
21,0	35,0	838
22,0	35,2	883
23,0		
24,0		

Tabla 5.9. Resistencia efectiva del hormigón de la estructura

Edad	Madurez	Resistencia a compresión
Horas	°C horas	MPa
16,0	615	2,4
18,0	703	3,2
20,0	793	3,9
22,0	883	4,6

5.8.4. Un ejemplo que ilustra sobre la información aportada por el método de madurez

Al comienzo del artículo 5.8. se dijo que el Reglamento CIRSOC 201-2005 admite dos métodos para evaluar la resistencia efectiva {4.3}, que hemos descrito en los artículos 5.8.1. y 5.8.2.

Sin perjuicio de su idoneidad debemos señalar que, dependiendo de las dimensiones transversales mínimas del elemento estructural a evaluar, los resultados pueden no ser iguales. Ello se debe a que en la estructura se puede producir un aumento de temperatura

por calor de hidratación del cemento que aumenta la madurez con relación a la que se produce en la probeta curada al lado de la estructura, aunque ambas estén expuestas a las mismas condiciones medio ambientales. La Figura 5.14. corresponde a la construcción de un viaducto en la Argentina.

La parte superior de la Figura 5.14. contiene la curva madurez-resistencia del hormigón del viaducto. La parte inferior muestra las curvas madurez-edad del hormigón correspondiente a las probetas moldeadas de 15 cm de diámetro y a la estructura.

Las vigas del viaducto se tesaban cuando el hormigón tenía 18 MPa de resistencia efectiva. Ello se lograba a las 21:30 horas en la estructura y a las 32:30 horas en las probetas. La utilización del método de madurez con mediciones en las vigas permitió acortar en medio día el ciclo de construcción y tesado de cada viga, con el consiguiente acortamiento del programa de obra.

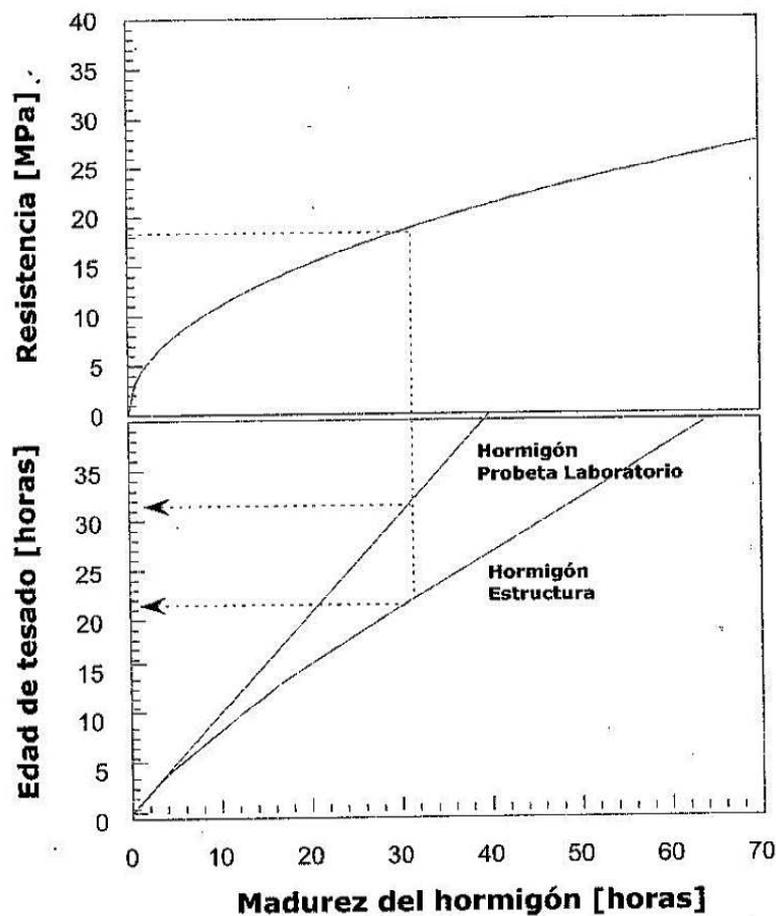


Figura 5.14. Madurez y resistencia en elementos de distinta masa.

5.9. Verificaciones a realizar cuando un lote no posee la resistencia potencial especificada

Puede ocurrir que la evaluación de la resistencia potencial aplicando los criterios de conformidad indique que un lote es no conforme. Esto no implica su inmediato rechazo dado que pueden hacerse otras verificaciones antes de concluir que ese lote no posee la resistencia especificada. El Reglamento CIRSOC 201-2005 da la posibilidad de verificar la resistencia efectiva del hormigón colocado en la estructura mediante la extracción y ensayo de testigos {4.4}.

Se debe enfatizar que los procedimientos de ensayo y evaluación y los correspondientes criterios de conformidad contenidos en {4.4} son de aplicación exclusiva a estructuras en construcción en las que se haya verificado la resistencia potencial descrita en el artículo 5.6. de este Capítulo. Dichos procedimientos no pueden ser aplicados a estructuras existentes o a estructuras en construcción en las que se carezca de resultados de ensayos de probetas moldeadas {4.4.1.}. En estas situaciones se necesitan planteos conceptuales y metodologías de evaluación que exceden el alcance del Reglamento.

En los casos contemplados por el Reglamento es necesario acotar el lote o fracción del lote de hormigón no conforme, establecer en que sector de la estructura se colocó ese hormigón y extraer del mismo una cantidad de testigos igual o mayor que dos (2) veces el número de muestras de hormigón fresco que le hubiera correspondido según el Modo 2 de control {4.2.2}.

Los lugares de extracción de testigos deben ser cuidadosamente seleccionados con la participación del Proyectista Estructural, a efectos de no provocar daños adicionales a la estructura. Asimismo, la extracción y ensayo de los testigos debe ser supervisada por la Dirección de Obra.

Los testigos se extraen con equipos que no alteren al hormigón. Habitualmente se utiliza una máquina extractora provista de broca con corona de diamantes, refrigerada con agua. La operación tiene que ser lenta para no romper ni disgregar los testigos y evitar que durante el calado se intercepten armaduras.

El diámetro de los testigos tienen que ser igual o mayor que tres (3) veces el tamaño máximo del agregado grueso, y no menor que 7,5 centímetros, y la relación altura/diámetro será en lo posible igual a 2, y nunca menor que 1. Si la relación de esbeltez resulta menor que 2, los resultados de resistencia se deben corregir para referirlos a dicha condición de esbeltez.

Todas las operaciones anteriores se deben realizar aplicando las normas IRAM 1551-83 e IRAM 1546-92.

El Reglamento CIRSOC 201-2005 considera que el hormigón del elemento estructural o del sector de la estructura a la que pertenecen los testigos ensayados, posee la resistencia especificada si se cumplen los criterios de conformidad que se dan a continuación:

Modo 1

$$f'_{ci} \geq 0,75 f'_c \quad (5.31)$$

$$f'_{cm} \geq 0,85 f'_c \quad (5.32)$$

Modo 2

$$f'_{ci} \geq 0,75 f'_c \quad (5.33)$$

$$f'_{cm} \geq 0,85 (f'_c + 5 \text{ MPa}) \quad (5.34)$$

siendo:

f'_{ci} la resistencia individual de cada testigo, y

f'_{cm} la resistencia media de los testigos extraídos del elemento estructural o del sector de la estructura de hormigón que se evalúa.

Los criterios de las expresiones anteriores son menos exigentes que sus correspondientes (5.18) a (5.21) para evaluar la resistencia potencial. En coincidencia con comentarios anteriores sobre este mismo tema, esta menor exigencia se debe a que al evaluar la resistencia efectiva ha desaparecido la incertidumbre del resultado de las operaciones de colocación, compactación, protección y curado del hormigón. La resistencia efectiva ya ha superado y tiene incluida la influencia de esas variables.

5.10. Referencias

[501] American Concrete Institute. "Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete ACI 214-77". Re-aprobada en 1997.

[502] Giovambattista A. et al. "Estudios para obras varias". 1990-2007.

[503] Estudio de Tecnología Aplicada. Reflexiones sobre el Resultado de Ensayos de Control de Calidad del Hormigón de las Estructuras que se construyen en la Ciudad de La Plata. Anales del LEMIT, serie II, No. 253, 1974, p79/88.

[504] Jurán J. M.; Gryna F.M. "Análisis y planeación de la calidad." Mac Graw Hill, Tercera Edición, 1994.

[505] Chen Ji-fa, Han Su-fang, Wu Chuan-yi. Criteria for acceptance testing on strength of concrete. Proceedings of RILEM Congress on Quality Control of Concrete Structures, Estocolmo, Suecia, 1979.

[506] Mindness S., Young J.F. "Concrete". Prentice Hall Inc., ISBN 013-167106-5, 1981.

[506] ACI 214-02. "Evaluation of strength tests results of concrete". ACI Manual of Concrete Practice, 2002.

[507] Fava A.S.C. "Procedimientos y medios disponibles para incrementar la productividad en el campo de la tecnología del hormigón". L.E.M.I.T., Serie II, N°129, 1968.