

Hormigón con adición de cenizas volantes en cuantía elevada e influencia de los aditivos sobre el mismo^(*)

Por ANTONIO JOSE SALCEDO LORENTE

El artículo que a continuación se desarrolla es, básicamente, un trabajo de investigación bibliográfica, ya que la información que en él se recoge procede en su mayor parte de revistas, conferencias, simposios, libros e informes técnicos nacionales e internacionales.

En él se ha tenido presente en todo momento un afán de claridad y transparencia informativas por considerarse el planteamiento más lógico para el mismo. A consecuencia de ello, se dan continuas referencias a las fuentes de información, para que el lector interesado pueda tener acceso a una ampliación de lo aquí expresado necesariamente de un modo muy sintético.

Sin embargo, a pesar de tal carácter bibliográfico, se ha pretendido que goce del mayor interés profesional, rigor técnico y actualización posibles, lo cual se ha intentado conseguir en base a:

1. *Realización de una búsqueda exhaustiva de la información disponible; en España hasta la fecha, y en el resto del mundo hasta diciembre de 1985.*

2. *Consultas a distintos profesionales españoles relacionados con el tema (citados al final). Gracias a estas consultas se han resuelto las dudas que han ido surgiendo, y se ha conseguido reflejar, además, cuál es el estado de esta tecnología en nuestro país.*

Cabe esperar que de este modo se haya conseguido el propósito de dar una visión completa de las propiedades y aplicaciones de un material nuevo de indiscutible interés para el ingeniero de la construcción.

I. SINTESIS Y ESTRUCTURACION DEL TRABAJO

— Síntesis:

Las cenizas volantes son consideradas habitualmente un sustituto del cemento Portland en el hormigón. Aquí se estudia sin embargo, un tipo de hormigón en el cual las cenizas volantes representan de un 40 a un 80 por 100 del peso total del material conglomerante, debiendo ser consideradas como un ingrediente adicional al cemento Portland, áridos y agua, y haciéndose necesario un nuevo método de dosificación.

(*) Artículo galardonado con el Primer Premio HALESA 1986.

Este hormigón, hormigón con alto contenido de cenizas volantes, fue desarrollado inicialmente como hormigón compactado con rodillo en la construcción de presas. Los usos de este material se han extendido en la actualidad a la construcción de bases y pavimentos de carreteras y a ciertas aplicaciones estructurales.

En todos los casos el hormigón se ha comportado adecuadamente tanto en estado fresco como endurecido, presentando diversas ventajas sobre los hormigones con cemento Portland convencionales.

En este trabajo se exponen y discuten las propiedades de este tipo de hormigón y los beneficios derivados de su utilización con referencias concretas a las obras más destacadas en que ha sido utilizado.

— Estructuración del trabajo:

Si bien el tema preciso que se desarrolla es el de «hormigón con adición de cenizas volantes en cuantía elevada e influencia de los aditivos sobre el mismo», se ha introducido un breve resumen de las características más importantes de las cenizas volantes (CV), lo cual contribuirá sin duda a una mejor comprensión del comportamiento de los hormigones con alto contenido de cenizas volantes (HFCC, del inglés High Fly ash Content Concrete). Así mismo, se citan sucintamente los comportamientos más destacables de los hormigones con CV en las proporciones usuales, para que puedan relacionarse con los comportamientos de los HFCC descritos más adelante.

Según esto, tras la introducción del capítulo II se sigue, en el capítulo III con dicho resumen.

En el capítulo IV se desarrolla el tema concreto objeto de este estudio.

Finalmente, en el capítulo V se exponen las conclusiones y consideraciones finales que se desprenden del contenido de este trabajo.

II. INTRODUCCION

Como consecuencia de la crisis del petróleo de los años 70 se ha experimentado a nivel mundial, un cambio en los hábitos energéticos con sustitución progresiva de aquél por otras fuentes de energía, tendencia que a pesar de situaciones como la actual (en que los precios del mercado petrolífero han experimentado un descenso considerable), se pronostica con clara proyección de futuro.

Una consecuencia directa de tal circunstancia ha sido el progresivo aumento del empleo del carbón en la generación de electricidad en detrimento del petróleo. Esto ha llevado, y va a llevar más aún en el futuro, a la producción de grandes cantidades de CV en las centrales eléctricas que utilizan el carbón como fuente de energía, las cuales mientras no sean utilizadas, constituyen un residuo origen de importantes problemas de eliminación y de ambiente. Cualquier utilización de este subproducto será beneficiosa tanto desde el punto de vista ecológico como desde el punto de vista económico, y ha sido precisamente en la fabricación de hormi-

gón donde se ha encontrado su mejor aplicación:

Siendo el cemento el componente del hormigón que más caro resulta y que más energía exige en su elaboración, la sustitución parcial del mismo por CV no sólo reduce el coste del hormigón resultante, sino que supone también un ahorro de energía¹ (ver nota).

Además, tanto en dicho hormigón en que se sustituye parcialmente el cemento por CV, como en los restantes usos de éstas en el hormigón, se han observado sustanciales mejoras de ciertas propiedades, más adelante comentadas, respecto a las del hormigón tradicional sin CV.

Si a estos hechos se les suman las razones de protección ambiental arriba apuntadas, se comprende el fuerte incremento experimentado en la producción de este tipo de hormigones en los últimos 13 años en todo el mundo.

Tradicionalmente, el empleo de las CV en el hormigón ha sido con un porcentaje en peso de éstas, respecto al total de material conglomerante (cenizas + cemento) que no han superado en casi ningún caso el 30-35 por 100, creyéndose incluso, y así lo confirman la mayoría de las recomendaciones y especificaciones al respecto^{(2) y (3)}, que sobrepasar esa cifra suponía una severa pérdida en las propiedades, sobre todo a edades tempranas.

Sin embargo, recientemente (no hace más de nueve años) han aparecido los hormigones con alto contenido de cenizas volantes, en los cuales el porcentaje anterior es superior al 40 por 100 llegándose a valores del 80 por 100. En ellos, el uso de las CV como un simple sustituto del cemento no explota todo potencial de este nuevo material; las CV deben ser entendidas como otro ingrediente fundamental más del hormigón, en adición del cemento Portland, áridos y agua; exigiéndose un nuevo método de dosificación de la mezcla.

Se hace necesario, pues, antes de entrar en el desarrollo de tal tipo de hormigón, estudiar, aunque sea de forma muy somera, las características fundamentales de las CV y del empleo general de las mismas en el hormigón.

Nota: Se distinguen los números de referencia de las fuentes de información, sin paréntesis cuando han sido directamente consultadas, y con él cuando no lo han sido pero se han encontrado citadas en las anteriores y se han considerado de posible interés.

III. CENIZAS VOLANTES Y HORMIGONES CON CENIZAS VOLANTES

Los hormigones a que se hace referencia en este apartado son los habitualmente empleados cuando se utilizan CV, esto es, con proporciones de las mismas, menores del 30-35 por 100 en peso respecto al total de material cementicio (conglomerante).

Como ya se ha indicado, los datos presentados se dan muy resumidos. Se pueden consultar sobre este tema las referencias: 4 a 15.

III.1 Cenizas volantes. Introducción.

Seguendo el Proyecto de Norma UNE 83.415, se define como ceniza volante «el producto sólido y en estado de fina división procedente de la combustión del carbón pulverizado en los hogares de centrales termoeléctricas y que es arrastrado por los gases del proceso y recuperado de los mismos, en los filtros».

Se excluyen las cenizas extraídas del hogar, y no se aplicará tampoco el término «cenizas volantes», a los productos separados o condensados de flujos de gases procedentes de otros procesos industriales.

Una de las principales razones de ser del empleo de las CV es su acción puzolánica. Los materiales puzolánicos en general, se definen en la norma UNE 80.301-85¹⁴ como materiales natu-

rales o productos artificiales capaces de combinarse con la cal grasa, hidráulica o de hidrólisis de los cementos (portlandita), a la temperatura ambiente y en presencia de agua, para formar compuestos hidráulicos semejantes a los originados en la hidratación de los constituyentes del clinker Portland.

Las CV son un tipo de puzolana artificial, aptas como adiciones activas al clinker del cemento Portland, en paralelo con las puzolonas naturales, ya que como materiales activos, confieren al cemento resultante propiedades y comportamientos específicos distintos y mejores en muchos aspectos que los del cemento Portland ordinario que no contiene adiciones activas o constituyentes secundarios.

Las CV se han utilizado también como elementos sustitutivos o complementarios de las fracciones finas de los áridos cuando éstos son deficitarios en ellas.

También como aditivo para hormigón, como material cementante complementario o sustitutivo del cemento e incluso como sustituto parcial del cemento y árido fino a la vez^{4, (16) y 7}.

III.2 Composición química de las cenizas volantes

La composición química de las CV es bastante variable, pero similar a la de los grupos de minerales de la arcilla. La tabla 1 muestra los

TABLA 1
COMPOSICION QUIMICA EN %

	Conceptos analíticos	Máx. máx.	Mín. máx.	Med. máx.	Máx. mín.	Mín. mín.	Med. mín.	Máx. med.	Mín. med.	Med. med.
SiO ₂	S	63,3	50,7	56,1	47,9	29,9	39,1	58,0	41,1	49,4
Al ₂ O ₃	A	37,2	28,3	32,2	23,9	10,8	19,2	27,2	20,8	25,5
Fe ₂ O ₃	F	31,3	5,9	15,7	8,5	1,5	5,3	17,5	4,3	9,6
CaO	C	38,8	5,8	13,0	11,1	0,8	2,8	6,0	2,8	4,4
MgO	M	4,5	1,2	2,6	1,9	0,0	0,8	2,4	0,6	1,6
SO ₃	S	7,0	0,8	3,3	0,6	0,0	0,2	1,6	0,3	0,9
Na ₂ C	N	2,4	0,6	1,5	0,9	0,1	0,3	1,5	0,3	0,8
K ₂ O	K	6,0	2,9	3,7	1,8	0,6	1,1	3,9	1,3	2,4
Per. fuego	PF	23,5	1,2	14,0	1,5	0,05	0,8	9,7	0,7	5,5
TOTAL		214,0	97,4	142,1	98,1	33,75	69,6	127,8	72,2	100,1
Centros intervalo										100

valores máximos, mínimos y medios de los a su vez, máximos y mínimos y medios de composición química, correspondientes a 150 cenizas de ocho países de los tres principales continentes⁴.

Los carbones antracíticos y bituminosos dan cenizas ricas en S, A y F, con contenidos totales de estos componentes superiores al 70 por 100, mientras que los carbones subbituminosos y ligníticos dan cenizas más pobres en dichos componentes ($S + A + F < 70 \%$) —sobre todo en A—, y más ricos en C, M y S ($C + M + S > 30 \%$).

Dada la importancia de la composición química de las CV en el comportamiento de los cementos y hormigones que las contienen dicha composición ha sido y es objeto de limitaciones:

Así, el PNE UNE 83.415 especifica:

- SO_3 (según norma UNE 83.432) máximo: 4.5
- Humedad (según norma UNE 83.431) máximo : 1,5
- Pérdida por calcinación (s. UNE 83.433) máximo: 6

(Tantos por ciento en masa y referidos a la muestra seca).

Por su parte, la especificación ASTM C 618-80 divide las CV en dos clases, que son las dos familias habitualmente distinguidas.

— Clase F (bajo contenido en cal, silico-aluminosas), con propiedades puzolánicas normalmente producidas a partir del carbón antracítico o bituminoso.

— Clase C (alto contenido en cal, cálcicas), con propiedades puzolánicas e hidráulicas normalmente producidas a partir de lignito o carbón subbituminoso.

Para cada una de ellas se indican en la tabla 2' los límites fijados:

III.3 Constitución de las cenizas volantes.

Los óxidos básicos y ácidos que componen las CV se encuentran formando parte de constituyentes análogos a los minerales arcillosos, de tal manera que del 50 al 80 por 100 del total de las mismas son silico-aluminatos en mayor proporción cuanto mayor es la edad de los carbones de procedencia. Estos silico-aluminatos se forman por fusión, de la cual puede resultar

TABLA 2'

ASTM C 618-80. ESPECIF. QUIM. PARA CV USADAS EN HORMIGON

	Clase F	Clase C
S + A + F, % mín.	70.0	50.0
SO_3 % máx.	5.0	5.0
Humedad, % máx.	3.0	3.0
Pérd. fuego, % máx.	12.0	6.0
<i>Opcionales:</i>		
MgO, % máx.	5.0	5.0
Alcalis como Na_2O , % máx.	1.5	1.5

en el enfriamiento una fase vítrea y unos constituyentes cristalinos en proporciones recíprocas variables. Esto es importante porque la relación vidrio/cristal es decisiva para el poder puzolánico de las CV⁴.

III.4 Propiedades físicas de las cenizas volantes.

Las especificaciones físicas que se marcan en el PNE UNE 83.415 son la finura, el índice de actividad resistente, la demanda de agua y la estabilidad de volumen, en esencia, las mismas que las de la ASTM C 618-80.

En general, cuanto más finas sean las cenizas, mayor es la actividad puzolánica. Las más finas dan lugar a reacciones más rápidas, con tiempos de endurecimiento ligeramente más cortos y resistencias algo mayores. Por eso, y habida cuenta de que la ceniza reacciona con la cal de hidrólisis del cemento, CH, para activarla se incrementa ésta por molienda.

En cuanto a la densidad, las CV menos densas son las de mayor proporción de partículas a veces huecas, las cuales contienen carbono, casi todo él amorfo, y a su vez con superficie específica y capacidad de absorción variable, lo que influye decisivamente en el rendimiento y comportamiento de los aditivos fluidificantes y superplastificantes del hormigón, provocando variaciones incontrolables e incontroladas, tanto en el contenido del aire ocluido por el hormigón, como en la reología, fluidez y trabajabilidad del mismo.

III.5 Las cenizas volantes y la hidratación del cemento.

La acción de las CV en la hidratación de los aluminatos se podría esquematizar como sigue;.

En primer lugar se produce una adsorción sobre el C_3A de iones SO_4^{2-} de la fase líquida que existe en exceso en el caso de cementos con cenizas; después se forma ettringita que consume agua sustrayéndola del sistema; a continuación tiene lugar la migración de los iones SO_4^{2-} y la formación y estabilización de aluminatos hidratados hexagonales; finalmente se produce el paso de la fase hexagonal a la cúbica, de forma más retardada que sin ceniza; y el resto del C_3A anhidro se hidrata rápidamente.

Las CV contribuyen a acelerar la hidratación de los constituyentes del clinker y dan a la pasta una estructura evolutiva especial. Las propiedades de esta pasta dependen en buena parte de la naturaleza y de la evolución de la adherencia de los productos formados en la interfase esfera/matriz de la pasta, todo lo cual depende, a su vez, de las características del clinker y de la ceniza, así como de la finura y proporciones de ambos, y del tiempo. A cortas edades esta interfase presenta una mayor proporción de superficie inconsolidada, tanto mayor cuanto mayor es la proporción de CV. Esta es la razón por la cual la disminución de resistencia causada por las CV es tanto mayor cuanto mayor es su proporción y más corta es la edad. Pero este efecto se acentúa con la consolidación de la interfase; es decir, con el tiempo, llegando a producir los conocidos aumentos de resistencia a largo plazo.

La actividad puzolánica de las CV de la clase F dependen de la cal producida en la hidratación del cemento. Por el contrario, las de tipo C comenzarán las reacciones puzolánicas y conglomerantes inmediatamente después de la adición de agua, produciéndose de forma más rápida que cuando se utiliza la cal liberada en la hidratación del cemento.

Otro fenómeno importante que cabe incluir dentro de este apartado es la reducción del calor de hidratación por adición de CV. Esto se debe fundamentalmente a un efecto de dilución del clinker (o del cemento), puesto que el ca-

lor de hidratación de las cenizas es menor que el del clinker o cemento, y además desprendido con mayor lentitud.

Por otra parte, es sabido que los aumentos de temperatura aceleran la resistencia del hormigón de cemento Portland ordinario, si bien a costa de reducir las resistencias a largo plazo. Sin embargo, con los cementos y hormigones con CV sucede lo contrario, por efecto puzolánico, con la ventaja de que la elevación de la temperatura no es tan grande en elementos de gran espesor y en hormigón muy masivo^{4,9}. Por todo ello, los cementos y hormigones con CV son especialmente aptos para presas y firmes de carretera. También lo son cuando se especifican hormigones de alta resistencia con buena trabajabilidad para su puesta en obra con gradientes de temperatura mínimos.

III.6 Las cenizas volantes y la reología del hormigón

Una de las características más destacadas de las CV, que las hacen aprovechables para su utilización en cemento y hormigones, es su capacidad de reducción de agua en las pastas, morteros y hormigones, a igualdad de plasticidad, capacidad de flujo, etc. Así pues, el primer efecto benéfico de las CV se manifiesta ya en el hormigón fresco, sin que se haya llegado a conocer a fondo la relación entre estas modificaciones y las propiedades intrínsecas de las cenizas.

III.7 Las cenizas volantes y la retracción

Es un punto un tanto controvertido el de si las CV aumentan o disminuyen la retracción. La adición de ceniza parece hacer disminuir la retracción intrínseca, en cuantía dependiente de la naturaleza y proporción de la ceniza añadida. En lo que respecta a la de secado, hay opiniones en el sentido de que, a temperatura constante, las CV generalmente la hacen aumentar dependiendo así mismo, de la naturaleza y proporción de la ceniza.

III.8 Las cenizas volantes y la durabilidad

En general las CV producen un efecto beneficioso en la durabilidad del hormigón que responde a factores de índole física y química.

Factores de índole física son la mayor densidad, compacidad, impermeabilidad a los iones, que las CV aportan al hormigón como consecuencia de su efecto reductor de agua para una consistencia y trabajabilidad dadas, y como consecuencia de ser la durabilidad dependiente de la permeabilidad, función a su vez del grado de hidratación y de la proporción de huecos, y de la capilaridad creada por exceso de agua de amasado⁴.

Factor de naturaleza química es el carácter puzolánico de las CV.

Se consigue con las CV una mayor resistencia a los sulfatos, agua de mar, aguas puras, ácidas y carbónicas agresivas y un mejor comportamiento frente a la reacción expansiva árido-álcalis y frente a la carbonatación. Sin embargo en el hormigón con CV usado normalmente se observa que las cenizas apenas mejoran la resistencia a las heladas.

III.9 Las cenizas volantes y los aditivos para hormigón

Las CV influyen en la dosificación, control y efectos de los aditivos, y en particular de los agentes inclusores de aire, fluidificantes y superplastificantes. En estas influencias juega un papel importante el contenido de carbón, el tamaño, superficie específica y porosidad de sus partículas y, en definitiva, su capacidad de adsorción.

La combinación de superplastificantes y cenizas en el hormigón permite obtener menor retracción, menor fluencia y mayores resistencias a corto y largo plazo que con cementos Portland ordinarios, en hormigones de igual trabajabilidad.

III.10 Las cenizas volantes y los hormigones con cenizas volantes en la normativa española

Hay que señalar el esfuerzo de modernización y de creación de nueva normativa sobre este tema que se está haciendo en los últimos meses.

La definición de las CV utilizadas como adición a los hormigones y morteros de cemento Portland, las características que deben cumplir y las normas de ensayo que se les deben apli-

car están contempladas en el proyecto UNE 83.415, todavía no publicado.

Respecto a la normalización del uso de las CV en la fabricación de hormigón, existen las Recomendaciones UC-85. en ellas se mencionan también las características a cumplir por las CV que, en esencia, coinciden con las de la UNE 83.415.

En el apartado de fabricación del hormigón con cenizas se especifican:

- Definición y utilización.
- Dosificación.
- Condiciones de las instalaciones de fabricación de hormigón con CV.
- Recepción de las CV.
- Control y entrega del pedido.

Hay que destacar que estas recomendaciones no contemplan los nuevos tipos de cemento definidos en las normas UNE 80.301-85 y 80.302-85, por ser su redacción anterior a la de éstas.

A los efectos de este trabajo se deben señalar los dos puntos siguientes:

- No está recogido en la normativa española el uso de las CV en las altas proporciones que se dan en los HFCC. Las recomendaciones UC-85 mencionadas admiten un máximo del 35 por 100 en la relación del peso de las CV al total de material conglomerante.

Realmente, por el momento, no existe ninguna normativa en el mundo que los contemple.

- De los nuevos cementos definidos en la UNE 80.301 y 80.302 el cemento que se presta mejor para su utilización en HFCC es el cemento mixto Tipo V, definido como «conglomerante hidráulico, constituido a base de clínker Portland en proporción no menor del 20 por 100 ni superior al 60 por 100 en masa, y de un máximo del 5 por 100 de filler calizo»¹⁴.

IV. LOS HORMIGONES CON ALTO CONTENIDO DE CENIZAS VOLANTES

IV.1 Introducción

El objetivo de cualquier sistema de dosificación de hormigones es producir una combina-

ción de los materiales disponibles, que dando lugar a un hormigón cuyas propiedades en estado fresco y endurecido cumplan los requerimientos existentes, sea, a la vez, la más barata posible.

Las CV se han usado en hormigón desde hace ya más de 50 años y en la mayoría de los casos con éxito. Con los muchos años que se tienen ya de experiencia en su uso, el hormigón con CV no puede ser considerado un material extraño. Pero en todo ese tiempo, generalmente se han empleado a las CV como un sustituto del cemento, con valores máximos en dicha sustitución cifrados en torno al 35 por 100 en peso y dosificando el hormigón con ellas fabricado como una modificación del hormigón ordinario con cemento Portland.

Usando el método de dosificación propuesto en este trabajo se puede comprobar que la mayoría de los hormigones resultan beneficiados económica y físicamente por la inclusión de mayores volúmenes de CV de las habitualmente usadas en el momento presente. El hormigón diseñado de esta forma, ha venido, en consecuencia, a conocerse en la literatura inglesa por el nombre «High Fly ash Content Concrete» (HFCC), de sencilla, y clara traducción en español por «Hormigón con alto contenido de cenizas volantes». Este tipo de hormigón es al que se hace referencia en todo lo que sigue. No se consideran utilidades de las CV en hormigón, que por aproximarse a los límites máximos citados pudieran entenderse como de alta cuantía, empleándose, en consecuencia, la denominación anterior para unos hormigones que según el estado actual de esta técnica en el mundo no deben ser considerados como HFCC.

No existen unos valores claramente definidos del contenido en CV para poder calificar a un hormigón como HFCC. Sin embargo, se aceptará el criterio (precisamente expresado) de Haque, Langan y Ward¹⁸, según el cual se pueden considerar como tales aquellos hormigones que contengan más de un 40 por 100 de CV respecto al peso total de material cementicio (cemento + cenizas), criterio, que por otra parte se ha comprobado válido en toda la bibliografía consultada.

En lo que sigue se utilizará la anotación que se expresa a continuación:

- a : Volumen de árido grueso.
- b : Volumen de árido fino.
- c : Volumen de cemento.
- f : Volumen de cenizas volantes.
- w : Volumen de agua libre.
- v : Volumen de aire.
- m : Volumen de mortero.
($m = b + c + f + w$).
- p : Volumen de pasta ($p = c + f + w$).
- P : Relación pasta/mortero en volumen.
($P = p / m$).
- c_c : Relación cemento/conglomerante en vol.
($c_c = c / (c + f)$).
- c_f : Relación cen. vol./cong. en volumen.
($c_f = f / (c + f)$).
- c_w : Relación agua/cong. en volumen.
($c_w = w / (c + f)$).
- a' : peso de árido grueso.
- b' : peso de árido fino.
- c' : peso de cemento.
- f' : peso de cenizas volantes.
- w' : peso de agua libre.
- m' : peso de mortero ($m' = b' + c' + f' + w'$).
- p' : peso de pasta ($p' = c' + f' + w'$).
- P' : Relación pasta/mortero en peso.
($P' = p' / m'$).
- c'_c : Relación cemento/cong. en peso.
($c'_c = c' / (c' + f')$).
- c'_f : Relación cen. vol./cong. en peso.
($c'_f = f' / (c' + f')$).
- c'_w : Relación agua/cong. en peso.
($c'_w = w' / (c' + f')$).

Siendo γ_c y γ_f los pesos específicos del cemento y de las CV respectivamente y K el cociente γ_c/γ_f , se verifican las relaciones:

$$c'_f = \frac{1}{1 + K(1/c_f - 1)}$$

$$c_f = \frac{K}{K - 1 + 1/c'_f}$$

Admitiendo como valor medio de K el de

3/2^{4,7}, se tiene que el límite inferior anteriormente expresado ($c_f = 0,40$) equivale en término medio a $c_f = 0,50$.

VI.2 Aparición del hormigón con alto contenido de cenizas volantes

Es improbable que las ventajas del HFCC hubieran podido ser descubiertas progresando en la línea de uso de las cenizas volantes como una simple sustitución del cemento. Para comprender el empleo de las CV como un cuarto ingrediente del hormigón se hace necesario conocer cómo se desarrolló el HFCC^{19,20}:

En 1974 se propuso un nuevo método de construcción de presas de gravedad de hormigón, en ese momento más caras que las de tierra. Se sugirió que el método utilizado de construir bloques monolíticos debía ser sustituido por un método consistente en extender un hormigón de baja docilidad a todo lo largo de la presa y sin juntas, que después sería compactado con rodillo vibratorio.

En este sentido se empezó a trabajar a mediados de los años 70, llevándose a cabo varias investigaciones de laboratorio y varios ensayos a escala real. Se ensayaron diversos tipos de hormigón in situ: su densidad era baja, no se producía una adecuada unión entre tongadas sucesivas, y era algo más permeable que el hormigón convencional usado en las presas.

A finales de los años 70 se comprobó que la razón de estos problemas era la falta de pasta²¹, que llenase los huecos formados por el árido fino. Por consiguiente, se había de encontrar algún método que aumentase el contenido de pasta en el hormigón; no podía usarse el cemento por razones de costo y por los problemas potenciales que surgirían como consecuencia del calor generado en la hidratación. Fueron entonces usadas las CV, inicialmente como un filler de tamaño similar al del cemento. Durante un muy extenso programa de investigación llevado a cabo en 1978 a raíz de la construcción de la presa de Milton Brook en Gran Bretaña^{22,23} se comprobó que realmente se requería un volumen mínimo de pasta, y que la proporción óptima de cemento a CV en volumen era entre 30:70 ($c_f = 0,70$) y 20:80

($c_f = 0,80$) en función de las propiedades de los restantes componentes. Era ésta una proporción de cenizas más alta, con mucho, que todas las usadas hasta la fecha.

Durante los ensayos a escala real en los cuales se ensayó este tipo de hormigón, se comprobó que podía ser extendido con facilidad y compactado con rodillo vibratorio. En las muestras tomadas de ese hormigón compactado se observó una alta densidad y una buena unión entre capas sucesivas. Igualmente, las propiedades relativas a la resistencia fueron bastante mejores de las que cabía esperar con la tecnología convencional del hormigón.

El proyecto concluía que el HFCC es satisfactorio para ser usado en presas y que el método de construcción es posible y económico.

Usando la experiencia adquirida en el diseño del hormigón de alto contenido de CV compactado con rodillo, ha sido posible extender el método de dosificación a todos los tipos de hormigón y para toda clase de trabajabilidades desde la propia del hormigón compactado con rodillos hasta la del hormigón fluido usando superplastificantes.

En todos los casos, el mismo concepto de utilizar las CV como un ingrediente adicional con «personalidad» propia se ha comprobado económico y beneficioso para las propiedades del hormigón fresco y endurecido. Sólo de este modo se pueden alcanzar todas las ventajas que es posible conseguir con el uso de las CV.

IV.3 PROPIEDADES DEL HORMIGON CON ALTO CONTENIDO DE CENIZAS VOLANTES

IV.3.1 Propiedades del hormigón fresco

IV.3.1.1 Trabajabilidad

(Este término se emplea como sinónimo de docilidad).

El HFCC es un material cohesivo fácil de manejar, en el que no aparece la segregación y generalmente fácil de consolidar.

Las CV aumentan la trabajabilidad del hormigón, como ya se ha dicho, debido al efecto lubricante de deslizamiento que producen las par-

tículas esféricas que constituyen dichas cenizas, frente al predominio de las formas angulares en las partículas de cemento Portland. En general, para obtener mezcla de igual trabajabilidad, el contenido de agua del hormigón puede por tanto ser reducido conforme aumenta la proporción de CV respecto al contenido de material conglomerante (c.). Así, normalmente un HFCC tendrá un contenido de agua más bajo que un hormigón ordinario con cemento Portland de igual resistencia a los 28 días e igual trabajabilidad. Sin embargo la trabajabilidad del HFCC es más susceptible a los cambios en el contenido de agua que lo es en el hormigón convencional.

Se deduce, pues, que ha de tomarse gran cuidado en la precisa dosificación de los ingredientes, pero como señala Procter ²⁵ las precauciones requeridas no son mayores que las que cabe esperar de un contratista responsable siguiendo normas de buena práctica.

Por otra parte, el alto contenido de CV hace el material ideal para ser bombeado, así, por ejemplo, un HFCC con un $c_v = 0,60$ puede ser bombeado con una docilidad de tan sólo 70 mm de asiento en cono Abrams ²⁶; para bombear un hormigón ordinario usando los mismos áridos, el asiento ha de ser superior a los 100 mm. Esta es una de las ventajas importantes encontradas por los contratistas.

En general, los HFCC parecen ser mucho más trabajables que lo que indican los valores de asiento en cono:

Haque et al.¹⁸ han realizado diversos ensayos con HFCC en los que estudiaron tres series con valores de c_v de 0,4, 0,5, 0,67 y 0,75, la primera de dichas series utilizada como referencia, la segunda igual a la anterior, salvo que los contenidos de agua se ajustaron de modo que no hubiera asiento (se designa con las letras NS), y la tercera también igual a la primera pero con la adición de superplastificante (SP) a razón de 190 ml por cada 100 kg del total de material conglomerante (ver Tabla 2).

En estos ensayos se comprobó que un HFCC con asiento de 25 mm se comportaba en la vibración también como un hormigón normal con 50 mm de asiento. Incluso los hormigones sin asiento fueron fácilmente moldeados y compactados en una mesa vibratoria standard.

TABLA 2
PROPIEDADES HORMIGON FRESCO

No.	Designación mezcla	c_w	Propiedades del hormigón fresco		
			Asiento mm	Densidad kg/m ²	Contenido de aire, %
1	0.40	0.52	40	2.240	6.4
2	0.50	0.40	35	2.210	8.0
3	0.67	0.49	60	2.200	8.0
4	0.75	0.47	45	2.260	6.2
5	0.40-NS	0.41	—	2.280	5.5
6	0.50-NS	0.38	—	2.250	4.7
7	0.67-NS	0.38	—	2.330	4.7
8	0.75-NS	0.40	—	2.320	4.7
9	0.40-SP	0.43	30 (5)	2.240 (2.3007)	7.8 (5.5)
10	0.50-SP	0.41	35 (10)	2.250 (2.300)	7.0 (5.8)
11	0.67-SP	0.41	30 (5)	2.250 (2.300)	6.6 (5.3)
12	0.75-SP	0.42	45 (20)	2.250 (2.300)	6.0 (4.6)

Entre paréntesis valores 40 mín. después de la primera medición.

En todas las series, el valor c_w disminuía con un aumento del contenido de CV. Como era de esperar, para similar trabajabilidad, las mezclas con superplastificante tenían unos valores menores de c_w .

En general, la reducción de agua, para una combinación dada de áridos, es una función del tipo de CV, de la cantidad de la misma, y de la cantidad de cemento. Conforme aumenta la cantidad de CV el tipo al que éstas pertenecan se hace menos importante.

En este punto cabe recordar que cuanto más bajo sea el contenido de agua más favorables serán las condiciones del hormigón frente a la durabilidad. Sin embargo, los hormigones de baja trabajabilidad, como el hormigón seco compactado con rodillo, deben tener un contenido mínimo de pasta ¹⁷ para alcanzar una densidad satisfactoria y una adecuada fusión entre capas (de este tipo de hormigón se hablará más adelante).

Respecto a la trabajabilidad del HFCC en aplicaciones estructurales, se puede admitir²⁴ que una mezcla con $c_v = 0,6$ y $c_w = 1$ es válida como hormigón estructural para ser vibrado por inmersión, si bien, dado que por la gran trabajabilidad requerida conviene disminuir el conte-

nido de árido, puede ser necesario disminuir el valor de c_w .

Influencia de los aditivos en la trabajabilidad:

- **Superplastificantes:** Los superplastificantes funcionan bien con los HFCC y son en general beneficiosos y económicos. Se ha comprobado que, a dosis normales, aumentan la trabajabilidad en mayor proporción que lo hacen en un hormigón convencional.
En los trabajos llevados a cabo por Mc Currich²⁵ con superplastificantes comerciales se comprobó que añadiendo tales compuestos se producía una dramática reducción del tiempo VeBe (conocido método vibratorio para medir la consistencia) de 25 a 4s indicando la mejora alcanzada en la trabajabilidad.
- **Aireantes:** Las burbujas de aire pueden ser incluidas en el hormigón con amplios márgenes de trabajabilidad y de contenidos de CV. La dosis de aireante es normalmente algo mayor que la utilizada con hormigones de cemento Portland convencionales y es dependiente de las características de las cenizas, el tipo de aireante y el valor de c , 12,20.

Como señalan Haque et al.¹⁸ es posible alcanzar un adecuado sistema de burbujas de aire en los HFCC usando aditivos aireantes convencionales. En todas las mezclas de la Tabla 2 la cantidad total de aireante fue siempre la misma. Los resultados indicados en la columna 3 indican que la efectividad de tales aditivos disminuye ligeramente conforme c' aumenta. Se obtuvo el contenido de aire deseado de 4,5 a 8 por 100, incluso en el caso de hormigón sin asiento, en donde comparativamente se disponía de menos agua para crear el sistema de burbujas. La presencia del superplastificante no pareció afectar la capacidad del hormigón para admitir y retener aire. Finalmente, se observó en todos los hormigones una rigidización aparente al cabo de 40 min. (detectada por la disminución del asiento) atribuible en parte al colapso del sistema de burbujas de aire originado por la adsorción del compuesto químico añadido a las CV.

IV.3.1.2 *Densidad*

La densidad de este tipo de hormigones es similar a la de los hormigones normales. Esto se atribuye a la mejora en la trabajabilidad causada por la presencia de la ceniza¹⁸. Al disminuir la demanda de agua se compensa la menor densidad de las cenizas. Los resultados incluidos en la Tabla 2 indican que hay un incremento marginal en la densidad del hormigón fresco en las mezclas $c' = 0,75$ respecto a las de $c' = 0,40$ en las tres series. Este incremento puede estar relacionado con el aumento en el valor de P' (relación pasta/cemento) de 0,55 a 0,57 para las mezclas de 0,4 a 0,75 respectivamente.

La ventaja de los HFCC sobre los hormigones pobres de consistencia seca convencionales es la mayor densidad de aquellos debido al mayor valor de P' sin las desventajas concomitantes de excesivo calor de hidratación y agrietamiento por retracción. El alto contenido de pasta contiene la exudación y la segregación, mejorando la compactabilidad y dando lugar a una mayor densidad.

IV.3.2 *Propiedades del hormigón endurecido*

IV.3.2.1 *Microestructura e hidratación*

En este apartado se siguen los resultados de los estudios realizados por Cabrera y Plowman sobre varios hormigones cuyo c variaba entre 0,0 y 0,85²⁵.

En general se puede decir que la microestructura de las pastas endurecidas de cemento puede contemplarse como un sistema de tres fases:

- **Poros y agua:** Los poros están llenos de agua o gases. El volumen de poros está directamente relacionado con la relación agua/cemento de la pasta fresca o del hormigón fresco, que como es sabido, es la razón básica de la importancia de dicha relación en el desarrollo de la resistencia. Sobre este tema de la resistencia y en particular su relación con la porosidad, se volverá a hablar más adelante.

- **Fase sólida:** Aparte de los áridos, que para una mezcla particular pueden considerarse constantes, la fase sólida de los hormigones con

CV consiste en:

1. Cemento no hidratado.
2. Productos resultantes de la hidratación del cemento.
3. Cenizas volantes.
4. Productos resultantes de la hidratación de las CV y del $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
5. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Hidróxido de calcio, CH).
6. Agua retenida en los microporos de los geles hidratados.

Sólo se hará referencia aquí a los efectos de las CV y la magnitud de su contribución a la fase hidrata del sistema que es donde se encuentran diferencias con respecto a los hormigones convencionales con CV.

En el estudio mencionado, la contribución de las CV a la fase hidratada se hizo controlando la cantidad de CH a varias edades para cada hormigón mediante difracción de rayos X y mediante análisis termogravimétrico (ver fig. 1).

Los valores de c_i y c'_i de las mezclas (hormigones) recogidas en la figura anterior fueron:

Mezcla	1	4	5	6	7
c_i	0.00	0.60	0.69	0.77	0.85
c'_i	0.00	0.50	0.60	0.70	0.80

Con estos métodos se comprobó de modo concluyente que el CH generado durante la hidratación del cemento es usado en la reacción con los componentes de las CV lo que hace aumentar el volumen de los productos resultantes en la hidratación reduciéndose, en consecuencia, la porosidad del sistema. Obsérvese, sin embargo, el comportamiento radicalmente distinto del hormigón sin CV.

Tomando, en la anterior figura, como indicación simple de la velocidad de la reacción CH-

CV la pendiente de las líneas, dicha velocidad parece ser constante para cualquier cantidad de CV (entre los hormigones de alto contenido; la mezcla 1 no sólo no tiene esa velocidad común sino que es de signo contrario).

Un hecho ampliamente comprobado es la menor elevación de la temperatura debida a la hidratación; esto es una gran ventaja en vertidos voluminosos de hormigón en masa, pero incluso para losas tan finas como las usadas en pavimentos de carretera la deformación inducida en un HFCC por elevación de la temperatura a edades tempranas es menor que la inducida en un hormigón convencional.

Micromorfología

la micromorfología de los productos de la hidratación del cemento ha sido estudiada por muchos investigadores, sin embargo, la clasificación más simple fue la propuesta por Diamond⁽²⁷⁾. Esta clasificación distingue en cuatro morfologías: Tipo I, fibras alargadas; Tipo II, malla reticulada; Tipo III, granular; y Tipo IV, productos internos.

Para resaltar las propiedades distintivas del HFCC se estudiaron numerosas microfotografías de las mezclas con más elevado contenido en CV a 4 y 56 días.

A los 4 días la morfología se caracteriza por la presencia de grandes huecos, en donde predominan la ettringita y las fibras del Tipo I. Estas fibras crecen preferentemente hacia donde hay espacios vacíos. En contraste con estas estructura, en las zonas en que no hay espacios vacíos los productos resultantes de la hidratación son principalmente del Tipo III.

Se observaron áreas en las superficies de las partículas de CV en las que no hay productos de reacción, las cuales se asocian a las agujas de mullita, presentes como parte de la fracción cristalina de las CV. Se puede afirmar que la reacción entre las CV y el CH comienza ya a los 4 días, en lo que respecta a éste.

Del análisis de la superficie de fractura de una muestra de 4 días de edad se ha podido deducir la variabilidad de las morfologías de las superficies de CV y de la pasta de cemento. Algunas superficies de CV aparecen limpias y sin características distintivas claras, mientras que

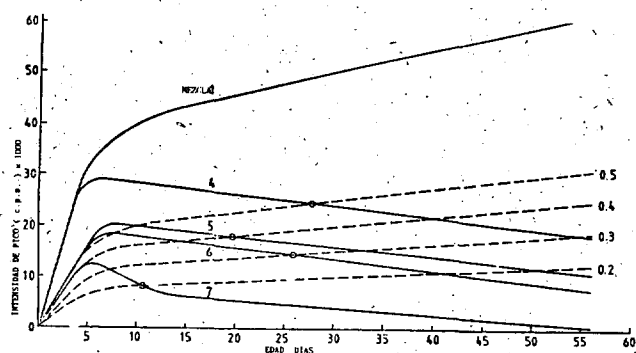


Figura 1.—Relación entre el contenido de CH y la edad.

otras están completamente cubiertas de productos de reacción. Por el contrario, a los 56 días se observa el desarrollo de una estructura masiva alrededor de las partículas de CV con morfologías indiferenciadas.

Se puede afirmar también, que la estructura del CSH originado en la hidratación del cemento no difiere apreciablemente de los componentes hidratados originados en la reacción CH-CV. Al igual que con cementos puros, la morfología abierta, que sí presenta características distintivas, se hace cada vez más masiva e indiferenciada conforme aumenta el tiempo de hidratación.

Cabe señalar también, una morfología del CSH característica de los HFCC (si bien no muy importante). Se trata de una variante del Tipo I semejante a un «espagueti».

IV.3.2.2 Resistencia a la compresión

a) En probetas de laboratorio:

De acuerdo con los ya conocidos ensayos de Haque et al.¹⁸, el comportamiento de las probetas de HFCC en los ensayos de compresión puede ser detallado como sigue:

La resistencia a compresión de un HFCC con una relación dada de áridos a cemento, disminuye conforme aumenta el contenido de CV (ver Tabla 3). La pendiente de las curvas mostradas en la fig. 2(a) indica que la cuantía de la reducción en la resistencia disminuye en todas las edades conforme aumenta c' . Las curvas tie-

nen una pendiente considerablemente mayor para c' , entre 0,4 a 0,5, suavizándose gradualmente para valores mayores.

Sin embargo, en los hormigones sin asiento la resistencia aumenta entre 0,4 y 0,5 en todas las edades (fig. 2(b)), cayendo después. En el caso del hormigón con superplastificante no hay pérdida apreciable de resistencia entre 0,4 y 0,5, siendo las curvas más pendientes entre 0,67 y 0,75 indicativo de la más alta magnitud de la pérdida de resistencia (fig. 2(c)).

En suma, la variación de la resistencia parece depender de la consistencia y de la presencia o no de aditivos.

La resistencia a los 28 días de un hormigón

TABLA 3
RESISTENCIAS

Mezcla	Resistencia, MPa					
	Resistencia a compresión			Tracción indirecta	Módulo de rotura	
	7 días	28 días	91 días	28 días	28 días	91 días
0.40	13.6	22.5	31.9	3.4	4.2	5.4
0.50	10.1	20.4	27.4	2.5	3.7	5.2
0.67	5.8	15.3	21.5	2.4	3.2	4.6
0.75	5.1	15.5	20.9	2.3	2.9	3.6
0.40-NS	19.7	31.1	40.2	4.0	5.2	6.4
0.50-NS	23.1	35.6	44.9	4.2	5.1	6.4
0.67-NS	12.2	24.1	32.6	2.8	4.1	5.3
0.75-NS	7.9	19.9	25.8	2.4	3.6	4.4
0.40-SP	16.6	26.8	35.2	3.3	4.4	5.2
0.50-SP	14.9	26.0	35.2	3.2	4.1	5.2
0.67-SP	9.7	22.9	32.7	2.4	3.6	4.9
0.75-SP	6.6	18.9	27.5	2.4	3.0	3.8

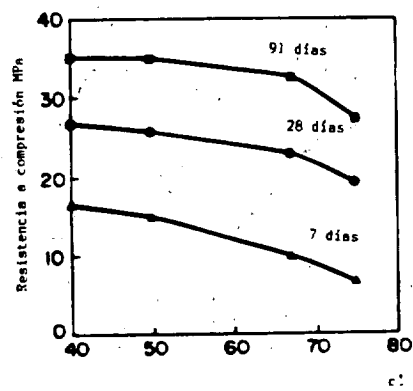
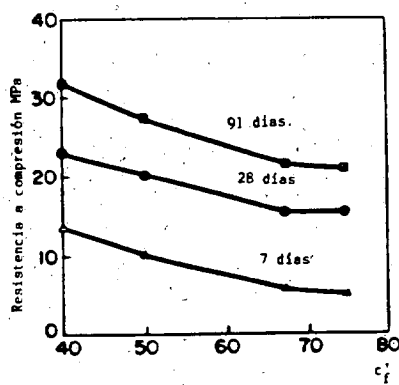
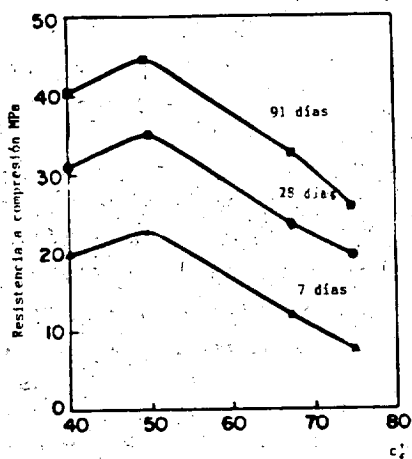


Figura 2.—(a) HFCC, (b) HFCC sin asiento, (c) HFCC con superplastificante.

normal es usualmente de 1,5 a 1,7 veces la que tiene a los 7 días. Esta relación varía entre 1,5 y 3 para los hormigones investigados.

Conforme aumenta el contenido de CV en una serie dada, la relación aumenta, ganancia de resistencia atribuible a la propiedades puzolánica y conglomerantes de las CV. Para la misma c' , el desarrollo de la resistencia entre 7 y 28 días depende de la resistencia del hormigón. Cuanto mayor sea ésta, menor es tal desarrollo de resistencia.

Hay un continuo y significativo aumento de la resistencia más allá de 28 días. Sin embargo, aquí ya no parece influir claramente la c' . Por término medio, el aumento de resistencia entre 28 y 91 días es del 38 por 100.

En lo que respecta a las resistencias en edades tempranas de los hormigones con CV se han podido encontrar afirmaciones que aseguran unos valores inaceptablemente bajos para las mismas^{11,25}. Sin embargo, con un HFCC adecuadamente dosificado esto no es así, lo cual se ha comprobado en aquellos casos en que se ha tenido la oportunidad de comparar el HFCC con un hormigón convencional. Por ejemplo, durante la construcción del aeropuerto de Heathrow²⁵ se compararon los resultados de las resistencias a compresión en probetas cúbicas en un hormigón aireado convencional con otro HFCC con similar contenido de aire. Los dos hormigones resultaron tener una resistencia muy parecida a los 28 días, pero a 1 día, el HFCC era más resistente y menos a los 3 y 7 días. (A los 91 días la diferencia a favor del HFCC era considerable, aumentando a mayores edades).

Para el estudio de la evolución resistente a más largo plazo son de gran interés los ensayos realizados por Mc Currich²⁵, porque además de contemplar resistencias en edades de hasta 1.000 días, analizan la influencia de diversos aditivos.

Como se observa en la fig. 3, para un hormigón en el que se usó un retardador de fraguado y un fluidificante convencionales, todavía a los 1.000 días continuaba aumentando la resistencia, aunque, claro está, a una velocidad menor que al principio.

En la fig. 4 se muestra la evolución de la re-

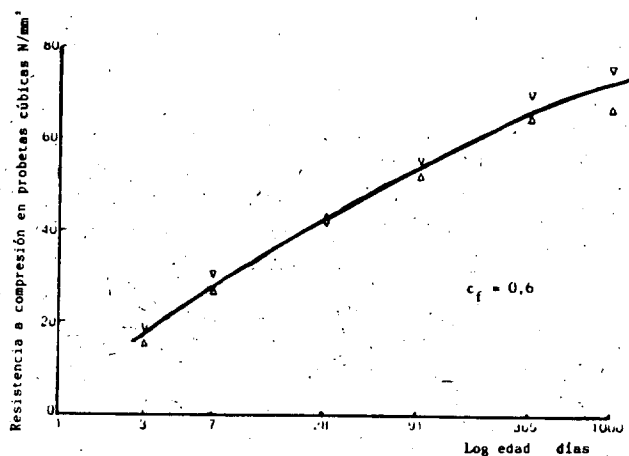


Figura 3.—HFCC con fluidificante y retardador de fraguado²⁵.

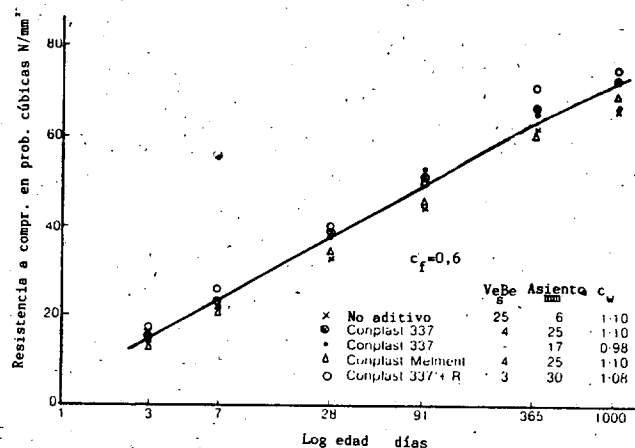


Figura 4.—HFCC con superplastificantes²⁵.

sistencia en hormigones a los que se adicionaron distintos superplastificantes existentes en el mercado.

Se observa que en todos los casos hay un continuo aumento de la resistencia, con una pendiente a los 1.000 días todavía relativamente fuerte; además, se observa que el desarrollo de la resistencia sigue la misma pauta en los hormigones con aditivo que en la mezcla de control sin él.

Separación de las contribuciones del cemento y de las CV a la resistencia a compresión y relación de ésta con el valor de c_w :

En 1896 Feret propuso la siguiente relación entre la resistencia a compresión de un mortero (u hormigón) y los volúmenes de cemento, agua y aire:

$$s = K \left(\frac{c}{c + w + v} \right)^2$$

s : Resistencia a compresión.
K : Coeficiente de Feret.

En el proyecto CIR^{22, 23} se usó este criterio para analizar la contribución separada de las CV y el hormigón en la resistencia a compresión. Asumiendo que el contenido de aire de todas las muestras ensayadas era cero (todas las medidas de densidad en probetas y muestras estuvieron cerca del máximo teórico, sin aire), la anterior ecuación se transforma en:

$$f_c = K \left(\frac{C_c}{C_c + C_w} \right)^2 = K \left(\frac{1 - C_f}{1 - C_f + C_w} \right)^2$$

f_c : Resistencia a compresión en probeta cúbica.

La contribución del cemento a la resistencia puede ser calculada por consiguiente con cualquiera de las dos expresiones anteriores, ya que el coeficiente K puede ser calculado a partir de un hormigón sin cenizas resultando:

$$K = f_c (1 + c_w)^2$$

Estas contribuciones pueden ser expresadas en función de c_w . La fig. 5 recoge un ejemplo para un hormigón de $c_f = 0,6$. La curva que define la contribución de las CV es más inclinada que la del cemento, y es más sensible a c_w . No hay contribución a los 7 días por encima de $c_w = 1,75$ y a los 28 por encima de aproximadamente 2,2. Esta es una posible explicación de la baja resistencia de los hormigones con cenizas a edades tempranas cuando son diseñados por métodos convencionales.

En un hormigón compactado con rodillo con $c_f = 0,6$ y $c_w = 1$, a los 91 días la contribución a la resistencia a compresión es mayor que la del cemento Portland y al año es aproximadamente un 35 por 100 mayor.

Por último, citar la interesante relación obtenida estadísticamente por Cabrera y Plowman²⁶ que correlaciona la porosidad y la resistencia de los HFCC:

$$s = 96 \cdot \exp(-0,1163 p)$$

s: Resistencia a compresión en N/mm².
p: Porcentaje de poros capilares.

Aunque esta fórmula es aceptable para los

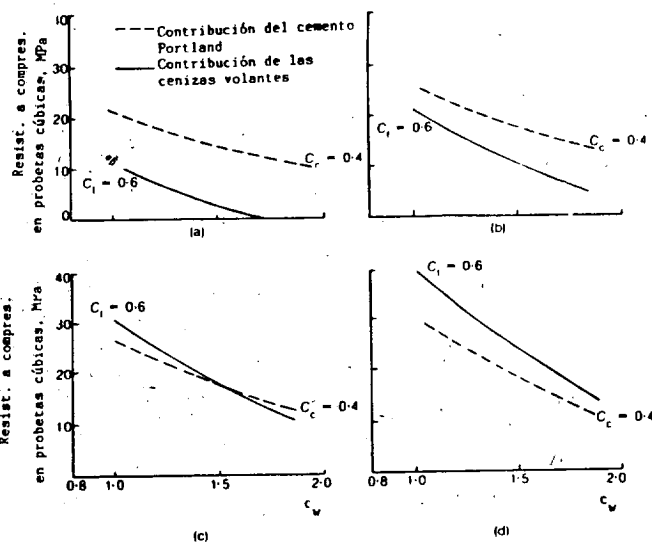


Figura 5. — Relación entre las contribuciones a la resistencia a compresión de las CV y el cemento Portland, y c_w : (a) a 7 días, (b) a 28 días, (c) a 91 días, (d) a 365 días.

casos estudiados, por la satisfactoria correlación obtenida, no parece aconsejable usarla como una relación general, sin embargo, lo que sí se puede deducir de ella es que los hormigones ordinarios y los HFCC siguen la misma ley que otros materiales en lo que respecta a la influencia de la porosidad en sus propiedades mecánicas.

b) En testigos extraídos in situ:

La resistencia de un hormigón es más importante que la de una probeta de laboratorio, y se ha indicado que algunos hormigones con CV no desarrollan esa resistencia del mismo modo que lo que indican las probetas de laboratorio⁽²⁸⁾.

Esto no se ha observado con los HFCC, en diversas obras se han extraído numerosos testigos y las resistencias encontradas han resultado ser, casi siempre, algo superiores a las de las probetas conservadas en condiciones de laboratorio. Por ejemplo, en el aeropuerto de Aberthaw se extrajeron a las 24 horas 31 testigos que fueron ensayados a los 3 días. La resistencia de éstos fue de 28 MPa frente a los 25 MPa para probetas preparadas en laboratorio con el mismo hormigón. Desde los 3 a los 500 días de edad, la resistencia de los testigos fue mayor.

Estos resultados, junto a los de otras investigaciones, más adelante comentadas, se muestran en la fig. 6.

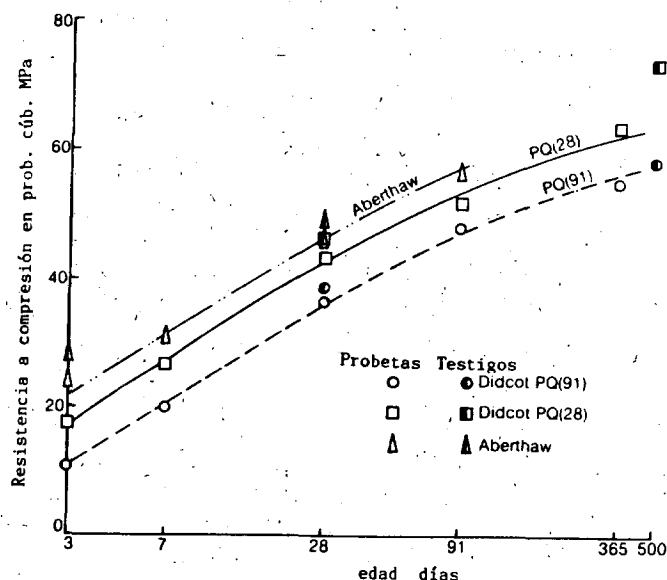


Figura 6. — Relación entre la resistencia a compresión de probetas y testigos de un HFCC.

IV.3.2.3 Resistencia a la tracción

La variación con c_c (ó c'_c) de la resistencia a la tracción medida indirectamente con el ensayo brasileño, sigue una ley similar a la que se observó en la resistencia a compresión: la resistencia a tracción disminuye cuando aumenta c'_c (ver Tabla 3).

Según Haque et al.¹⁸, para una serie dada de hormigones, la relación de dicha resistencia a los 28 días con la correspondiente resistencia a compresión no cambió apreciablemente. El valor medio para las doce mezclas fue de 0,13, siendo un poco menor (0,12) en las series segunda y tercera.

IV.3.2.4 Resistencia a la flexión

En lo que sigue, esta resistencia se cuantifica a través del Módulo de Rotura (en inglés, Modulus of Rupture, MR. Norma ASTM C 778), utilizado en muchos países en vez de la resistencia a flexotracción.

De la ref. 18, el módulo de rotura de los HFCC disminuye más rápidamente con c'_c superior a 0,67, mientras que entre $c'_c = 0,4$ y $c'_c = 0,67$ la disminución es más gradual. Los MR de estos hormigones son ligeramente mayores que los de hormigones normales con similar resistencia a compresión.

Valores medios de la relación entre el MR y la resistencia a la compresión son 0,17 a los 28 días y 0,16 a los 91, variando poco con c'_c . Estas cifras son mayores que en un hormigón convencional, lo que indica, de nuevo, el continuo desarrollo de resistencia de los HFCC más allá de los 28 días. Los resultados anteriores permiten afirmar que es posible obtener estimaciones razonables del MR en los HFCC a partir de su resistencia a compresión.

IV.3.2.5 Módulo de elasticidad dinámico

Este módulo es generalmente mayor que el estático, pudiendo determinarse a partir de la velocidad de propagación de las ondas y la densidad del hormigón. En la Tabla 4 se muestran los valores obtenidos en los ensayos de Haque.

Dunstan²² sugiere que una razonable estimación del módulo de elasticidad estático de los HFCC puede ser obtenido usando la siguiente relación:

$$E_s \text{ (GPa)} = 0,98 E_d \text{ (GPa)} - 10,6$$

IV.3.2.6 Capacidad de deformación en tracción

Se ha comprobado que la capacidad de deformación en tracción disminuye con el aumento de c'_c y la relación de áridos a

TABLA 4
MÓDULO DE ELASTICIDAD DINAMICO Y
CAPACIDAD DE DEFORMACION EN TRACCION
DE HFCC¹⁸

Mezcla	Velocid. ondas m/s		Mód. dinámico GPa		Capacidad de deformación en tracción x 10 ⁶	
	28 días	91 días	28 días	91 días	28 días	91 días
0.40	4320	4500	35.5	38.6	118	140
0.50	4270	4420	34.3	36.7	108	142
0.67	4305	4835	34.6	35.7	92	129
0.75	4275	4355	35.1	36.4	83	99
0.40-NS	4644	4727	41.8	43.3	124	148
0.50-NS	4725	4810	44.6	46.2	114	139
0.67-NS	4652	4696	42.9	43.7	96	121
0.75-NS	4710	4705	43.7	43.7	82	101
0.40-SP	4505	5000	38.6	47.6	114	109
0.50-SP	4525	5050	39.1	48.8	105	107
0.67-SP	4465	4863	38.1	45.2	94	108
0.75-SP	4411	4602	37.2	40.5	81	94

conglomerante²⁹. Dunstan³⁰ afirma que en el hormigón compactado con rodillo alcanza valores significativamente más altos que en un hormigón convencional usado en el cuerpo de una presa.

Los resultados de los ensayos de Haque¹⁸ se incluyen en la Tabla 4, en éstos la capacidad de deformación en tracción se determinó a partir de la resistencia a flexión y el módulo dinámico. Corroboran efectivamente su disminución al aumentar c' , e indican además su aumento con la edad en todas las probetas.

IV.3.2.7 Durabilidad

Esta propiedad es difícil de definir sin considerar las condiciones ambientales particulares. Sin embargo, la resistencia del HFCC a la deterioración puede, igual que en los demás hormigones, asociarse a su compactación y a la porosidad de la pasta. Uno de los criterios usados en el desarrollo de los HFCC ha sido obtener una alta densidad y en todos los ensayos del proyecto CIRIA^{19,22} la densidad de los testigos resultó ser igual o mayor que la de las probetas cúbicas de laboratorio, siendo aproximadamente del 99 por 100 de la densidad teórica máxima de hormigón sin aire.

En un hormigón convencional la resistencia está relacionada con la relación agua/cemento y ambas lo están con la porosidad. Como ya se ha indicado, Cabrera y Plowman²⁶ han comprobado que estas relaciones son también aplicables al HFCC; limitando el valor de c , la porosidad obtenida será más baja, y en consecuencia, se conseguirán altas resistencias y durabilidades.

Resistencia a las heladas:

En los ensayos de Haque et al.¹⁸ se comprobó la resistencia a la acción de los ciclos de hielo-deshielo siguiendo la ASTM C 666, método A. Usando el criterio de una reputada organización canadiense, un factor de durabilidad frente a la acción de las heladas (DF) por debajo de 30 indica un hormigón de mal comportamiento, mientras que se consideran favorables factores superiores a 40.

De los valores recogidos en la Tabla 5 se de-

TABLA 5
RESISTENCIA A LOS CICLOS DE HIELO-DESHIELO

Mezcla	Ciclos hasta rotura	Factor de durabilidad %
0.40	300*	72
0.67	187	37
0.75	90	18
0.40-NS	268	53
0.50-NS	198	40
0.67-NS	222	46
0.75-NS	150	30
0.40-SP	314*	95
0.50-SP	303*	74
0.67-SP	300	55
0.75-SP	314	85

duce que cabe esperar un buen comportamiento sólo en los hormigones con c' menor que 0,67. Los hormigones sin asiento, debido al menor valor de c_w parecen ofrecer mejor respuesta que los de la serie primera de mayor trabajabilidad.

Por su parte, los hormigones con superplastificante ofrecen un factor de durabilidad mucho mayor. Este factor, en las mezclas 0,67-SP (55 por 100) es superior a los de las mezclas 0,67 y 0,67-NS. Parece, pues, que el uso de superplastificante en conjunción con aireante aumenta considerablemente la potencial resistencia a las heladas de los HFCC.

Reacción árido-álcalis:

Uno de los métodos recomendados para evitar el deterioro del hormigón por reacción de los áridos con los álcalis del cemento, es usar CV en el mismo (en porcentaje de alrededor del 20 por 100 en peso), y reducir el contenido en álcalis del hormigón (a 3 kg/m³ o menos)³¹. En general, un HFCC diseñado con el método que se describe más adelante cumplirá estos requerimientos a menos que la CV sea muy expansiva. En estos casos pueden modificarse fácilmente las proporciones de la mezclas hasta que se cumplan, pero el hormigón resultante no será ya el más barato.

Resistencia a los sulfatos:

La resistencia a los sulfatos de un hormigón es mejorada en la práctica totalidad de los casos, con la incorporación de CV¹³ y se ha

comprobado que los HFCC tienen una alta resistencia al ataque de los sulfatos^{20,22}.

Por otra parte, como es sabido, los aireantes aumentan también la resistencia a los sulfatos por la disminución de la permeabilidad consecuencia de la mayor densificación que se produce al disminuir la relación a/c y por el bloqueo de los capilares producido por las burbujas de aire que impide la entrada del SO₂ (en el caso de los HFCC éste es el mecanismo más importante). Según esto, si ya de por sí los HFCC son adecuados para ambientes en que existen sulfatos, aquellos a los que se le adicionen aireantes lo serán más todavía.

IV.3.2.8 Permeabilidad

Aparte de la conocida influencia negativa de la permeabilidad en la durabilidad en todo tipo de hormigones, este tema es de especial importancia a los efectos de este trabajo por ser determinante del desarrollo de las presiones intersticiales en un macizo de hormigón, cuestión de gran relevancia en presas, que como ya se ha dicho, y se comentará con más extensión en otro apartado, es una de las aplicaciones fundamentales de los HFCC.

De las investigaciones realizadas por Butler³², en las que se analizó la permeabilidad de testigos endurecidos extraídos de la estructura real, y de muestras de distintas amasadas con hormigones de $c'_1 = 0,5$ y grava de 20 mm. (mezcla A) y $c'_1 = 0,67$ y grava de 40 mm. (mezcla B), se pudo deducir lo siguiente:

- La abundancia de áridos de gran tamaño contribuyó a una penetración local alta.
- Los testigos extraídos fueron más susceptibles a la penetración que las muestras moldeadas.
- La penetración en el hormigón A fue local y aislada, mientras que la del B fue más generalizada. En ésta se midió un coeficiente de permeabilidad de 10^{-11} m/s.
- En el hormigón A las muestras dieron un coeficiente de permeabilidad de 10^{-12} y los testigos de $5 \cdot 10^{-12}$ m/s.

Las conclusiones extraídas fueron que en general el HFCC tiene una permeabilidad similar a la de un hormigón convencional o algo me-

nor, haciéndose especial énfasis en que la determinación precisa de tal permeabilidad se debe apoyar en ensayos particulares mientras no aumenten los datos sobre este hormigón.

Con todo esto, aún no se puede decir que el desarrollo de las presiones internas en una presa construida con HFCC sea conocido. Es preciso realizar estudios que expliquen cuáles son los efectos de las juntas entre capas en estas presas, más numerosas (y con características bien diferentes) que las juntas de construcción de una presa convencional.

IV.3.2.9 Retracción

Los resultados de los ensayos de retracción llevados a cabo por Hague¹⁸ se condensan en la Tabla 6. Se refieren a la retracción medida en ambiente seco según especificaciones de la ASTM. Se puede observar que la retracción (en ambiente seco, se insiste) disminuye conforme aumenta el contenido de CV.

Los valores para los hormigones 0,40-NS y 0,75-NS, con el más bajo y más alto c'_1 , son casi idénticos, aproximadamente $450 \cdot 10^{-6}$ a los 91 días. El hormigón 0,50-NS dió la retracción más baja, mientras que el 0,67-NS dió el valor más alto a los 91 días, $550 \cdot 10^{-6}$.

Como muestra también la tabla anterior, la adición de superplastificantes da lugar a retracciones comparativamente más altas.

Los resultados de estos estudios concuerdan bien con los obtenidos por Dunstan²², quien obtuvo un rango de valores entre $400 \cdot 10^{-6}$ y

TABLA 6
RETRACCION EN HFCC

M	1 d	7 d	28 d	56 d	91 d
0.40	39	226	393	501	—
0.50	160	320	570	—	—
0.67	140	290	—	—	—
0.75	— 20	78	226	285	364
0.40-NS	60	220	370	430	450
0.50-NS	30	180	340	370	400
0.67-NS	60	240	470	510	550
0.75-NS	50	220	390	420	460
0.40-SP	85	230	405	480	500
0.50-SP	180	330	500	570	580
0.67-SP	90	215	370	580	580

$1.000 \cdot 10^{-6}$ con similares hormigones bajo, esencialmente, las mismas condiciones de ensayo.

IV.4 METODO DE DOSIFICACION DE LOS HFCC

El uso de un ingrediente adicional, particularmente, uno que contribuye a la resistencia de un modo diferente al cemento Portland, aumenta la dificultad de diseño de un hormigón. Estas dificultades se agravan si se tiene en cuenta, 1) que CV diferentes demandan diferentes cantidades de agua, y se comportan de modo diferente con los distintos tipos de cemento Portland, y 2) que el comportamiento del cemento anterior tiene un considerable efecto en el comportamiento global del HFCC.

Para superar estos problemas Dunstan²⁰ ha elaborado el método de dosificación que a continuación se desarrolla y que se emplea en la práctica con la ayuda de un ordenador:

Casi todos los métodos de dosificación de prácticamente todos los hormigones con cemento Portland usan la relación de Abrams como un punto de partida. Dada la resistencia requerida, se define en consecuencia una relación a/c . En los HFCC esta relación es también un punto de partida. Véase fig. 7 (a). Esta figura muestra una relación bidimensional entre c_w y la resistencia del hormigón con cemento Portland. (en este caso c_w agua/cemento por no haber CV).

El uso de las CV en el hormigón como un ingrediente separado significa que habrá una contribución adicional a la resistencia que se sumará a la del cemento. Por consiguiente, un nuevo eje es añadido al modelo bidimensional (c_i), fig. 7 (b). Se tiene ahora un modelo tridimensional en el que la resistencia (eje Z) depende de c_w (eje X) y c_i (eje Y). Cuando $c_i = 0$ (es decir, hormigón convencional con cemento Portland), la única relación requerida es la del plano XZ, que define un límite para la relación tridimensional. Cuando $c_i = 1$ (es decir, no hay cemento, sólo CV), con CV de tipo F (sin propiedades conglomeras propias como ya se ha indicado), puede considerarse que la resistencia del hormigón será nula, lo que define otro

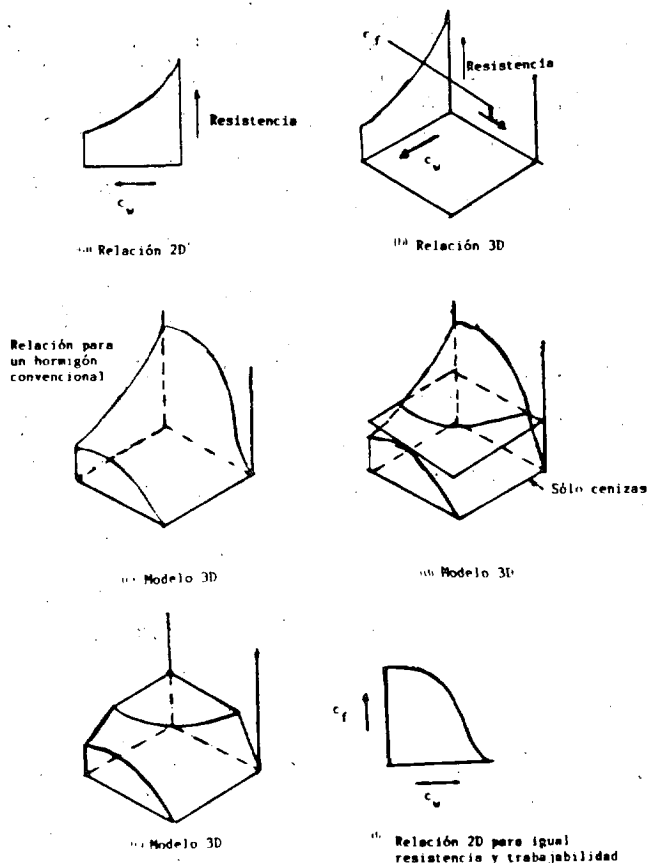


Figura 7.—Modelo para la dosificación de HFCC 25.

límite para el modelo. (El mismo método puede ser usado para definir la resistencia de hormigones con CV del tipo C, pero en este caso, cuando $c_i = 1$ la resistencia no es nula).

Usando los datos obtenidos a partir de 550 mezclas diferentes, ha sido posible crear un modelo tridimensional completo²⁵ (fig. 7 (c)).

Por lo tanto, cuando se especifica para un hormigón una determinada resistencia, en vez de tener un único valor de c_w , el modelo tridimensional al ser cortado por un plano horizontal ofrece una curva en la cual todas las mezclas tiene igual resistencia (fig. 7 (d)). Hay, en consecuencia, un número infinito de parejas c_w y c_i que pueden dar esa resistencia.

Entrando con las propiedades requeridas en el hormigón endurecido, por ejemplo, la resistencia a determinada edad (el programa usa diferentes modelos para diferentes edades) y para el hormigón fresco, por ejemplo, la trabajabilidad, el ordenador calcula la relación entre c_w y c_i que sastiface dichos requerimientos.

El objetivo introducido en el programa es obtener la dosificación más barata con los materiales disponibles. Para ello se introducen, además, las características de dichos materiales disponibles y su coste. Para cada combinación de los mismos, el programa calcula las proporciones óptimas de la mezcla. Estas pueden compararse y elegir el hormigón óptimo.

Con este método se ha comprobado que los hormigones más económicos usualmente tienen cantidades de CV más altas que las que hasta el presente se habían creído posibles.

IV.5 CALIDAD DE LAS CENIZAS VOLANTES

En la mayoría de las aplicaciones de los HFCC se han utilizado CV que no cumplirían las normas británicas para el uso de las CV en hormigón (ni en general las de otros muchos países). Se ha podido demostrar en varios estudios de laboratorio, ensayos a escala real, y ejecuciones reales^{19,25} que se puede confeccionar un hormigón satisfactorio con CV cuyo contenido de carbono y cuya retención en el tamiz de 45 μm son inaceptables de acuerdo con las especificaciones inglesas, americanas y españolas.

Quien puede causar dificultades es la variabilidad de CV de baja calidad y no el nivel de esas propiedades. Los problemas causados por esta variabilidad fueron superados en las obras anteriores con un control estrecho del proceso.

Con un CV de alta calidad (es decir, con bajo contenido de carbono y baja retención en el tamiz de 45 μm) son posibles mayores reducciones en la cantidad de agua de la mezcla. En los hormigones con CV normales, diseñados del modo convencional, la contribución de las mismas en la resistencia (a través de la reducción del agua necesaria) se puede conseguir más fácilmente usando CV de alta calidad⁽³³⁾, sin embargo, en los HFCC esto se puede conseguir con la mayoría de las CV.

Para dos hormigones de iguales propiedades, el que contenga la CV de más calidad tendrá un contenido de conglomerante menor debido a la mayor reducción posible de agua. El factor determinante será el coste total del hormigón, incluyendo el coste adicional del control necesitado si la CV es variable.

IV.6 USOS DE LOS HFCC

IV.6.1 Construcción de presas

Un cambio significativo en los métodos de construcción de presas en los últimos 20 años ha sido el uso de un sistema de colocación del hormigón en bandas continuas horizontales en vez de en vertidos aislados con posterior vibración interna. Ya a principios de los años 60 se colocó el hormigón en capas horizontales en la presa italiana de Alpe Gera, pero se instaló una membrana impermeabilizante de acero en la cara de aguas arriba y se dispusieron juntas de construcción. A principios de los años 70^(22,34) se sugirió la compactación con rodillo para la compactación de presas, como una extrapolación de los métodos usados en la colocación de suelos mejorados con cemento en explanadas de carretera. Nació así el hormigón (seco) compactado con rodillo (Roller compacted concrete, RCC). En español se ha designado en algunos casos por HCR, pero se mantendrá la abreviación RCC por estar más extendida).

Un RCC puede definirse como un hormigón de consistencia seca, sin asiento en cono, que es transportado, colocado, y compactado con la misma maquinaria que la usada en movimientos de tierra. Las proporciones de los ingredientes básicos de este hormigón varían considerablemente dependiendo de la función asignada a la estructura. Así, se han hecho RCC con contenidos de cemento de 66 a 249 kg/m^3 y con contenidos de CV de $c_1=0$ a $c_1=0.8$.

Se pretende aquí vincular la conocida técnica del RCC con los HFCC:

Los sistemas de compactación de hormigón con rodillo contemplan tres tipos de materiales diferentes:

- 1) Suelo estabilizado, como se usó en 1975 en la presa de Tarbela, Pakistan.
- 2) Hormigón pobre, con 100-120 kg/m^3 de material conglomerante con hasta un 30 por 100 de CV.
- 3) Hormigones con alto contenido de cenizas volantes, con los valores ya conocidos de c_1 .

Es decir, el HFCC es un tipo particular de RCC, en este caso.

La presa de hormigón ideal construida con el

sistema de compactación con rodillo debería tener las siguientes propiedades:

1. Baja permeabilidad.
2. Alta densidad.
3. Unión adecuada entre tongadas sucesivas.
4. Unión adecuada entre el hormigón de los paramentos exteriores, no compactado con rodillo, y el hormigón interno.
5. Baja retracción y alta resistencia a tracción.
6. Posibilidad de controlar la calidad con métodos factibles y rápidos.
7. Posibilidad de incorporar juntas, drenes, galerías, etc.

El HFCC, como se detalla ampliamente en los informes técnicos del CIRIA^{22,23}, satisface adecuadamente estos requerimientos.

Un ejemplo de las diferencias entre un hormigón pobre convencional de consistencia seca, adecuado para ser compactado con rodillo y un HFCC ($c' = 0,51$) se muestra en la Tabla 7. Con la misma relación agua/cemento el HFCC tiene una resistencia a los 7 días aproximadamente igual a la del otro hormigón a los 365 días.

Estas conclusiones llevaron al diseño en 1981 de una presa de gravedad en Milton Brook de HFCC con las siguientes características:

1. Inexistencia de juntas de contracción.
2. Núcleo impermeable de RCC colocado en capas de 300 mm de espesor.
3. Superficies externas formadas por elementos realizados con hormigón vertido. Estos elementos forman un paramento durable que contribuye a resistir la acción del hielo, pero no se les confiere la misión de barrera frente al agua.
4. Disposición de agujeros en las superficies externas para conseguir que las posibles

grietas por retracción se presenten en lugares seleccionados previamente.

5. Elementos de hormigón prefabricado en galerías, etc.

La fig. 8 muestra la secuencia de construcción: El hormigón interno se coloca primero y el encofrado deslizante se desplaza horizontalmente sobre él tras ser compactado, pero aún fresco, para conformar los elementos de las superficies externas entre los cuales se colocará el hormigón al día siguiente.

Consideraciones sobre el hormigón de los elementos externos:

Según lo visto se requieren dos hormigones para una presa de RCC construida del modo anterior: El RCC del interior y el hormigón de los elementos que forman las superficies externas.

Este último debe satisfacer las siguientes exigencias:

1. Debe formar una cara vertical a la salida del molde, porque la sección más económica de una presa de gravedad usualmente tiene el paramento de aguas arriba vertical o casi vertical.

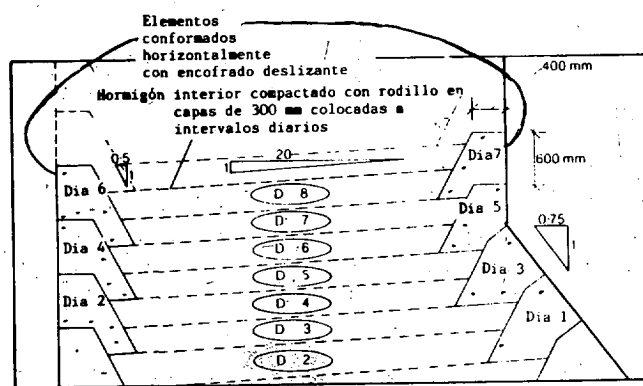


Figura 8.— Construcción de una presa de HFCC¹⁹.

TABLA 7
COMPARACION ENTRE UN TIPOICO HORMIGON POBRE SECO Y UN HFCC

	Dosificación (kg/m³)			Resistencia compresión prob. cúbica (MPa)			
	Cemento	CV	Agua	7 días	28 días	91 días	365 días
Hormigón pobre seco	132	0	133	13,6	16,9	17,8	19,0
HFCC	108	113	109	21,0	36,9	42,9	53,6

2. Dentro del encofrado se disponen vibradores por inmersión, por lo tanto, debe tener también una trabajabilidad acorde con este método de compactación.
3. Como a las 12-15 horas después de su colocación tiene que soportar la acción de los rodillos al compactar el hormigón interno, ha de tener una resistencia inicial suficiente.
4. Debe ser cohesivo y tener un contenido bajo de cemento para prevenir los problemas causados por el calor de hidratación.

En los ensayos a escala real llevados a cabo por el CIRIA²³ se comprobó que era difícil cumplir los requisitos con un hormigón convencional con VC. Se decidió extender el método de dosificación utilizado en el hormigón interior y se concluyó que el hormigón más adecuado era un HFCC con $c_f = 0,50$, que salía del molde a los 1,5-2 minutos después de la vibración sin deformación y con un acabado suave sin poros. Los ensayos de resistencia a compresión en probetas cúbicas mostraron que dicho hormigón tenía la resistencia asociada normalmente al hormigón estructural (29 MPa a los 7 días; 50 MPa a los 28 y 64 MPa a los 91), y que presentaba una trabajabilidad adecuada para la inmersión por vibración. Era, pues, plenamente satisfactorio.

Cabe señalar que estos elementos exteriores no son necesariamente una parte obligada de un diseño de una presa de RCC, pero las investigaciones del CIRIA mostraron que son, junto con el sistema de construcción de las mismas, muy ventajosos, pudiéndose aplicar esta sistema a otras estructuras de hormigón e incluso en presas en las que no se use RCC.

Otras aplicaciones en presas:

El comienzo de la construcción de la presa de Milton Brook se programó para Junio de 1981, pero ha debido ser aplazado por recortes presupuestarios de la administración inglesa.

Actualmente se está construyendo con HFCC la presa Upper Stillwater en Estados Unidos. Después de un extenso programa de ensayos a escala real en el verano de 1981, se decidió construir la presa usando un HFCC compactado con rodillo ya que las investigaciones con los

hormigones convencionales usados en RCC generalmente se mostraron inaceptables debido a su baja trabajabilidad. Los sistemas de construcción, tanto en el interior como en el exterior de la presa se diseñaron del mismo modo que los descritos en la de Milton Brook.

Las conclusiones que se extrajeron de tales ensayos, que corroboran las ya expresadas, fueron:

1. El hormigón utilizado satisfacía las resistencias específicas a compresión (20,7 MPa) y a tracción (1,2 MPa).
2. La retracción era similar a la de un hormigón convencional en masa.
3. El aumento de temperatura es más bajo que el de un hormigón convencional. Sin embargo, los 3,2° C registrados, son todavía demasiado altos para excluir la posibilidad de fisuración interna.
4. El sistema de construcción de los paramentos externos es aceptable.
5. Con validez general, tras estudiar otros datos: para hormigón vibrado por inmersión la mezcla más económica es aquella en que c_f varía entre 0,40 y 0,60 y entre 0,70 y 0,85 para un hormigón compactado con rodillo.

La presa de Upper Stillwater contendrá 1,07 millones de m³ de RCC. Su altura será de 84 m con una longitud en coronación de 814 m. El volumen de agua almacenado será de 37 millones de m³.

Conclusión final:

El HFCC compactado con rodillo es adecuado para la construcción de presas allí donde las condiciones son favorables para una presa de hormigón en masa.

IV.6.2 Construcción de firmes

Ya en Junio de 1978³⁰ se reconocieron las ventajas potenciales del uso de un HFCC en la construcción de carreteras. Se pretendía construir una carretera de acceso al almacén de maquinaria de un contratista en Hoddesdon y éste decidió aprovechar la oportunidad para ensayar un HFCC. El concepto era tratar de modificar el material que se estaba desarrollando

para el hormigón del interior de las presas (que todavía no era, como ya se ha indicado un HFCC) para que pudiera ser colocado con una extendidora de asfalto pero sin compactar con rodillo. La principal ventaja de este método sería la precisión con que podría ser colocado el hormigón; sin compactación con rodillos las tolerancias podían reducirse y disminuir en consecuencia, el espesor de la superficie portante (el material más caro) abaratando el coste total de la carretera.

Se utilizó una mezcla con $c' = 0,63$ que se dispuso en losas de 3 m de ancho y de 180 a 250 mm de espesor. Las irregularidades encontradas fueron de ± 5 mm en longitudes de 3 m, suficientemente buenas como para que se decidiera dejar la superficie resultante sin tratamiento. A los 3 años de utilización el comportamiento era totalmente satisfactorio. (Sin embargo, ésta fue una experiencia aislada, el HFCC no se desarrolló hasta los mencionados estudios del CIRIA).

Desde entonces, la aplicación de los HFCC en carreteras ha evolucionado, siendo el estado actual de esta técnica el que a continuación se desarrolla.

Utilización en bases y subbases:

La mayoría de las aplicaciones de los HFCC en bases y subbases de firmes flexibles y rígidos de carreteras, playas de almacenamiento etc. se han realizado mediante la técnica del RCC.

Haciendo referencia a los estudios realizados en Australia³⁶ sobre estas aplicaciones de los HFCC (es allí donde más desarrolladas están), las principales ventajas encontradas en la construcción de bases y subbases de firmes flexibles, sobre los hormigones convencionales, fueron:

1. Su mayor rigidez reduce las deflexiones del firme.
2. Las deformaciones por tracción en el pavimento bituminoso son menores.
3. El espesor total del firme disminuye.

En bases y subbases de firmes rígidos estas ventajas son:

1. Menor coste.
2. Menor retracción.

3. Mayor capacidad de deformación en tracción.
4. Mayor densidad.
5. Menor permeabilidad.

Este comportamiento concuerda con los resultados de los ensayos de Haque.

Las ventajas mencionadas se consideraron como resultado directo de la trabajabilidad alcanzada por la inclusión de alta cantidad de CV y del bajo contenido de agua conseguido.

Una propiedad importante es la baja retracción que fue posible lograr cuidando la dosificación, con las ventajas evidentes para el pavimento. Otra ventaja adicional que se encontró es que fue posible adaptar las plantas y el equipo que se poseía a la fabricación del HFCC.

También se han usado los HFCC en bases y subbases no compactadas con rodillo. Debido al particular diseño de este hormigón es posible alcanzar las ya referidas densidades in situ del 96-98 por 100 de la máxima teórica sin tal compactación.

Así se hizo en el aeropuerto de Heathrow²⁵ en donde se usó un hormigón de $c_t = 0,8$ y en donde se consiguieron las anteriores densidades, una excepcional regularidad en el acabado de la superficie, buenos comportamientos mecánicos y una reducción en el coste del hormigón de aproximadamente un 14 por 100.

Utilización en pavimentos:

Los mayores ahorros conseguidos con el uso de HFCC han sido precisamente en la construcción de pavimentos de carretera.

Estos hormigones, en los cuales c_t varía entre 0,50 y 0,65 han sido colocados mediante hormigonado convencional, mediante sistema RCC y mediante encofrados deslizantes.

Mediante hormigonado convencional el primer uso de importancia fue en las carreteras de acceso a la central eléctrica de Didcot en 1981³⁷. Se diseñaron dos secciones distintas con dos diferentes hormigones para los dos tipos de tráfico que iban a circular.

La resistencia a flexotracción mínima que se especificó para ambos hormigones fue de 4 MPa.

El hormigón se colocó en bandas de 5 a 6 m

de anchura con juntas transversales y se compactó mediante vibración por inmersión y una viga vibrante en superficie (ver fig. 9). Aunque se especificó un contenido de aire de $4,5 \pm 1,5$ por 100 fue difícil conseguirlo. El resto de las especificaciones fueron cumplidas satisfactoriamente, observándose los comportamientos ya comentados de desarrollo de la resistencia con la edad y de los mayores valores de ésta en testigos extraídos que en muestras conservadas en condiciones de laboratorio.

Se comprobó también que se requería un control muy estrecho para asegurar tal comportamiento.

Al mismo tiempo que se efectuaba esa obra, la misma planta en que se fabricaba para ella el HFCC estaba produciendo un hormigón convencional para otro pavimento, usando los mismos materiales (salvo las CV). Se pudo comprobar que el uso del HFCC permitía un ahorro del 20-25 por 100. El m^3 de hormigón convencional costaba 27,12 libras y 21,37 el de HFCC.

Una utilización similar se efectuó en Abert-haw en 1982. La evolución de las resistencias se puede observar, para Aberthaw y Didcot en la fig. 6.

Dentro de los del segundo tipo (RCC) cabe destacar el hormigonado de una explanada en la fábrica de Tudela—Asturias, S. A. en Septiembre de 1985³⁸.

La obra consistió en el hormigonado de tres zonas de la factoría:

1. Un acceso de camiones a un parque de áridos clasificados para la construcción donde se cargan unas 1.500 T. por jornada sobre camiones de 25 T. de capacidad.
2. Una explanada y el correspondiente acceso y estacionamiento bajo las tolvas, para el cargue de finos de cal y cal siderúrgica sobre camiones de la misma capacidad.
3. Un acceso al hall de materias primas por donde evolucionan palas cargadoras y camiones pesados con baja intensidad de tráfico.

Para las dos primeras zonas se decidió aplicar un hormigón seco compactado con rodillo de 400 Kgs de cemento por m^3 .

En la tercera zona, por vía experimental, se aplicó una grava-cemento.

En todos los casos se empleó cemento tipo C-V (UNE 80.301); constituido por clinker de cemento más regulador de fraguado y 70-80 por 100 de CV silicoaluminosas, obtenido por mollienda conjunta de ambos materiales en circuito cerrado, en la fábrica de cemento de Abroño.

En la aplicación del mencionado HFCC se trataba de conseguir un hormigón que proporcionase la máxima densidad después de compactado con rodillo vibrante, que tuviera una consistencia seca, de aspecto de tierra húmeda, con una relación agua/cemento de 0,34-0,36 que permita, una vez vibrado, que aparezca en la superficie pasta pero no lechada, y con unas resistencias adecuadas.

Tras una serie de ensayos se comprobó que era posible conseguir un hormigón de tales características con ese cemento y los áridos calizos que producía la misma factoría.

Las conclusiones de tipo constructivo más destacable que se extrajeron fueron:

1. Los áridos deben ser secos o de humedad uniforme y controlada. Es importante su correcta homogeneización para el adecuado control del contenido óptimo de agua en el hormigón. Se considera preferible un ligero error por defecto que por exceso en el agua de amasado.
2. Cuando se desea una superficie muy tersa ha mostrado buen resultado el compactador de neumáticos.
3. No se ha observado segregación en ninguna etapa del proceso: fabricación, transporte y colocación.
4. La lluvia afecta poco a la compactación. Se puede trabajar bajo una precipitación moderada, aunque ello afecta al acabado superficial.

Otro ejemplo español, éste más conservador quizás por ser para la Administración, ha sido la obra de refuerzo de la carretera Zaragoza-Alcañiz entre el km. 138,150 y el 139,480. Se trata de un tramo reforzado con un carril en cada dirección para uso de todo tipo de vehículos. Se efectuó una sola capa de hormigón seco compactado empleándose cemento tipo V con un 50 por 100, en peso, de CV. Ha sido el empleo más alto de CV en el hormigón en una obra para el Estado.

Respecto a las aplicaciones con encofrados deslizantes hay que destacar las estrictas condiciones de consistencia, resistencia inicial, exudación y segregación exigidas en los hormigones colocados con este sistema.

En los estudios del laboratorio BMI de Sydney³⁶ se ha comprobado que el HFCC puede ser utilizado efectivamente en este campo. En los ensayos allí realizados se consiguieron resistencias a la compresión a los 90 días de 42 a 54 MPa, y módulo de rotura de 4,5 a 6,0 MPa, entre otros valores característicos.

Hay que indicar, en relación con el anterior, que cuando se elige este sistema de construcción, la base y subbase (o la base sólo, si no existe subbase) se realizan casi indefectiblemente también con encofrados deslizantes.

Por último, señalar que en todos los usos de los HFCC en firmes, se observó que se exige un adecuado control del proceso constructivo para conseguir los comportamientos requeridos. En particular, el control de la dosificación es esencial.

Conclusión final:

Estos hormigones son muy atractivos para el uso en firmes debido a su alta resistencia a flexión, excelente desarrollo de la resistencia, baja retracción, y alta capacidad de deformación en tracción. Con un control suficientemente alto dichas características quedan garantizadas.

IV.6.3 Aplicaciones estructurales

Con objeto de investigar el posible uso de los HFCC en hormigón estructurales, se efectuaron en 1981 varios programas de ensayos en tres laboratorios ingleses¹⁹.

Se usó la misma CV con tres diferentes cementos y áridos de tres procedencias diferentes, con tamaño máximo de 20 mm. en todos los casos.

La trabajabilidad de todas las mezclas era adecuada para la vibración por inmersión. Con objeto de mantener en valores bajos el cociente c_w , y obtener así, como ya se ha visto, el máximo beneficio de las CV, en todas las mezclas se utilizaron fluidificantes.

Los ensayos se hicieron para valores de c ,

variando de 0 a 0,8 y c_w de 0,6 a 1,5. El trabajo se concentró en los hormigones con $c_f = 0,6$ porque de datos previos parecía deducirse que era el valor óptimo para hormigón vibrado por inmersión.

La correlación entre los resultados de las distintas series fue buena considerando los diferentes áridos y cementos usados. La figura 9 muestra los valores obtenidos para la resistencia a compresión en probetas cúbicas en función de c_w para las mezclas con $c_f = 0,6$.

Con estos datos de partida se propuso en la licitación para la construcción de un tanque de petróleo en la central de Didcot, la utilización de HFCC. El sistema fue aceptado y la construcción se llevó a cabo en el verano de 1982.

El tanque consistía en una base circular de hormigón fuertemente armado y un muro perimetral de 4-5 m de altura.

En ambos casos se utilizó un HFCC de 245 kg/m³ de cemento Portland, de 250 kg/cm³ CV ($c_f = 0,51$) y árido calizo de 20 mm de tamaño máximo. En la base la resistencia a compresión en probetas cúbicas mínimas especificada era de 30 MPa; el valor medio de dicha resistencia a los 28 días fue de 41 MPa y el mínimo de 36 MPa. También en el muro se cum-

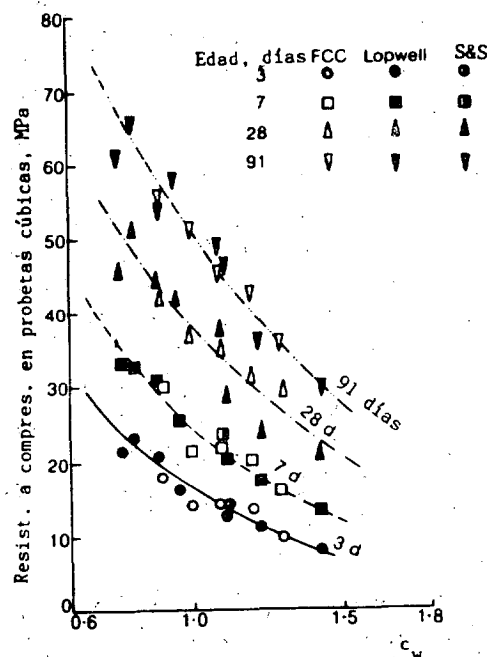


Figura 9. — Relación entre la resistencia a compresión en probetas cúbicas de un hormigón vibrado por inmersión, y c_w $c_f = 0,6$.

plieron las especificaciones holgadamente. El hormigón de la base fue colocado mediante bombeo y el del muro mediante cinta, apreciándose la facilidad de colocar y vibrar en los dos casos.

Respecto al muro hay que destacar que se trataba de la primera utilización del HFCC en un elemento estructural delgado y que a pesar de tal circunstancia se consiguió una muy alta calidad de las superficies, tanto internas (que no iban a verse) como externas.

Se comprobó también que las juntas de contracción podían ser espaciadas a mayores intervalos que los usados con hormigones convencionales con la consiguiente reducción de coste. Ahora bien, para evitar fisuraciones a edad temprana se debía cuidar el curado.

Tras estas experiencias, el mismo contratista ha realizado otras aplicaciones estructurales³⁷ comprobando en todas ellas, de nuevo, que manteniendo la observancia de las normas de buena práctica habituales en la tecnología del hormigón, se podían conseguir los comportamientos requeridos.

En España no se ha llevado a cabo ninguna aplicación del HFCC en este campo.

Una importante cuestión relacionada con el uso de HFCC en la construcción de elementos estructurales es el grado en que este hormigón, con tan bajo contenido de álcalis protegerá las armaduras de acero. Diferentes investigaciones⁴⁰ han demostrado que la sustitución de cemento por CV en cantidades mucho menores que las utilizadas en los FFCC puede aumentar sustancialmente el grado de carbonatación y reducir, por consiguiente, la protección de las armaduras.

La cuestión no está aún definitivamente zanjada, pero parece ser que tal inconveniente no existe. A esta opinión contribuyen los trabajos de Owens⁴¹ las recientes investigaciones de Preece⁽⁴²⁾ y los resultados comprobados en las obras ya ejecutadas.

Owens ha comprobado que incluso con valores de c_i del 80 por 100 queda el hormigón suficientemente alcalino para proteger al acero. Por su parte, Preece llega a afirmar que la adición de CV ayuda siempre a tal protección.

Conclusión final:

El HFCC parece, también, adecuado para ciertos usos estructurales, pero hacen falta más aplicaciones para conocer adecuadamente su comportamiento en este campo.

V. CONCLUSIONES GENERALES

La técnica de los hormigones con alto contenido en cenizas volantes se ha desarrollado tan sólo a lo largo de los últimos ocho años. En este tiempo han sido empleados satisfactoriamente en la construcción de presas, en bases y subbases de firmes, en pavimentos de carretera y explanadas, y en diversas estructuras fuertemente armadas.

Aparte de las conclusiones parciales que se han ido dando en cada uno de los apartados desarrollados, las conclusiones de carácter general que se pueden extraer del análisis de los ensayos de laboratorio y obras efectuadas hasta la fecha son:

1. Usando las cenizas volantes simplemente como un sustituto del cemento Portland no se alcanzan, en general, los beneficios potenciales de las mismas; se requiere un nuevo método de dosificación.
2. El HFCC debe ser considerado como un material nuevo, cuya dosificación no se puede realizar como una extensión de los métodos convencionales.
3. La adición de cenizas volantes al hormigón flexibiliza el proceso de dosificación, permitiendo que para la mayoría de las especificaciones aparezca un margen de posibles mezclas potencialmente utilizables.
4. Existe una relación entre la contribución de las CV a la resistencia a compresión y la relación agua/conglomerante similar a la introducida por Abrams en 1912 para la relación agua/cemento. La contribución de las CV es más sensible a la relación agua/conglomerante que la contribución del cemento, y por encima de un cierto valor de dicha relación, la contribución inicial es nula.
5. Un HFCC adecuadamente diseñado debe tener, y es posible conseguirlo, una densidad muy cercana a la máxima teórica, ba-

ja porosidad y una durabilidad al menos igual a la de un hormigón ordinario de la misma resistencia a compresión. Si se necesita, se pueden adicionar aireantes para aumentar la resistencia a las heladas.

6. El HFCC puede ser diseñado para tener altas resistencia iniciales, por lo tanto, se puede conseguir que no haya problemas importantes de agrietamiento durante las primeras etapas de endurecimiento.
7. Es posible conseguir ahorros económicos significativos usando HFCC en muchas de las aplicaciones usuales del hormigón. Se han alcanzado reducciones de hasta el 25 por 100 en el coste total de los materiales respecto a los costes con hormigones convencionales.
8. Numerosos ensayos confirman que las propiedades in situ de los HFCC son mejores que las indicadas en los ensayos de laboratorio, y que el desarrollo de la resistencia continúa al menos hasta los 500 días.
9. Es importante mantener un alto grado de control en las operaciones de fabricación, colocación y posterior curado, para evitar problemas tanto en construcción como en servicio.

El HFCC se ha usado ya en muy diversos lugares, bajo muy diferentes condiciones, con materiales de diferentes calidades y por contrastistas en ocasiones sin ninguna experiencia en su uso. En la gran mayoría de los casos se han podido alcanzar satisfactoriamente los fines que se le encomendaron.

Aunque su comportamiento a largo plazo no es todavía conocido perfectamente, y se precisan más investigaciones que aclaren ciertos puntos todavía oscuros, a la vista de las ventajas técnicas y económicas y de los resultados apuntados, cabe concluir que se trata de un nuevo material de posibilidades muy interesantes al que se le pronostica un halagüeño futuro.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la ayuda prestada por las siguientes personas, sin la cual este trabajo no habría sido posible:

— Personal del Centro Bibliográfico y de la Bi-

- biblioteca del Laboratorio Central del CEDEX.
- Don Demetrio Gaspar y don Carlos Jofré del IETCC.
- Don Javier Martínez Eulate de ANEFHOP.
- Don José Manuel Fernández París de INTEMAC.
- Don José Manuel Lozano y don José Calleja de IECA.
- Don José Luis Alonso Ramírez del CEDEX.

BIBLIOGRAFIA

1. GORDON, G. J.: *The scandal of the non-utilisation of fly ash concrete*. ASH TECH '84 Second International Conference on Ash Technology and Marketing. September 16th-21st 1984 London. Conference Proceeding. p. 13-20.
2. BERRY, E. E. and MALHOTRA, V. M.: *Fly ash for use in concrete—a critical review*. Journal of the American Concrete Institute (ACI), March/April 1980.
3. BRITISH STANDARDS INSTITUTION.: *Draft Code of Practice for «The structural use of concrete»*. (Revision of CP110: Part 1: 1972).
4. CALLEJA, J.: *Cenizas, cementos y hormigones con cenizas (partes 1.ª y 2.ª)*. Cemento Hormigón. Agosto y Septiembre 1983. p. 708-730 y 827-848.
5. COOK, J. E.: *Fly ash in concrete—Technical considerations*. Concrete International. Sept. 1983. p. 51-59.
6. SWAMY, R. N.: *Fly ash utilisation in concrete construction*. ASH TECH '84. Sept. 16th-21st London. Conference Proceeding. p. 359-367.
7. PLOWMAN, C.: *The chemistry of pfa in concrete—A review of current knowledge*. ASH TECH '84. Sept. 16th-21st London. Conference Proceeding. p. 437-443.
8. POPOVICS, S.: *Strength Relationships for fly ash concrete*. ACI Journal. Ja. Feb. 1982. p. 43-49.
9. BAMFORTH, P. B.: *Heat of hydration of pfa concrete and its effect on strength development*. ASH TECH '84. Sept. 16th-21st. London. Conference Proceeding. p. 287-294.
10. CRIPWELL, J. B., BROOKS, J. J. and WAINWRIGHT, P. J.: *Time-dependent properties of concrete containing pulverised fuel ash and a superplasticizer*. ASH TECH '84. London. Conference Proceeding. p. 313-320.
11. CABRERA, J. G.; WOOLLEY, G. R.; HOPKINS, C. J.; LEE, R. E.; PLOWMAN, C. and FOX, H.: *The relevance of pulverized fuel ash properties on the strength of concrete*. ASH TECH '84. London. Conf. Proc. p. 3030-311.
12. PISTILLI, M. F.: *Air-void parameters developed by air-entraining admixtures, as influenced by soluble alkalis from fly ash and portland cement*. ACI JOURNAL. May-June 1983. p. 217-222.
13. BROWN, G. E. and OATES, D. B.: *Air entrainment in sulfate-resistant concrete*. CONCRETE INTERNATIONAL. January 1983. p. 36-39.

14. CALLEJA, J.: *Las Normas UNE 80.301-85 y 80.302-85 para cementos*. CEMENTO HORMIGON. Nov. 1985. p 951-968.
15. PROYECTO UNE 83.415.: *Adiciones al hormigón. Cenizas Volantes: «Definición, especificaciones, transporte y almacenamiento de las cenizas volantes utilizadas como adición a los hormigones y morteros de cemento Portland»*.
16. CANNON, R. W.: *Proportioning flyash concrete mixes for strength and economy*. J. AM. CONCR. INST., 1968, 65, Nov., p 969-979.
17. OWENS, P. L.: *A method for the selection of concrete mix proportions incorporating flyash pozzolans*. Advances in Ready Mixed Concrete. Technology, Dundee University. Sept.-Oct. 1975, Pergamon Press, Oxford, 1986.
18. HAQUE, M. N.; LANGAN, B. W. and WARD, M. A.: *High Fly Ash Concretes*. ACI JOURNAL. Jan.-Feb. 1984. p 54-60.
19. DUNSTAN, M. R. H.: *Development of high flyash content concrete*. PROC. INSTN. CIV. ENGRS, Part 1. Aug. 1983. p 495-513.
20. DUNSTAN, M. R. H.: *Design of mix proportions for the efficient use of flyash in concrete*. ASH TECH '84. London. Conference Proceeding. p 455-454.
21. DUNSTAN, M. R. H.: *Rolled concrete-with particular reference to its use as a hearting material in concrete dams*. CONCRETE SOCIETY, London. March 1978.
22. DUNSTAN, M. R. H.: *Rolled Concrete for Dams-A Laboratory Study of High Fly Ash Concrete*. Technical Note No. 105; CONSTRUCTION INDUSTRY RESEARCH AND INFORMATION ASSOCIATION (CIRIA). London, 1981. 96 p.
23. DUNSTAN, M. R. H.: *Rolled Concrete for Dams-Construction Trials Using High Fly Ash Content Concrete*. Technical Note no. 106. CIRIA. London, 1981. 94 p.
24. DUNSTAN, M. R. H.: *Relationship between properties generated by cement and by flyash*. International Conference Rolled concrete for dams. CIRIA. London. June 1981. Paper 3, 3-1 - 3-21.
25. DUNSTAN, M. R. H.: *Development of high flyash content concrete*. PROC. INSTN. CIV. ENGRS., Part 1. 1985, 78, Apr., p 413-434.
26. CABRERA, J. C. and PLOWMAN, C.: *Hydration and microstructure of high pfa content concrete*. International Conference Rolled concrete for dams. CIRIA. London. June 1981, Paper 4, 4-1 - 4-29.
27. DIAMOND, S.: *Identification of hydrated cement constituents using a scanning electron microscope-energy dispersive s-ray spectrometer combination*. CEMENT AND CONCRETE RESEARCH. 1972. Vol. 2, p 617-632.
28. HO, D. W. S. and LEWIS, R. K.: *Carbonation of concrete incorporating flyash or a chemical admixture*. CANMET Conference «Flyash, silica fume, slag and other mineral by-products». SP79-17, ACI JOURNAL, Jul. Aug. 1983.
29. HAQUE, M. N.; LANGAN, B. W. and WARD, M. A.: *Properties of High fly ash concrete*. Proceedings, 11th Australian Road Research Board Conference, Melbourne, 1982. V. 1, p 277-288.
30. DUNSTAN, M. R. H.: *The use of high fly ash content concrete in roads*. International Symposium. Department of Civil Engineering, Leeds University. Concrete Society Central Electricity Generation Board. 14-16 April 1982.
31. ALKALI-AGGREGATE WORKING PARTY.: *Guidance note: minimising the risk of alkali-silica reaction*. Cement and Concrete Association Slough, 1983.
32. BUTLER, J. E.: *The penetration of concrete containing high proportions of fly ash*. ASH TECH '84. London. Conference Proceeding. p 475-482.
33. BAMFORTH, P. B.: *In-situ measurement of the effect of partial Portland cement replacement using either flyash or ground granulated blast-furnace slag, on the performance of mass concrete*. PROC. INSTN. CIV. ENGRS. Part 2, 1980, 69, Sept., p 777-800.
34. CANNON, R. W.: *Compaction of Mass Concrete with Vibratory Rollers*. ACI JOURNAL Proceedings V. 71 No. 10, Oct. 1974, p 506-513.
35. OLIVERSON, J. E. and RICHARDSON, A. T.: *Upper Stillwater Dam; Design and construction concepts*. CONCRETE INTERNATIONAL. May 1984. p 20-28.
36. MUNN, R. L.: *Flyash in rolled concrete pavement and slipformed*. ASH TECH '84. London. Conference Proceeding. p 455-460.
37. PROCTOR, R. T. and LACEY, R. A. C.: *The development of high flyash content concrete at Didcot power station*. ASH TECH '84. London. Conference Proceeding. p 461-466.
38. FERNANDEZ, E. y GOMEZ, J.: *Hormigón seco compactado con rodillo*. Cemento tipo V (UNE 80301). Informe sobre hormigonado en la fábrica Tudela-Asturias, S. A. Labor. ESTABISOL. Sept. 1985.
39. FERNANDEZ, E. y SARDI, J. M.: *Experiencias en la fabricación y empleo de los cementos tipo V UNE 80.301*. Cursillo sobre los nuevos cementos en las normas UNE. IECA. 26-28 Feb. 1986.
40. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE.: *Proc. Canmet/ACI conf. on the use of flyash, silica fume, slag and other mineral by-products*, Montebello. Quebec. 31 July-5 Aug 1983. American Concrete Institute, Publication SP79-17 Detroit 1983.
41. OWENS, P. L. and BUTTLER, F. G.: *The reactions of flyash and Portland cement with relation to the strength of concrete as a function of time and temperature*. Proc. 7 th International Congress «The Chemistry of Cement». Paris, 1981.
42. PREECE, C. M.: *et al. The influence of cement type on the electrochemical behaviour of steel in concrete*. In The corrosion of reinforcement in concrete construction (ed. CRANE A.), London, 1983, Chapter 23.