

El control de calidad del Hormigón de Alta Resistencia

M^o PILAR ALAEJOS GUTIÉRREZ (*)
MANUEL FERNÁNDEZ CÁNOVAS (**)

RESUMEN En el presente artículo se muestran resultados de ensayos realizados sobre distintos aspectos del control de calidad del hormigón de alta resistencia. Los ensayos actualmente utilizados para evaluar la consistencia y resistencia del hormigón (ambas propiedades prescriptivas por la normativa vigente de control del hormigón), originan problemas aplicados al hormigón de alta resistencia. En el artículo se proponen modificaciones o procedimientos de ensayo alternativos a los actuales, para realizar un adecuado control de calidad de este material. Otros aspectos tales como el coeficiente de paso de probeta cilíndrica a cúbica también han sido analizados y se han realizado propuestas para incluirse en futuras revisiones de la normativa española del hormigón.

QUALITY CONTROL OF HIGH-RESISTANT CONCRETE

ABSTRACT This article presents the results of tests carried out on different aspects of quality control of high-strength concrete. The tests currently used to evaluate the consistency and resistance of concrete (both these properties being stipulated in the present concrete code), cause problems when applied to high-strength concrete. In this article we propose modifications or alternative test methods to the present ones, in order to ensure an adequate quality control of this material. Other aspects such as the coefficient to convert results on cylindrical specimen to cubic specimen have also been analyzed and proposals have been put forward to be included in future revisions of the Spanish code on concrete.

Palabras clave: Control de calidad; Hormigón de alta resistencia; Normativa; Consistencia; Resistencia; Probeta; Método de ensayo.

1. INTRODUCCIÓN

Un adecuado control de calidad de los materiales y el proceso de ejecución en obra resulta imprescindible si se quiere garantizar la calidad del producto acabado, el hormigón.

La normativa internacional recoge los procedimientos de ensayo para ejercer el control y su frecuencia según el grado en que éste se realice.

Los procedimientos de ensayo, válidos para hormigón normal, plantean nuevos problemas cuando se utilizan para controlar un Hormigón de Alta Resistencia. Ensayos tradicionales como el refrentado de probetas cilíndricas o la medida de la consistencia del hormigón no presentan la misma fiabilidad en estos hormigones especiales.

Otros aspectos asociados a las labores de control de calidad cobran especial importancia cuando se pone en obra un hormigón de elevada calidad. Es necesario asumir las variaciones que introducirán en la resistencia, las variaciones en las propiedades de los materiales componentes, así como las que introduzcan los procedimientos de ensayo. Para ello, es necesario determinarlas con anterioridad y controlar su evolución.

El estudio comparativo de normativa internacional que introduce la probeta cúbica como la estándar, hace necesario comprobar los coeficientes de paso de probeta cilíndrica a cúbica para hormigón de alta resistencia. La probeta cúbica, además, presenta la ventaja de no necesitar la utilización de material de refrentado para su ensayo a compresión.

El presente estudio ha pretendido aportar información útil para ejercer un adecuado control de calidad del hormigón de alta resistencia, previniendo problemas que pueden presentarse.

2. INFLUENCIA DE DISTINTAS PARTIDAS DE MATERIALES

La totalidad del plan de ensayos tuvo una duración aproximada de tres años. Durante este tiempo se fueron recibiendo distintas partidas de los materiales que se estaban utilizando. En cuanto a la uniformidad de los materiales, se expondrán a continuación los resultados obtenidos.

En el Cuadro 1 se muestran los resultados de fraguado y resistencias de las distintas partidas del CEMENTO I-45A utilizado en el plan de ensayos, en las que se observa bastante variación en las propiedades. La influencia de una u otra partida sobre la resistencia del hormigón (para tres dosificaciones distintas) se muestra en el mismo Cuadro. Efectivamente, aquellas partidas de cemento con mayor resistencia incrementaron a su vez la resistencia del hormigón. Debido a esta causa se registraron variaciones de resistencia en torno al 5%. En este cuadro aparecen amasadas fabricadas todas con la misma partida de superplastificante, que como veremos a continuación tiene también una gran importancia.

(*) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. División de Tecnología de Hormigones. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX (MOPTMA).

(**) Dr. Ingeniero de Construcción. Catedrático de Materiales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.

PARTIDA	FECHA	MORTERO		RESISTENCIAS (MPa)		HORMIGÓN		
		FRAGUADO				RESISTENCIAS (28d) (MPa)		
		PPO	FIN	2 DÍAS	28 DÍAS	DOSIF. A	DOSIF. B	DOSIF. C
1ª	12-12-90	4 H - 15'	5 H - 45'	24,6	47,7	—	—	—
2ª	2-12-91	3 H - 45'	4 H - 40'	29,4	57,7	69,5	84,8	—
3ª	3-2-92	3 H - 15'	4 H - 15'	21,2	48,9	67	78	102,9
4ª	23-4-92	2 H - 30'	3 H - 45'	24,2	46,1	66	—	96,4
5ª	12-4-93	3 H - 15'	4 H - 30'	26,5	53,6	—	—	—

CUADRO 1. Influencia partidas del cemento.

En la Fig. 1a se muestra la influencia de dos partidas distintas de aditivo SUPERPLASTIFICANTE sobre la consistencia del hormigón, medida en Cono de Abrams. Todas las amasadas se fabricaron con la misma partida de cemento (4ª partida). En abscisas aparecen contenidos distintos de aditivo, del 2 al 2,75% en peso de cemento. En todos los casos se trata de una mezcla con 450 kg/m³ de cemento y un

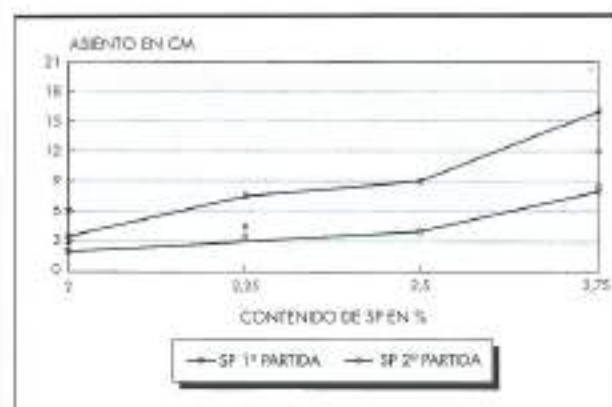


FIGURA 1a. Influencia del superplastificante en la consistencia.

Asimismo, en los gráficos se muestra la influencia del incremento del contenido de aditivo sobre consistencia y resistencia. Un mayor contenido de aditivo mejora la consistencia del hormigón, favoreciendo su compactación. Además mayores contenidos de superplastificante dispersan un mayor número de partículas de cemento, facilitando de esta manera el acceso del agua a ellas y por tanto mejorando su hidratación. Ambas causas tienen una repercusión directa sobre la resistencia del hormigón.

La influencia de la uniformidad del cemento y el aditivo sobre las resistencias obtenidas es muy importante si se tiene en cuenta que los datos que se muestran aquí separadamente pueden ser acumulativos.

Se recibieron cuatro partidas distintas de HUMO DE SÍLICE durante el plan de ensayos. A cada partida se le determinó el contenido de dióxido de silicio en la División de Química Inorgánica. Los resultados fueron para las cuatro partidas de: 96,8%, 92,9%, 90,0% y 95,3%. Aunque hubo cierta oscilación en el contenido de SiO₂ del humo de sílice, siempre estuvo por encima del 90%.

Estas variaciones pudieron influir en la resistencia del hormigón, aunque no fue posible comprobarlo, ya que nue-

15% de microsilice. La primera partida de superplastificante proporcionó en general mejores consistencias que la segunda. Esto se reflejó claramente en la resistencia, como se muestra en la Fig. 1b: Se registraron disminuciones de resistencia de alrededor del 5% con la 2ª partida de aditivo, las mismas que se observaron por falta de uniformidad en las partidas de cemento.

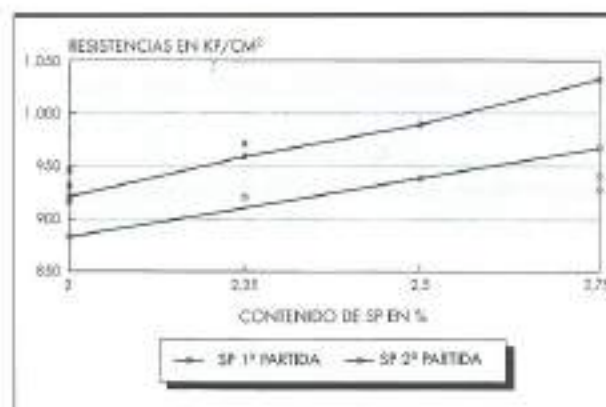


FIGURA 1b. Influencia del superplastificante en la resistencia.

vas partidas de microsilice se sucedían conjuntamente con otras de cemento y aditivo, por lo que no se dio la situación de tener resultados de la misma dosificación variando únicamente este parámetro. Si se tiene en cuenta los resultados presentados en la Fig. 2, en el rango de variabilidad de contenido de SiO₂ observado en este estudio no debieran haberse producido disminuciones de resistencia notables. Según las regresiones dibujadas en dicha figura, para el margen 90-97% podrían haberse detectado disminuciones medias del 3,5% aproximadamente.

3. MEDIDA DE LA CONSISTENCIA Y SU EVOLUCIÓN EN EL TIEMPO

La medida de la consistencia de un hormigón es un ensayo preceptivo antes de ponerlo en obra. Conseguir un hormigón trabajable es de vital importancia para lograr que llegue a todos los puntos del encofrado con facilidad y para obtener la compacidad adecuada sin la cual no se consigue la resistencia necesaria. En hormigón convencional se utiliza el ensayo de Cono de Abrams, muy sencillo de realizar incluso a pie de obra. En hormigones de alta resistencia la bibliografía

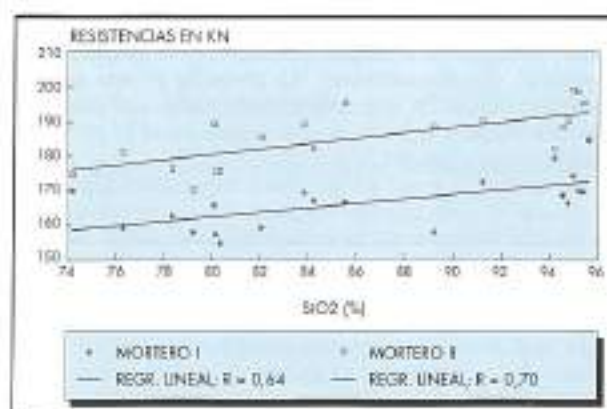


FIGURA 2. Influencia de la MS en la resistencia (datos de Larrard et al, 1990).

fia parece indicar que este ensayo no refleja la trabajabilidad real del hormigón, al resultar éste muy cohesivo incluso para conos muy altos.

A lo largo de todo el plan de ensayos, la consistencia de las amasadas se midió mediante dos ensayos: Cono de Abrams y mesa de sacudidas. Los resultados experimentales mostraron que la sensibilidad de la mesa de sacudidas es mayor para determinar qué grado de consistencia real tiene la mezcla, para hormigones de alta resistencia, sobre todo cuando se trata de consistencias muy fluidas. Los resultados de ambas formas de medir la consistencia, mesa y cono, a lo largo de todo el plan de ensayos, permitieron el conocer la relación existente entre ambos ensayos, obtenida experimentalmente, y compararla con las propuestas ya existentes sobre este tema.

En la Fig. 3 se muestran algunos de los resultados experimentales de consistencia obtenidos. Aparece dibujada la curva correspondiente a los datos del Cuadro 2a (relación cono-mesa para hormigón convencional, tomado del Manual del Instituto Eduardo Torroja "Dosificación de hormigones" de F. Arredondo), lineal para cada tramo, aunque la curva total corresponde a una parábola de segundo grado. Asimismo, se han dibujado con un círculo los resultados experimentales obtenidos en mezclas de relación agua/cemento superior a 0,4 (y bajo contenido de aditivo), que se distribuyen perfectamente alrededor de esta curva. Los resultados experimentales de consistencia para aquellas mezclas en las que se utilizó una elevada cantidad de aditivo superplastificante, debido a su baja relación agua/cemento no se ajustan a la curva de relación cono-mesa para hormigón normal. Se ha dibujado el ajuste experimental a estos datos, estableciendo una correlación lineal por tramos. Estos límites de tramos en forma de tabla se muestran en el Cuadro 2b. Se pueden realizar varias observaciones:

CONSISTENCIA	CONO ABRAMS (CM)	MESA SACUDIDAS (%)
SECA	0 - 2	0 - 40
PLÁSTICA	2 - 5	40 - 70
BLANDA	5 - 11	70 - 100
FLUIDA	11 - 20	100 - 130

CUADRO 2a. Relación cono-mesa hormigón normal.

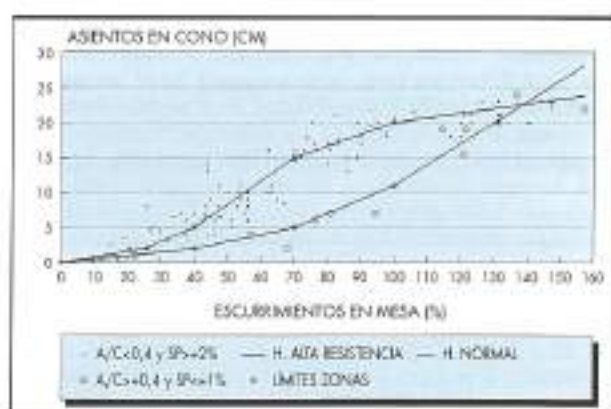


FIGURA 3. Relación cono-mesa.

CONSISTENCIA	CONO ABRAMS (CM)	MESA SACUDIDAS (%)
MUY SECA	0 - 2	0 - 25
SECA	2 - 5	25 - 40
PLÁSTICA	5 - 15	40 - 70
BLANDA	15 - 20	70 - 100
FLUIDA	20 - 25	100 - 145

CUADRO 2b. Relación cono-mesa hormigón de alta resistencia.

- El cono no resulta un método adecuado para medir la consistencia de estos hormigones, ya que sobreestiman la consistencia real del hormigón. Comparando los Cuadros 2a y 2b, intervalos iguales de cono producen resultados de mesa muy inferiores en hormigones de alta resistencia comparados con los hormigones normales, y por tanto peor trabajabilidad.
- No proporciona la misma trabajabilidad un cono elevado en hormigón normal que un cono elevado en estos hormigones. Lo que se considera consistencia fluida en hormigón normal, comienza a partir de los 20 cm en hormigón de alta resistencia.
- Por encima de los 20 cm, el cono apenas es sensible a un incremento de la trabajabilidad en estos hormigones, que sin embargo sí detecta la mesa. Esto se observa en el tramo final casi horizontal del ajuste experimental obtenido.
- La mesa de sacudidas puede introducir errores con consistencias muy secas, ya que los golpes de las sacudidas producen un derrumbe parcial de la mesa, en vez de extenderse paulatinamente.

Por otra parte, los ensayos que se hicieron sobre la evolución de la consistencia en el tiempo, cuando se utilizan superplastificantes quedan reflejados en las Figs. 4a y 4b. En dos masas de distinta consistencia se fueron tomando medidas de cono y mesa a intervalos de tiempo de 15 minutos.

La masa 1 de consistencia muy fluida, al cabo de 90 minutos presentaba aún un asiento de 19 cm. Aunque el Cono de Abrams apenas detectó disminución de trabajabilidad, la mesa lo reflejó perfectamente. La masa 2, aunque presen-

taba un cono muy parecido a la primera, era mucho menos fluida, como se constata en la diferencia de mesas entre las dos. Esta diferencia permanece constante en el tiempo, haciendo disminuir la trabajabilidad muy rápidamente. En este caso, al encontrarse en los dominios de consistencia blanda, plástica y seca, el cono también acusa esta disminución. La mesa de sacudidas, sin embargo, vuelve a reflejarse como más fiable para detectar la trabajabilidad real del hormigón con superplastificante, en todo el rango de consistencias.

Estos ensayos se realizaron con temperatura ambiente de 20° C, aunque la temperatura del hormigón osciló entre los 25 y 28° C. Temperaturas superiores previsiblemente acelerarán el proceso de pérdida de trabajabilidad del hormigón.

Las Figs. 4a y 4b reflejan la necesidad de partir de una consistencia muy líquida si el hormigón va a permanecer sin colocarse un período largo de tiempo, ya que la trabajabilidad disminuirá gradualmente en el tiempo, y si no se tiene suficiente margen la masa se convertirá en intrabajable en un corto espacio de tiempo.

4. DISPERSIÓN DE LOS RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

No es muy amplia la Bibliografía sobre las variaciones que se deben esperar en probetas de hormigón compañeras de la misma amasada. El control de calidad del hormigón en obra se hace en base a adjudicar un valor a la resistencia del hormigón con ensayos procedentes de determinadas amasadas. La introducción EH-91 prescribe que este valor se tome en función de los resultados de resistencia de un mínimo de tres probetas. El valor adjudicado a la amasada es el valor medio de los resultados de las tres probetas. Asimismo, y ya en comentarios, la Instrucción indica la consideración de resultados anómalos cuyo valor difiera en más de un 15% del valor medio de la amasada.

Lo normal es que los resultados obtenidos de las probetas de una misma amasada difieran entre sí. Las causas pueden proceder de cualquiera de las fases de fabricación o ensayo de las probetas (J. Calavera, 1975).

Es aconsejable que la Normativa refleje la variación que se puede esperar del propio ensayo, para detectar errores de procedimiento en su realización, cuando se supere dicha variabilidad asociada al ensayo. En la Norma americana de

"Método de ensayo de la resistencia a compresión de las probetas cilíndricas de hormigón" (ASTM C39), el apartado "10. Precisión", dice textualmente: "La precisión de este método de ensayo aún no ha sido determinada, aunque se están recogiendo datos, y se incluirá una reseña sobre la precisión cuando se haya formulado".

Por tanto, y a pesar de la extensa experiencia que existe en cuanto al hormigón como material de construcción, aun no ha sido determinada la variación que se puede esperar cuando se rompen una serie de probetas de hormigón procedentes de la misma amasada con la actual normativa de ensayos.

El ACI Standard "Práctica recomendada para la evaluación de los resultados de ensayo de resistencia del hormigón (ACI 214-77)" establece que las variaciones que se observan en los resultados de ensayos a compresión de hormigón son debidas a dos fuentes principales: a) diferencias en las propiedades de la masa de hormigón y sus componentes, y b) diferencias originadas por variaciones inherentes al ensayo. Estas últimas pueden incluso no existir en el hormigón realmente puesto en la obra, aunque influyen en su control, pudiendo llegar a penalizarlo. De aquí la necesidad de aquilatar al máximo este tipo de variaciones. Ambas fuentes de variaciones las denomina el ACI 214:

- Variaciones intra-ensayo: Aparecen en grupo de probetas de una muestra de hormigón tomada de una amasada determinada. Se determinan en base al rango de los resultados de resistencia de las probetas compañeras, y al número de éstas que se utilicen en el control.
- Variaciones amasada-a-amasada: Debidas a errores en los componentes, amasado, toma de muestras, etc. Se determinan mediante la desviación estándar de los resultados de un número determinado de amasadas.

La desviación total, que incluye ambas fuentes de error es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones intra-amasada y entre-amasadas.

El ACI 214 delimita los valores de desviación total y variación intra-amasada, según que el hormigón se fabrique en laboratorio o en obra, existiendo distintos niveles de control (de excelente a pobre), según se muestra en el Cuadro 3.

La ventaja de controlar tanto la desviación intra-amasada como la inter-amasada proviene de delimitar más fá-

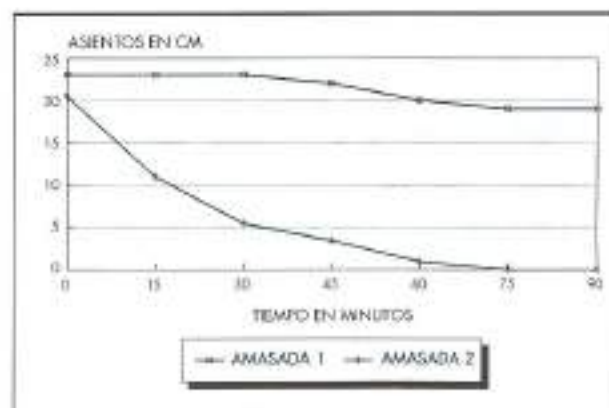


FIGURA 4a. Evolución consistencia en el tiempo Cono de Abrams.

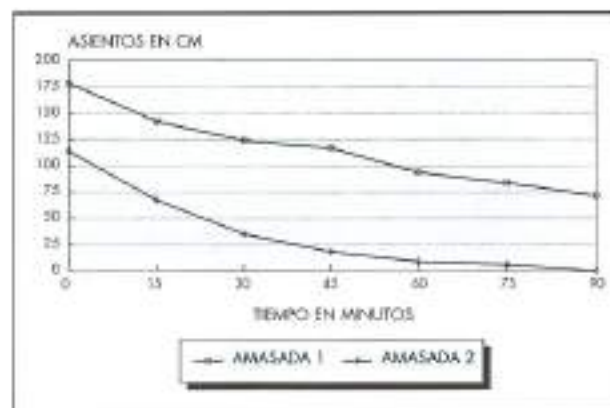


FIGURA 4b. Evolución consistencia en el tiempo mesa de sacudidas.

VARIACIÓN TOTAL ACI 214					
DESVIACIÓN TOTAL PARA DIFERENTES GRADOS DE CONTROL (KP/CM ²)					
CLASE DE OPERACIÓN	EXCELENTE	MUY BUENA	BUENA	CORRECTA	POBRE
ENSAYOS DE CONTROL EN OBRA	MEJOR DE 28,1	28,1 A 35,2	35,2 A 42,2	42,2 A 49,2	MAYOR DE 49,2
AMASADAS DE PRUEBA EN LABORATORIO	MEJOR DE 14,1	14,1 A 17,6	17,6 A 21,1	21,1 A 24,6	MAYOR DE 24,6

VARIACIÓN INTRAENSAYO ACI 214					
COEFICIENTE DE VARIACIÓN INTRAENSAYO PARA DIFERENTES GRADOS DE CONTROL (%)					
CLASE DE OPERACIÓN	EXCELENTE	MUY BUENA	BUENA	CORRECTA	POBRE
ENSAYOS DE CONTROL EN OBRA	MEJOR DE 3	3 A 4	4 A 5	5 A 6	MAYOR DE 6
AMASADAS DE PRUEBA EN LABORATORIO	MEJOR DE 2	2 A 3	3 A 4	4 A 5	MAYOR DE 5

CUADRO 3.

cilmente las fuentes de errores posibles. Hay que tener en cuenta que controlar las desviaciones intra-amasada originadas por irregularidades en los procedimientos de ensayo seguidos, ayudará considerablemente a mejorar el control de calidad e incluso a evitar penalizaciones innecesarias que pueden estar produciéndose en la resistencia real del hormigón.

En una determinada fase del plan de ensayos se hicieron numerosas probetas prismáticas de $15 \times 15 \times 60$ para determinar la resistencia a flexotracción del hormigón. Después de realizado el ensayo, la probeta se rompe en dos semiprismas normalmente iguales. Al igual que se hace con las probetas de mortero, se decidió romper posteriormente estos semiprismas a compresión, interponiendo unas placas cuadradas de 15 cm de lado. Este ensayo está normalizado por la BS 1881; Part. 119, y por la ASTM C116.

Se aplicaron las especificaciones del ACI 214 para obtener valores comparativos de variación a compresión para los semiprismas y los cilindros. Para el caso de variación intra-amasada, los resultados son los que aparecen en las Figs. 5a y 5b. Se observa que las probetas cilíndricas de la misma amasada proporcionan resultados anómalos al crecer la

resistencia, comenzando a presentarse al acercarse a los 700 kp/cm^2 . Estos problemas no aparecieron con los semiprismas. Independientemente de la forma de la probeta, el ensayo a compresión de los cilindros incluye un factor de variación que no tienen los cubos; el refrentado. Éste se perfila como el posible origen de las dispersiones detectadas.

También se observa en las figuras el fuerte incremento de la desviación y un incremento más leve del coeficiente de variación obtenido al subir la resistencia. Estos incrementos también se apreciaron al calcular desviación y coeficiente de variación totales (incluyendo variación intra-amasada e inter-amasada).

Examinando la clasificación del ACI 214 (Cuadro 3) y en comparación con los resultados obtenidos, ésta adolece de ciertas carencias:

- Los resultados experimentales demuestran que la desviación total crece con el nivel de resistencia. Por ello, no parece lógico exigir la misma desviación a una serie de probetas de 400 kp/cm^2 de resistencia media que a otras con 1.000 kp/cm^2 , tal y como hace el ACI 214.
- Análogamente, al examinar los resultados intra-amasada hay que tener en cuenta que el valor del coeficiente

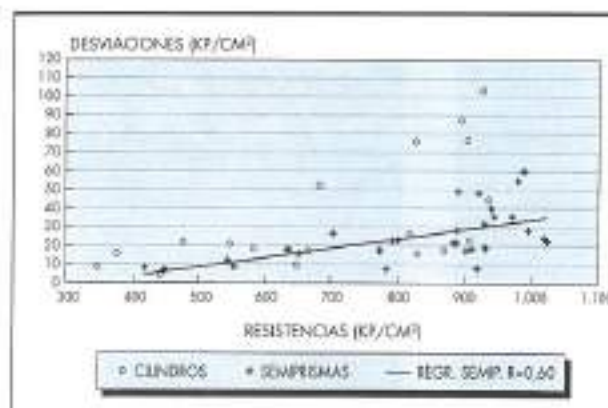


FIGURA 5a. Desviaciones en compresión intra-amasada ACI 214.

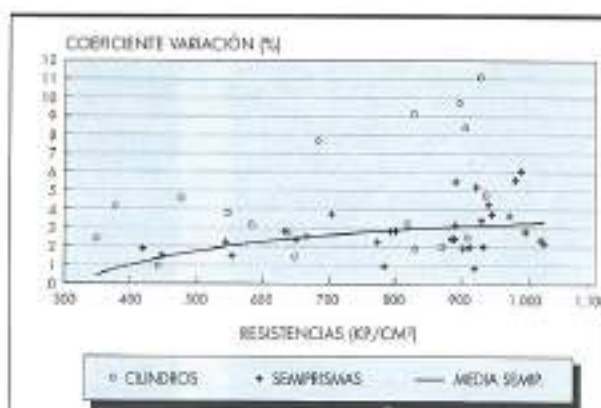


FIGURA 5b. Variaciones en compresión intra-amasada ACI 214.

CUADRO 4.

PROPUESTA VARIACIÓN TOTAL AMASADAS EN LABORATORIO					
COEFICIENTE DE VARIACIÓN EN %					
NIVEL DE RESISTENCIA MEDIA	EXCELENTE	MUY BUENA	BUENA	CORRECTA	POBRE
HASTA 500 KP/CM ² [NORMA]	MENOR DE 3	3 A 4	4 A 5	5 A 6	MAYOR DE 6
500 A 800 KP/CM ² [ATA]	MENOR DE 4	4 A 5	5 A 6	6 A 7	MAYOR DE 7
800 A 1.100 KP/CM ² [MUY ATA]	MENOR DE 5	5 A 6	6 A 7	7 A 8	MAYOR DE 8

de variación, que postula el ACI 214 como único para cualquier resistencia, también varía, aunque más levemente que la desviación, con la resistencia del hormigón.

Por tanto, y de acuerdo a los resultados obtenidos con los semiprismas la tabla del ACI 214 pasaría a ser la que se propone en el Cuadro 4. El origen de este incremento de la variación intra-amasada y total con la resistencia puede ser debido a que para hormigones con relación a/c por debajo de 0,35 la curva resistencia-relación a/c aumenta su pendiente y cualquier variación en la pesada de cemento o agua produce disminuciones más importantes de resistencia que en hormigones con mayores relaciones a/c.

5. FORMAS DE ROTURA DE CILINDROS REFRENTADOS CON MORTERO DE AZUFRE

La forma normal de rotura de una probeta de hormigón es la de conos opuestos por el vértice. Esta forma se origina al producirse un efecto de zunchado de los platos sobre los extremos de la probeta.

La norma ASTM C39 presenta otras posibles formas de rotura que pueden aparecer: Cono con hendimiento (cono y fisura vertical), cono y cortante (una diagonal y un cono), cortante (forma diagonal) y columnar (fisuración vertical en columnas). En principio, estas formas de rotura resultan anómalas y son originadas por varias causas: falta de rozamiento de cara de probeta y plato, fallo del refrentado, falta de planeidad o paralelismo en los extremos de la probeta, mal centrado de la probeta, etc.

A lo largo del plan de ensayos fueron apareciendo todas las roturas que se contemplan en la ASTM C39, unas más frecuentemente que otras, en cilindros refrentados con mortero de azufre según UNE 83-303. Además se presentó en numerosas ocasiones otra forma de rotura que no aparece en la citada norma y que consiste en un descabezamiento de la probeta, inferior o superior, en el cual desaparecían las esquinas de la probeta, quedando ésta prácticamente intacta. Cada una de estas formas aparecidas, se muestran en las fotografías 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7. Asimismo, y para los niveles más bajos de resistencia, era imposible determinar la forma de rotura de las probetas, ya que la fisuración apenas se manifiesta en la superficie. Esta forma de rotura la hemos denominado en el



FOTOGRAFÍA 1. Conos invertidos.



FOTOGRAFÍA 2. Cono con hendimiento.



FOTOGRAFÍA 3. Descabezamiento.



FOTOGRAFÍA 4. Descabezamiento con hendimiento.



FOTOGRAFÍA 5. Diagonal.



FOTOGRAFÍA 6. Diagonal con cono.

presente estudio "inapreciable".

En la Fig. 6 se observan las frecuencias de aparición de las distintas formas de rotura según el nivel de resistencia, con una clara evolución de la forma de rotura al ir subiendo la resistencia.

Las formas relacionadas con el HENDIMIENTO Y EL DESCABEZAMIENTO se producen en las probetas de alta resistencia (a partir de los 600 kp/cm^2), aumentando además su frecuencia de aparición con el nivel de resistencia. Dado que estas roturas están asociadas a rotura prematura y disminución de resistencia, provocan un incremento de dispersión de resultados cuando se aumenta la resistencia del hormigón. En las probetas de baja resistencia no es posible en muchos casos apreciar la forma de rotura, al no pro-



FOTOGRAFÍA 7. Hendimiento puro.

ducirse una fisuración exterior. Cuando sí se manifiesta la fisuración exterior, las formas habituales son los CONOS opuestos por el vértice, las roturas DIA-GONALES o combinaciones de ambas.

En la Fig. 7, se observa la evolución de las roturas anómalas (hendimiento y descabezamiento), en aumento con la resistencia, y por el contrario, un descenso de las roturas convencionales (conos y diagonales). Las roturas anómalas se producen en más de la mitad de los casos, cuando se está en los niveles más altos de resistencia, con los consiguientes problemas de dispersión y disminución de la resistencia.

Los descabezamientos pueden llegar a producir un descenso puntual del 36% de una probeta respecto a las compañeras. El valor medio del descenso en esta

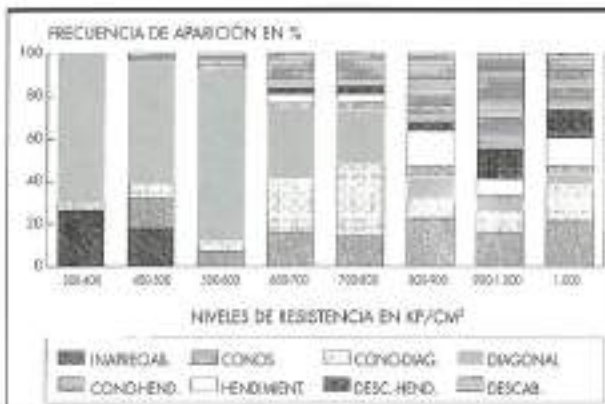


FIGURA 6. Evolución forma rotura con la resistencia.



FIGURA 7. Evolución forma rotura con la resistencia.

forma de rotura es del 15%, aunque existe mucha variación. Análogamente, el hendidamiento puede llegar a producir en casos extremos un 34% de descenso de resistencia, con un valor medio del 20% de disminución de resistencia, y también con mucha variación.

6. MATERIAL DE REFRENTADO

El sistema tradicional de refrentado de probetas cilíndricas de hormigón normalizado por la UNE 83.303 utiliza mortero de azufre como material de refrentado. Este material no resulta idóneo para refrentar hormigón de alta resistencia, como últimamente queda reflejado en la literatura especializada.

Carrasquillo (1988) muestra rangos medios elevados (hasta del 30%) para probetas de la misma amasada, utilizando mortero de azufre como material de refrentado. Asimismo, un estudio reciente (Boulay, 1992) sobre el refrentado de hormigón de alta resistencia, muestra resultados con refrentados alternativos al mortero de azufre. Con este último, utilizando una mezcla norteamericana de refrentado comercial de 62 MPa de resistencia media en probeta cúbica de 5 cm, obtiene coeficientes de variación del 6,2% y disminuciones de resistencia del 19% con respecto a un perfecto rectificado de las bases de la probeta cilíndrica. Este último procedimiento parece perfilarse como el idóneo para hormigón de alta resistencia, presentando mínimas variaciones e incrementando considerablemente la resistencia. Sin embargo, resulta muy caro y no existen por el momento máquinas comerciales que permitan un refrentado rápido y sistemático de las probetas. Ante la imposibilidad de adquirir un sistema de este tipo para rectificar los extremos de las probetas se planteó la necesidad de encontrar un sistema de refrentado alternativo que permitiera disminuir las dispersiones encontradas en los resultados de roturas de probetas a compresión refrentadas con el tradicional mortero de azufre.

El mortero de azufre presenta numerosos inconvenientes, que no se reflejan en probetas de hormigón normal, pero producen un incremento notable de la dispersión, y disminución de la resistencia media en probetas de alta resistencia, donde el material de refrentado se agota mucho más. Se desarrolló un mortero de cemento de alta resistencia (de 850 a 950 kp/cm^2 a los 28 días en probeta cúbica de 5 cm de lado) con el que se realizaron pruebas de refrentado de hormigón. Este mortero 1:1 tenía una relación a/c de 0,37 y un 10% de humo de sílice. Los inconvenientes encontrados con el mortero de azufre, y que se paliaron al utilizar este mortero de cemento se resumen a continuación:



FIGURA 8. Evolución con el tiempo del mortero de azufre.

- Diferencias en la calidad del azufre según la partida y el origen.
- Dificultades para mantener una mezcla homogénea en el baño de refrentado, ya que la arena se decanta con mucha facilidad en el azufre líquido.
- La Norma UNE 83.303 prescribe una resistencia mínima del material de refrentado de 350 kp/cm^2 , que no se alcanzó con ninguno de los azufres empleados, aunque sí se observó que había variación de resistencia según el origen. El mortero de cemento empleado en las pruebas realizadas con probetas de alta resistencia tenía una resistencia en probeta cúbica de 5 cm de más de 800 kp/cm^2 .
- El mortero de azufre pierde propiedades al calentarse varias veces o mantenerse caliente durante mucho tiempo, como queda reflejado en la Fig. 8. Aunque la norma UNE 83.303 estima que no debe calentarse más de cinco veces consecutivas, en probetas de alta resistencia se presentan problemas incluso cumpliendo estas prescripciones, por la pérdida de calidad del material.
- El refrentado con mortero de azufre puede introducir gran dispersión, y en cualquier caso introducir una disminución en el valor medio de la resistencia medida, que puede ser importante (del 10 al 15%) como se refleja en el Cuadro 5, donde se comparan los resultados obtenidos con mortero de azufre y de cemento.
- El control de la dispersión con el mortero de cemento fue mayor, como se muestra en las Figs. 9a y 9b. Se consiguió una disminución de las desviaciones en este caso por

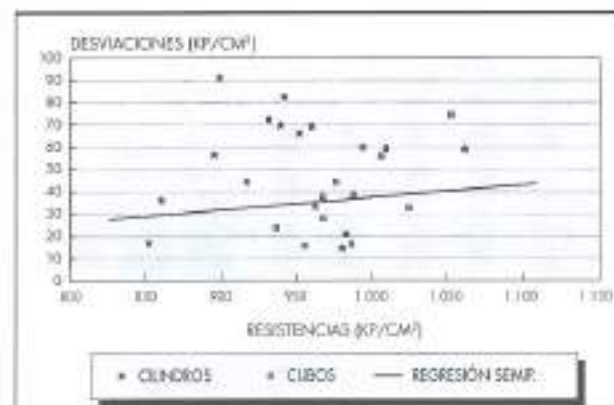


FIGURA 9a. Desviación total ACI 21.4 cubos-cilindros.

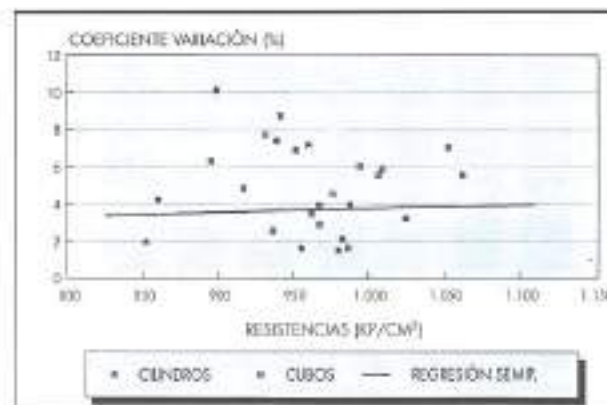


FIGURA 9b. Variación total cubos-cilindros ACI 21.4.

REFRENTADO	DOSIFICACIÓN	MEDIA	RELACIÓN (%)
MORTERO DE AZUFRE	NÚMERO 1	719	84
MORTERO DE CEMENTO	NÚMERO 1	832	100
MORTERO DE AZUFRE	NÚMERO 2	818	85
MORTERO DE CEMENTO	NÚMERO 2	960	100
MORTERO DE AZUFRE	NÚMERO 4	837	94
MORTERO DE CEMENTO	NÚMERO 4	895	100
MORTERO DE AZUFRE	NÚMERO 5	784	85
MORTERO DE CEMENTO	NÚMERO 5	917	100
MORTERO DE AZUFRE	NÚMERO 8	710	100
MORTERO DE CEMENTO	NÚMERO 8	712	100
MORTERO DE AZUFRE	NÚMERO 9	920	97
MORTERO DE CEMENTO	NÚMERO 9	950	100
MORTERO DE AZUFRE	NÚMERO 10	742	100
MORTERO DE CEMENTO	NÚMERO 10	744	100
MORTERO DE AZUFRE	NÚMERO 11	838	95
MORTERO DE CEMENTO	NÚMERO 11	882	100
MORTERO DE AZUFRE	NÚMERO 13	915	101
MORTERO DE CEMENTO	NÚMERO 13	904	100
MORTERO DE AZUFRE	NÚMERO 15	778	86
MORTERO DE CEMENTO	NÚMERO 15	905	100
MORTERO DE AZUFRE	NÚMERO 17	1.046	97
MORTERO DE CEMENTO	NÚMERO 17	1.080	100
MORTERO DE AZUFRE	NÚMERO 18	963	90
MORTERO DE CEMENTO	NÚMERO 18	1.067	100
MORTERO DE AZUFRE	NÚMERO 19	987	97
MORTERO DE CEMENTO	NÚMERO 19	1.020	100

CUADRO 5.

debajo de 90 kp/cm² de desviación total (incluyendo intra-amasada e inter-amasada) para los cilindros refrentados con mortero de cemento.

- Otro factor decisivo fue la ausencia de roturas anómalas en las probetas refrentadas con mortero de cemento.

El sistema de refrentado con mortero de cemento presenta el inconveniente de tener que refrentar las probetas el día después de su fabricación, porque al igual que el hormigón, el mortero necesita 28 días para alcanzar su resistencia. Esto impide su utilización por ejemplo en testigos que deban ser ensayados rápidamente. Además el mortero de cemento exige una habilidad y una atención continuada durante el proceso de refrentado, que de no producirse puede también introducir errores.

7. RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA EN PROBETA CÚBICA Y CILÍNDRICA

La relación existente entre los resultados de resistencia obtenidos en probeta cilíndrica y cúbica resulta de utilidad

porque son numerosos los países europeos que utilizan la probeta cúbica como normalizada, y cuando se desean establecer comparaciones es necesario conocer con precisión el coeficiente de paso de una a otra probeta.

En este sentido, la EH-81 presenta a título indicativo unos coeficientes de paso según tamaño y forma de la probeta de hormigón. El coeficiente de paso de cubo de 15 a cilindro de 15x30 oscila de 0,7 a 0,9, adjudicándose un valor medio de 0,8. El Código Modelo, establece coeficientes de paso que varían, según el nivel de resistencia, de 0,8 para resistencia característica en cilindro de 12 MPa a 0,89 para 90 MPa.

En la Fig. 10 aparecen representados los valores experimentales obtenidos del paso de probeta cúbica a cilíndrica para distintos niveles de resistencia. La regresión de tipo parábola de segundo grado, a pesar de lo limitado de los datos tiene un coeficiente de correlación muy alto. Asimismo, en la figura se han representado los valores que propone el Código Modelo. En la figura se representan en abscisas resistencias medias y sin embargo los coeficientes de paso del Có-



FIGURA 10. Paso de cilindro a cubo según nivel de resistencia.

digo Modelo son válidos para resistencia característica, por lo que se ha pasado de media a característica sumando a ésta 8 MPa de acuerdo con el Código Modelo.

Se observa en la Fig. 10 una buena coincidencia de los valores del coeficiente de paso que aparecen en el Código Modelo con los obtenidos experimentalmente, incluso dado lo limitado de los resultados en baja resistencia. Por encima de 900 kp/cm^2 , el valor del coeficiente de paso aumenta hasta acercarse mucho a 1 superando los 1.000 kp/cm^2 . Exactamente el valor de 1 se alcanzaría según la regresión parabólica en los 1.050 kp/cm^2 de resistencia media, valor en el cual las probetas cilíndricas y cúbicas proporcionan la misma resistencia.

La explicación a este comportamiento pudiera estar relacionada con el coeficiente de Poisson del hormigón de alta resistencia. Según la bibliografía el valor de 0,20 que se aplica a este coeficiente para hormigón normal, va disminuyendo cuando aumenta la resistencia del hormigón, de tal manera que se señala en ocasiones que el efecto de zunchado en los pilares de hormigón de alta resistencia que proporcionan los cercos disminuye considerablemente al existir deformaciones laterales muy inferiores.

Al someter una probeta de hormigón al ensayo de compresión los platos de la prensa ejercen una coacción lateral en los extremos de la probeta, que va desapareciendo gradualmente en altura. Las probetas cilíndricas de esbeltez 2, tienen una zona central libre de esta coacción mientras que las cúbicas, de esbeltez 1, están en toda su altura coaccionadas para deformarse lateralmente. En hormigón

normal, el coeficiente de Poisson induce unas deformaciones laterales altas en la zona central de la probeta cilíndrica que provocan una rotura a cargas unitarias inferiores a las que se originan en la cúbica, donde estas deformaciones están coaccionadas, y son inferiores. Si el material de la probeta tienen un coeficiente de Poisson inferior, la influencia de coacción originada por los platos no resulta importante ya que el propio material tiene bajas deformaciones laterales. Esto podría explicar que se igualen las resistencias unitarias de probetas cúbicas y cilíndricas cuando se aumenta la resistencia del hormigón, si paralelamente va disminuyendo el coeficiente de Poisson del material.

En los Cuadros 6a y 6b se muestran los valores correspondientes a cada nivel de resistencia del hormigón, en probeta cilíndrica y cúbica propuestos en el Código Modelo, y los que se desprenden del estudio experimental realizado, que extienden la propuesta de este Código hasta C110.

8. RELACIÓN RESISTENCIA MEDIA-CARACTERÍSTICA

La formulación que aparece en la EH-91 utiliza siempre el concepto de resistencia característica, representativa de la resistencia a compresión del hormigón. Resistencia media y característica son función de los resultados del control de calidad realizado en el hormigón.

Dado que la resistencia media del hormigón se puede aproximar a una variable aleatoria normal, del concepto de resistencia característica como valor correspondiente al cuantil del 5% de esta distribución, la relación entre ambas variables es de la forma:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,64\sigma$$

donde σ es la desviación correspondiente a la distribución normal. Esta relación también se puede poner en función del coeficiente de variación:

$$f_{ck} = f_{cm}(1 - 1,64\delta)$$

donde δ es el coeficiente de variación en %, y las resistencias están expresadas en kp/cm^2 .

El Código Modelo relaciona la resistencia media y característica mediante la expresión:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8$$

ecuación en la que ambas resistencias están en MPa. Esta expresión muestra una desviación asociada a la distribución normal de 5 MPa aproximadamente, cualquiera que sea la resistencia del hormigón. Esto supone atribuir un coeficiente de variación del 40% (muy elevado) a hormigones de

CUADRO 6a.

PASO PROBETA CILÍNDRICA A CÚBICA: CÓDIGO MODELO								
CLASE DE HORMIGÓN	C12	C20	C30	C40	C50	C60	C70	C80
f_{ck} CILINDRO	12	20	30	40	50	60	70	80
f_{ck} CUBO	15	25	37	50	60	70	80	90

PASO PROBETA CILÍNDRICA A CÚBICA: RESULTADOS EXPERIMENTALES											
CLASE DE HORMIGÓN	C12	C20	C30	C40	C50	C60	C70	C80	C90	C100	C110
f_{ck} CILINDRO	12	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
f_{ck} CUBO	15	25	37	50	60	70	80	88	95	101	110

CUADRO 6 b.

PROPUESTA VARIACIÓN TOTAL CONTROL EN OBRA

COEFICIENTE DE VARIACIÓN EN %

NIVEL DE RESISTENCIA MEDIA	EXCELENTE	MUY BUENA	BUENA	CORRECTA	POBRE
HASTA 500 KP/CM ² (NORMAL)	MEJOR DE 6	6 A 8	8 A 10	10 A 12	MAJOR DE 12
500 A 800 KP/CM ² (ATA)	MEJOR DE 8	8 A 10	10 A 12	12 A 14	MAJOR DE 14
800 A 1.100 KP/CM ² (MUY ATA)	MEJOR DE 10	10 A 12	12 A 14	14 A 16	MAJOR DE 16

CUADRO 7.

12 MPa y de 5,5% (muy bajo) a hormigones de 90 MPa, valores de resistencia entre los cuales es válido este Código. Como ya se comentó anteriormente, la desviación aumenta con el valor medio de la resistencia, y también lo hace el coeficiente de variación, por lo que esta expresión no puede ser válida para todo el rango de resistencias que contempla el Código Modelo.

Cuando se trató la dispersión de los valores de resistencia, se propuso una tabla de control de calidad del hormigón (Cuadro 4), con valores asignados a cada grado de control y nivel de resistencia. Sin embargo, esta tabla sólo es válida para las amasadas de Laboratorio, y no para control en obra. Si se analiza la que se propone en el ACI 214 (Cuadro 3), se observa que el control en obra tiene para cualquier grado de control una dispersión doble de la que se asigna para el mismo grado al hormigón de laboratorio. Con esta base se extrapola la propuesta para hormigón de laboratorio obteniendo así el Cuadro 7 para hormigón en obra.

Para relacionar resistencia media y característica se optó por utilizar un único coeficiente de variación para cualquier resistencia. Un coeficiente de variación del 10% implica un control correcto en hormigones de baja resistencia, bueno en hormigones de resistencia media, muy bueno en alta resistencia y excelente en muy alta resistencia. Esto parece coherente, ya que para mejorar la calidad del hormigón es necesario mejorar el control del hormigón en todas sus fases, y ello se reflejará en buenos coeficientes de variación.

Con este valor del coeficiente de variación, la relación entre la resistencia y media y la característica vale:

$$f_{cm} = 1,20 f_{ck}$$

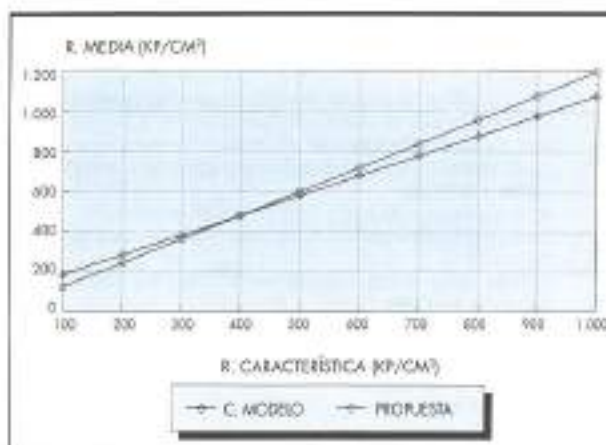


FIGURA 11. Comparación resistencias medio-característica.

En la Fig. 11 se muestran las relaciones entre resistencia media y característica en el Código Modelo, y la curva propuesta de paso de media a característica, con un coeficiente de variación para todo el rango del 10%.

9. CONCLUSIONES

Los distintos aspectos estudiados del control de calidad de los hormigones de alta resistencia arrojan las siguientes conclusiones:

- Distintas partidas de materiales pueden introducir variaciones importantes en la resistencia. En concreto la falta de uniformidad del cemento introdujo variaciones en la resistencia del hormigón que en general se situaron por debajo del 5%, mientras que el superplastificante también introdujo variaciones del 5%. Aunque no pudo comprobarse experimentalmente, la microsilice pudo introducir variaciones en la resistencia en torno al 3%.
- Aunque aisladamente estos incrementos o disminuciones de resistencia no resulten muy relevantes hay que tener en cuenta que pueden presentarse los efectos de los distintos materiales acumulados, y los porcentajes representan valores absolutos importantes de pérdida o ganancia de resistencia para los hormigones de muy alta resistencia.
- El ensayo de Cono de Abrams normalmente utilizado para medir la consistencia del hormigón proporciona resultados variables y poco representativos de la trabajabilidad real del hormigón en mezclas con relación agua/cemento muy baja y elevado contenido de superplastificante.
- El ensayo en la mesa de sacudidas proporcionó resultados más fiables de la verdadera trabajabilidad del hormigón de alta resistencia, especialmente en asientos próximos o superiores a los 20 cm. La tradicional relación entre los valores de ambos ensayos para hormigón normal cambia notablemente en HAR.
- Se presenta una tabla que relaciona asiento en Cono de Abrams y escurrimiento en mesa de sacudidas para hormigón de alta resistencia, con los límites correspondientes para los dominios de consistencia muy seca, seca, plástica, blanda y fluida.
- La mesa detecta mejor la pérdida gradual con el tiempo de la trabajabilidad del hormigón, cuando se utilizan grandes cantidades de aditivo superplastificante.
- El refrentado con mortero de azufre originó serios problemas de dispersión en los resultados de compresión de HAR. Esta dispersión iba acompañada generalmente por la presencia de roturas anómalas de las probetas. El

estudio realizado demostró la relación directa entre dispersión, roturas anómalas y nivel de resistencia de las probetas. La baja resistencia del mortero de azufre de refrentado y su pérdida de propiedades con el calor mantenido en el baño se perfilaron como las causas de este mal comportamiento.

- Se refrentaron las probetas con un mortero de alta resistencia (850 a 950 kp/cm^2 a los 28 días). Con este material desaparecieron las roturas anómalas y se consiguió controlar la dispersión, aunque ésta seguía siendo mayor que en hormigón convencional. El procedimiento en sí presenta ciertos inconvenientes, pero sirvió para lograr los objetivos marcados en el plan de ensayos.
- La resistencia del hormigón medida en probeta cúbica o cilíndrica se va acercando al incrementar la resistencia del hormigón. El estudio permitió establecer la relación empírica entre ambas. Los valores se igualan en los 1.050 kp/cm^2 de resistencia media. La razón puede estar relacionada con la disminución del coeficiente de Poisson que se observa en el HAR por lo que al elevar la resistencia del hormigón la esbeltez de la probeta tiene menor influencia sobre la resistencia.
- Los resultados de semiprismas y cubos, con ausencia de material de refrentado, permitieron establecer una tabla, de similar estructura que la que aparece en el ACI 214, para evaluar el control de calidad del hormigón según su nivel de resistencia.
- Se ha propuesto una relación entre resistencia media y característica, asignando un coeficiente de variación del 10% constante para todo el rango de resistencias.

10. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha formado parte de un programa experimental sobre hormigones de alta resistencia, que ha sido financiado por la Dirección General de Carreteras (MOPTMA).

Asimismo, está recogido dentro de una tesis doctoral presentada en la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos (Universidad Politécnica de Madrid).

Los autores desean expresar su agradecimiento al equipo de personas de la División de Tecnología de Hormigones del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, cuyo trabajo diario "detrás de las cámaras" hizo posible el buen desarrollo de la investigación.

11. BIBLIOGRAFÍA

ARREDONDO, F. (1965). Dosificación de hormigones. Manuales y normas del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, 1965.

CALAVERA RUIZ, J. (1975). "Probetas tomadas a salida de hormigonera". Informes de la Construcción Nº 275, INTEMAC, 1975.

CARRASQUILLO, P.M.; CARRASQUILLO, R.L. (1988). "Effect of using unbonded capping systems on the compressive strength of concrete cylinders". *ACI Materials Journal*, May-June, 1988, pp. 141-147.

CONCRETE SOCIETY CURRENT PRACTICE (1984). "Superplasticised concrete: par 1". *Concrete*, April 1984, pp. 31-32.

CONCRETE SOCIETY CURRENT PRACTICE (1984). "Superplasticised concrete: par 2". *Concrete*, May 1984, pp. 31-32.



GEOTEYCO

LABORATORIO ACREDITADO

- Asistencia Técnica.
- Control de Calidad.
- Estudios Geotécnicos.
- Ensayos de Campo.
- Ensayos de Laboratorio.

AREAS DE ACREDITACION

Área de ensayos de laboratorio de perfiles y barras de acero para estructuras.

Área de control "in situ" de la ejecución de la soldadura de elementos estructurales de acero.

Área de control de hormigón en masa o armado y sus materiales constituyentes: cemento, áridos, agua, acero para armaduras, adiciones y aditivos.

Área de ensayos de laboratorio de mecánica del suelo.

Área de toma de muestras inalteradas, ensayos y pruebas "in situ" de suelos.

Área de suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales.

Paseo de la Habana, 61, Pab. Primero - 28008 MADRID

Tel.: 91 457 06 20 (5 líneas)

Fax: 91 457 43 33

GEOTEYCO

Póligona Industrial Vitoriano
Naves 216-218
28940 PUENLABRADA (Madrid)
Tel.: (91) 690 11 90 - 690 90 11
Fax: (91) 690 24 02



Aquí estamos.



Aquí también.

CON LO MAS GRANDE, CON LO MAS PEQUEÑO. Desde la autovía más moderna, hasta la carretera comarcal más alejada. De norte a sur y de este a oeste. Un asfalto que dura más en buen estado. Que consigue una mayor adherencia de los neumáticos al piso. Asfalto de calidad producido para miles de kilómetros de carreteras.

Drayfil®



Túnel de Puymoreno Pireneo Oriental 4.520 m. de longitud (Impermeabilizado con DRAYFIL Túnel)

Marca la diferencia para culminar cualquier obra bien hecha.

Drayfil® EDIFICIOS

Drayfil® EMBALSES

Drayfil® AGUA POTABLE

Drayfil® TÚNELES

Drayfil® PISCINAS

AISCONDEL LAMINADOS, S.A. es pionera en España en la investigación y desarrollo de las láminas impermeabilizantes de PVC para todo tipo de instalaciones, en la construcción, obras públicas, embalses y agricultura. Esta larga experiencia, unida a los constantes avances tecnológicos, la sitúa en la primera línea del sector.

Todas las láminas impermeabilizantes de PVC-P fabricadas por AISCONDEL LAMINADOS, S.A. bajo la marca DRAYFIL, poseen la certificación AENOR.



MIEMBRO DE LA
ASOCIACIÓN ESPAÑOLA
DE LOS PLÁSTICOS
EN LA PROTECCIÓN
DEL MEDIO AMBIENTE



AISCONDEL
LAMINADOS, S.A.

