

# DESARROLLO DE CONCRETOS DE ULTRAALTO COMPORTAMIENTO

ALEJANDRO DURÁN HERRERA\*, TUSHAR K. DAS ROY \*, RAYMUNDO RIVERA VILLARREAL \*\*

Lo que se conoce actualmente como concretos de ultraalto comportamiento reforzados con fibras (Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete, UHPFRC) es resultado de investigaciones encaminadas a incrementar la resistencia mecánica del concreto, en particular la resistencia a la compresión. Los primeros trabajos encaminados en este sentido se dieron hace aproximadamente 70 años, cuando, con el fin de expulsar la mayor cantidad de aire atrapado y de agua para eliminar parcialmente la contracción química temprana, Eugene Freyssinet demostró que, prensando el concreto durante el fraguado, se podía incrementar su resistencia a la compresión.<sup>1</sup> Posteriormente, en la década de los sesenta, mediante investigaciones encaminadas en el mismo sentido, D. M. Roy y G. R. Gouda obtuvieron resistencias a compresión hasta de 650 MPa en especímenes pequeños de mortero y de concreto fabricados con prensado y calentamiento simultáneos en una atmósfera saturada de agua.<sup>2</sup> Para 1997, las resistencias a la compresión del concreto en aplicaciones prácticas se habían incrementado considerablemente, para entonces ya se habían usado concretos de alto comportamiento con resistencias entre 50 y 120 Mpa.<sup>3</sup>

El concreto de alto comportamiento (High Performance Concrete, HPC) es el antecesor de los concretos de ultraalto comportamiento, y se define como el que conjunta combinaciones especiales de comportamiento y requerimientos de uniformidad que, usando ingredientes convencionales y prácticas normales para el mezclado -colocación y curado-, no siempre pueden ser alcanzadas de manera rutinaria, por lo que en un concreto de alto comportamiento se desarrollan ciertas características para aplicaciones y entornos de servicio particulares.

Para los franceses, un concreto de ultraalto comportamiento combina altas resistencias a compresión ( $f_c \geq 150$  MPa), una trabajabilidad adecuada para la colocación, menor requerimiento de mano de obra para la colocación, ahorros económicos a largo plazo y un acabado estético y en sintonía con el ambiente.<sup>4</sup>

A la fecha, el desarrollo de los denominados concretos de ultraalto comportamiento reforzados con fibras se ha dado en tres vertientes que se enlistan a continuación en orden cronológico:

- Sistemas densificados conteniendo partículas ultrafinas homogéneamente distribuidas (Densified with Small Particles, DSP).<sup>5</sup>
- Concretos de polvos reactivos (Reactive Powder Concretes, RPC).<sup>6,7</sup>
- Concretos reforzados con fibras multiescala (Multiscale Fibre reinforced Concrete, MSFRC).<sup>8,9</sup>

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una matriz densa de diseño optimizado con la que se mejore la cohesión interna de sus componentes para mínima relación agua/cementante (A/CM) –máxima fluidez, involucrando para ello cementantes complementarios diferentes a la microsilice, la cual comúnmente se emplea para la producción de estos compuestos.

## Materiales

- Cemento Pórtland ordinario (CPO 40) de CEMEX.
- Tres cementantes complementarios (CC): HSF, M<sup>3</sup>, CVFM y MK-PP.

\* Programa Doctoral de Ingeniería de Materiales, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, UANL.

\*\*Departamento de Tecnología del Concreto, Facultad de Ingeniería Civil, UANL.

- Dos arenas de sílice (F 20/40 y F 40) y una arena de andesita con granulometría en porcentajes que pasan las mallas #4 = 100%, #8 = 74%, #16 = 48%, #30 = 30.5% y #50 = 15%.
- Un aditivo superfluidificante (ASF) a base de formaldehído condensado de naftaleno sulfonatado (FCNS) y un éter de policarboxilato (EPC), ambos aditivos en polvo.
- Microfibras de acero (FA) con longitud de 11-15 mm,  $\phi$  de 180-220  $\mu$ m, resistencia mínima a la tensión de 2,600 Mpa, y un contenido de carbono de 0.69-0.76%.

### Constantes del proyecto

Apoyados en la bibliografía técnica consultada<sup>6,7,9-13</sup> se fijaron las siguientes constantes:

- Dosificación máxima del ASF = 2.5% en peso del cementante total (CT).
- A/CM = 0.16 – 0.22.
- Fluidez objetivo ASTM C 109M-99 = 110  $\pm$  5%.
- % máximo de FA en volumen = 4%
- Dosificación máxima de cementantes  $\approx$  950 kg/m<sup>3</sup>.
- CC en el CT = 25% en volumen absoluto.

### Métodos y ensayos

Se determinó la distribución del tamaño de las partículas para todos los materiales cementantes, empleando equipo Malvern, modelo Mastersize 2000, y metanol como dispersante.

Las áreas superficiales específicas (SE) de los cementantes se obtuvieron con equipo de adsorción de nitrógeno, marca Quantachrome, modelo Autosorb; la prueba se llevó a cabo haciendo vacío por 20 horas en promedio a 100°C, y aplicando el método del análisis BET.

Con la técnica de difracción de rayos X (DRX) y un equipo Siemens modelo 5000, se identificaron las fases minerales al CPO 40: alita (C<sub>3</sub>S), belita (C<sub>2</sub>S), celita (C<sub>3</sub>A), ferrita (C<sub>4</sub>AF) y sulfato de calcio en las formas de hemihidrato (CaSO<sub>4</sub> · ½H<sub>2</sub>O) y anhidrita (CaSO<sub>4</sub>).

Se determinó la estructura química del C<sub>3</sub>A, en el CPO 40 por DRX, a una muestra de la fase líquida (C<sub>3</sub>A+C<sub>4</sub>AF) extraída con una solución de ácido salicílico/metanol (SAM). Con la técnica de absorción atómica se determinó la concentración de Na<sub>2</sub>O en la fase obtenida por SAM, y en la fase ferrita extraída por NAM (solución de ácido nítrico/metanol al 7%).

Debido a las bajas relaciones A/CM con las que deben producirse estos concretos, es imprescindible el uso de un aditivo ASF. En base a los resultados de la resistencia a la compresión y a las pruebas de tiempos de fraguado ASTM C 403 M-99, para una relación A/CM de 0.25 y una fluidez DIN de 55.0 cm, para la misma fluidez y prácticamente la misma resistencia, se decidió emplear el aditivo EPC por demandar sólo 0.5% en masa con relación al peso del cemento, a diferencia del 3.0% que se requirió del FCNS.

Para determinar la contribución en la resistencia a la compresión por la reacción puzolánica entre los hidróxidos de calcio resultantes de la reacción de hidratación y cada uno de los CC (actividad puzolánica), aplicamos un método que denominamos de volúmenes constantes, fijando para ello los siguientes parámetros: fluidez ASTM C 109M-99 = 110  $\pm$  5%, A/CM = 0.485, CC en sustitución del CT = 20%, volumen absoluto de pasta en el mortero = 440 mL (44% = constante), y para dar la fluidez se empleó el aditivo EPC. Con este fin, y siguiendo el procedimiento descrito en ASTM C 305-99, se fabricaron cubos de 5 cm, se curaron y ensayaron a compresión a las edades de uno, tres, siete, 28 y 56 días de acuerdo a ASTM C 109M-99.

La combinación de arenas a emplear se definió de la siguiente manera: 1) La combinación de arenas de sílice "AS" (F 20/40 con F 40) se realizó empleando el criterio de máximo peso volumétrico compactado, 2) con la granulometría que recomienda Fuller y con las variaciones de la especificación ASTM C 33-02, se estableció la combinación de la mezcla óptima de arenas de sílice "AS" con la arena de andesita. Para ello se empleó el método de ajuste por granulometría (análisis gráfico granulométrico) descrito a detalle en A. Durán.<sup>14</sup>

Para definir la relación A/CM mínima para cada uno de los tres sistemas cementantes en estudio (CPO 40 + CC), se realizaron tanteos de la fluidez siguiendo los procedimientos para el mezclado y la determinación de la fluidez descritos a detalle en A. Durán,<sup>14</sup> las cuales fueron de 0.23 para el sistema CPO 40 + HSF, 0.20 para el sistema CPO 40 + M<sup>3</sup>, y 0.21 para el sistema CPO 40 + CVFM. De manera simultánea, con base en el criterio de punto de saturación, que define la cantidad de aditivo máxima a partir de la cual un incremento en la dosificación de aditivo no arroja un incremento en la fluidez, se determinó que para la fluidez estos tres

sistemas demandaban dosificaciones de aditivo de 2.75, 2.6 y 2.6%, respectivamente, con lo que se obtuvieron promedio correspondientes de 145, 154 y 157%.

Habiendo definido las proporciones definitivas de los morteros, se procedió a fabricar especímenes cilíndricos de 7.5 cm de diámetro, para determinar el tiempo de curado acelerado óptimo con humedad a 90°C. Para definir la meseta de curado óptima, se estudiaron seis regímenes de curado diferentes: uno estándar y cinco con rampas de calentamiento y enfriamiento de 22°C por hora y mesetas a 90°C por 6, 12, 18, 42 y 66. Como resultado de los ensayos a compresión de los cilindros a los siete días de edad, se definió que la resistencia potencial para los tres sistemas cementantes no se presenta incremento significativo en la resistencia para un régimen de curado superior a seis horas.

Con base en las pruebas de resistencia a la compresión en cilindros de 7.5 cm de diámetro fabricados con el mortero definitivo para el sistema CPO 40 + CVFM con 2, 3 y 4% en volumen de fibras de acero substituido por volumen de arena y curados de manera acelerada con meseta de seis horas, se obtuvieron resistencias de 93, 95 y 94 Mpa, respectivamente.

A los morteros en estado endurecido se les aplicaron análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM).

## Resultados y discusión

Los resultados de los análisis químicos vía FRX, los compuestos potenciales y las propiedades físicas de los cementantes y arenas aparecen en la tabla 1.

Las distribuciones del tamaño de partículas para el cemento y los cementantes complementarios, que se determinaron vía láser, aparecen en la figura 1. El CC con el menor tamaño promedio de partícula fue el M<sup>3</sup> con 2.95  $\mu\text{m}$ , y el de mayor tamaño promedio fue el HSF con 59.43  $\mu\text{m}$ , mucho mayor al promedio típico de 0.1  $\mu\text{m}$  que para este material reporta el fabricante, esto se debió a que el producto se adquirió densificado para su manejo.

Los CC M<sup>3</sup> y CVFM son subproductos industriales obtenidos con materia prima de distinto origen. Son dos las características que pueden arrojar una diferencia marcada entre ellos en relación a la actividad puzolánica, éstas son: el contenido de CaO (14.65% para el M<sup>3</sup> y 2.47% para el CVFM) y el tamaño promedio de partícula (2.95  $\mu\text{m}$  para el M<sup>3</sup>

y 11.04  $\mu\text{m}$  para el CVFM), ya que conforme el contenido de CaO es mayor y el tamaño de partícula disminuye, la reacción puzolánica tiende a aumentar.<sup>13</sup> El CC HSF muestra que es más grueso que el M<sup>3</sup>, sin embargo, las correspondientes SE determinadas por la técnica BET reportadas en la tabla 1 muestran que el HSF es mucho más fino que el M<sup>3</sup>. En este sentido, consideramos que los resultados de los análisis BET reflejan con más certidumbre la fineza real de estos materiales, porque los DTPs de estos CC incluyen los tamaños de grumos y no de partículas.

De los análisis de DRX se definió que el HSF presenta dos fases cristalinas: el cuarzo y la cristobalita; el cuarzo no es reactivo, y la cristobalita, ya sea que se encuentre con una estructura desordenada o en un estado metaestable y en función de la cantidad de iones en disolución en su red atómica, puede presentar algo de actividad puzolánica.<sup>15</sup> El M<sup>3</sup> y el CVFM presentan las fases cristalinas de cuarzo, mulita, hematita y magnetita, las cuales no poseen actividad puzolánica alguna.<sup>13</sup>

El espectro obtenido que aparece en la figura 2 nos indica que la estructura del CPO 40 es cúbica; y por la técnica de absorción atómica se confirmó que la estructura química del C<sub>3</sub>A era cúbica, ya que la diferencia entre estas concentraciones fue de 0.9%.<sup>16</sup>

Es una ventaja, desde el punto de vista reológico, que el C<sub>3</sub>A tenga una estructura cúbica, porque al reaccionar forma un escudo casi impermeable alrededor del C<sub>3</sub>A que evitará que se continúe hidratando. Entre más cúbica sea la estructura del C<sub>3</sub>A, más fácil será controlar la reología de un concreto; sin embargo, este parámetro no es el único que influye en esta propiedad, entre mayor sea la concentración del C<sub>3</sub>A en el cemento más desfavorables serán las repercusiones en la reología. En cuanto al concreto convencional, no existe razón alguna para darle importancia a la morfología que presente el C<sub>3</sub>A en la fase intersticial del cemento; sin embargo, desde un enfoque reológico del concreto en estado fresco, esto sí es muy importante en concretos de alto comportamiento.<sup>17,18</sup> El cemento estudiado tiene un alto contenido de C<sub>3</sub>A, probablemente éste fue el motivo de que no pudiésemos utilizar relaciones A/CM más bajas.

El clínter de cemento Pórtland con puzolana, ya sea natural o artificial, generalmente contiene mayores cantidades de SiO<sub>2</sub> que el cemento Pórtland puro, lo cual da como resultado una red de hidra-

tos con más C-S-H y menos CH. Las puzolanas tienen menor densidad que el cemento Pórtland puro, al mezclarlos el compuesto resultante tendrá menor densidad y, al hidratarse, la red de hidratos del primero tendrá una porosidad capilar más baja para la misma relación A/CM inicial.<sup>19</sup> Por lo anterior, consideramos que el método de volúmenes constantes es el más confiable para comparar el incremento en resistencia que pudiesen ofrecer los diferentes CC, porque, para la misma relación, A/CM y la misma fluidez la resistencia adicional que presenten los CC con respecto al CPO 40, se deberá a la formación adicional de C-S-H por efecto de la reacción puzolánica. En este sentido, desde edades tempranas, el que arrojó mayor resistencia fue el M<sup>3</sup>, 65.1 Mpa, a los 56 días de edad. Los resultados de estos ensayos aparecen en la figura 3.

Por el criterio de máximo peso volumétrico compactado, con base en la figura 4, se estableció que la combinación óptima de las arenas "AS", para máximo empaquetamiento, es de 50% de arena F 20/20 y 50% de arena F40; mediante el análisis gráfico granulométrico se definió que los porcentajes a combinar eran 23% de la combinación de arenas "AS" con 77% de la arena de andesita (figura 5).

Para el régimen de curado acelerado a 90°C, con meseta de seis horas, las resistencias promedio a la compresión de los morteros para los tres sistemas fueron de 78, 75 y 63 MPa, para los sistemas CPO 40 + HSF, CPO 40 + M<sup>3</sup> y CPO 40 + CVFM, respectivamente.

Con base en los resultados de fluidez y resistencia de los morteros fabricados con 2, 3 y 4% de fibra en volumen absoluto, y al impacto negativo que tiene las fibras en la consistencia del compuesto en estado fresco conforme este porcentaje se incrementa, se eligió trabajar con 2% de FA en todos los sistemas cementantes estudiados. Las proporciones empleadas en la fabricación de los morteros para cada uno de los tres sistemas cementantes aparecen en la tabla II.

Por efecto de la incorporación de 4% de fibra, la fluidez en el mortero con CVFM se vio considerablemente disminuida de 155% a 20%. Al utilizar vibrado en la colocación, esta importante disminución no afectó de manera significativa el acomodo y la compactación del concreto.

En todas las imágenes obtenidas por SEM se aprecia una matriz densa con poca porosidad y, por lo liso de la superficie de las partículas de arena sílica, también se observó una pobre adheren-

cia interfacial entre las partículas de arena y la matriz cementante. En todos los casos se aprecia una matriz densa con poca porosidad incluso en la interfase matriz-agregado, como se puede observar en la figura 6.

## Conclusiones

Para los materiales investigados y para las constantes establecidas, con base en los resultados de las pruebas que realizamos en el presente trabajo, se desprenden las siguientes conclusiones:

Al incrementarse la superficie específica se presentó un aumento en las relaciones A/CM para lograr la fluidez objetivo.

Al mantener una relación A/CM fija, el método propuesto de volúmenes de pasta constantes resultó apropiado para determinar el potencial puzolánico de un cementante complementario.

La alta superficie específica del HSF originó una alta demanda de aditivo, así como una alta relación A/CM para el sistema cementante CPO 40 + HSF.

Tanto en pastas como en morteros, los procedimientos con el cono de ASTM C 230/C 230M-98<sup>E2</sup> fueron apropiados para verificar y controlar la fluidez durante el desarrollo y la producción de estos compuestos.

Para acelerar los procesos puzolánico y de hidratación, lo cual es muy útil en aplicaciones industriales, fue suficiente un curado acelerado con humedad a 90°C y con una meseta de seis horas.

Por los resultados de resistencia a la compresión obtenidos para la fluidez objetivo, el volumen de fibra óptimo fue de 2%.

Por las resistencias a la compresión obtenidas, los CC M<sup>3</sup> y CVFM representan una alternativa viable para la producción de estos compuestos.

El alto contenido de C<sub>3</sub>A en el cemento parece ser el responsable del indeseable comportamiento reológico y mecánico de los compuestos, para confirmar esto sería conveniente reproducir la parte correspondiente de la experimentación con un cemento que tenga la misma estructura química y menor contenido de C<sub>3</sub>A.

Para la producción de estos compuestos resulta conveniente, desde un punto de vista reológico y de resistencia a compresión, que el cemento conjunte la mayoría de las siguientes características: una concentración baja de C<sub>3</sub>A, un C<sub>3</sub>A con estructura cristalina cúbica, o al menos con una mezcla de

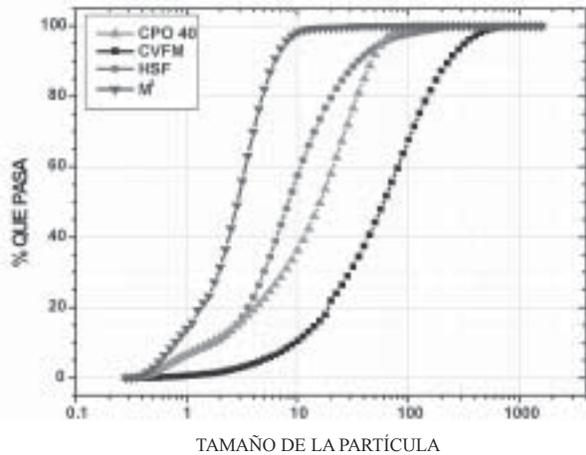


Fig. 1. Distributions de tamaños de partículas para el CPO 40 y los cementantes complementarios.

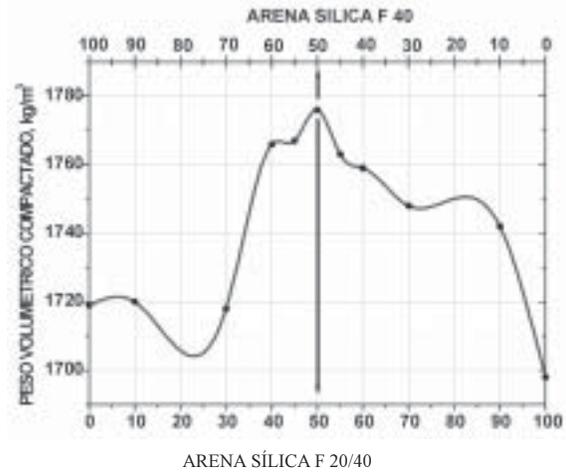


Fig. 4. Combinación de arenas sílicas F20/40 y F 40 vs. peso volumétrico compactado (PVC).

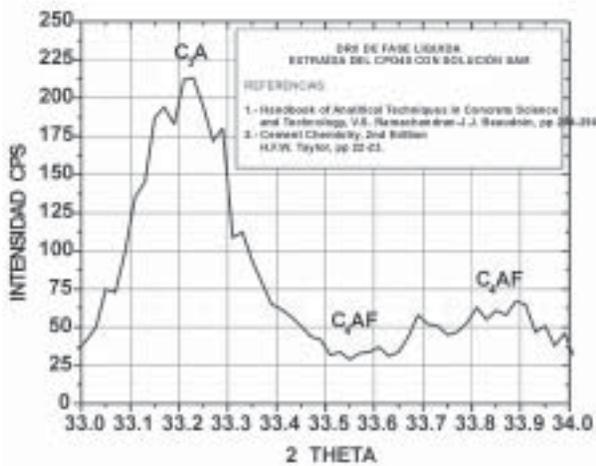


Fig. 2. Espectro de DRX para la fase líquida del CPO 40.

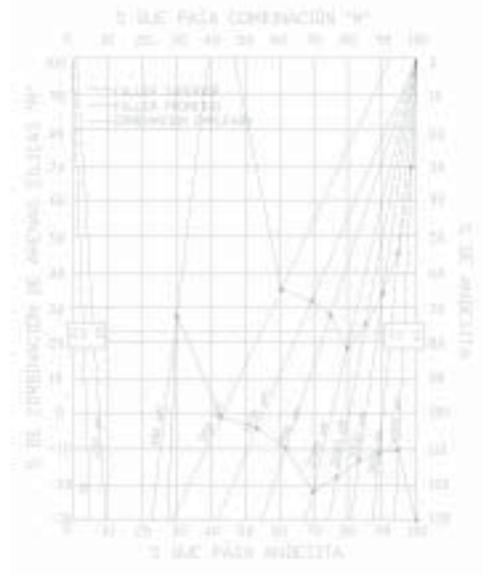


Fig. 5. Combinación de las arenas de andesita y combinación de arenas sílicas "AS", optimizadas por medio del análisis gráfico-granulométrico.

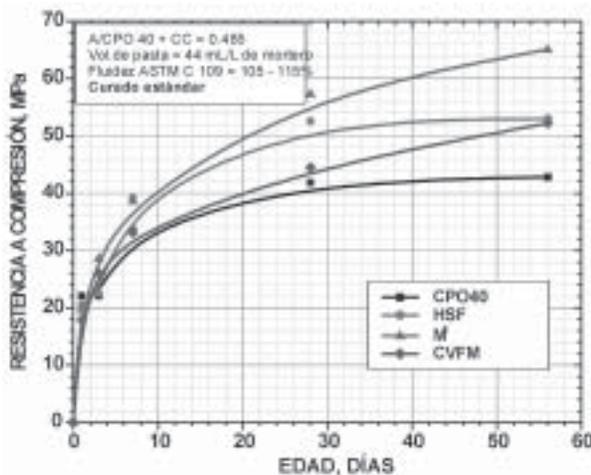


Fig. 3. Actividad puzolánica y desarrollo de resistencia en cubos de 5 cm para los CC por el método de volúmenes constantes.

cúbica y ortorrómbica en la que predomine la forma cúbica, que el sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) en el cemento preferentemente se encuentre hemihidratado o deshidratado, y que el cemento tenga una finza Blaine baja.

### Resumen

Las bajas relaciones agua/cementante con las que se fabrican estos concretos hacen imprescindible el

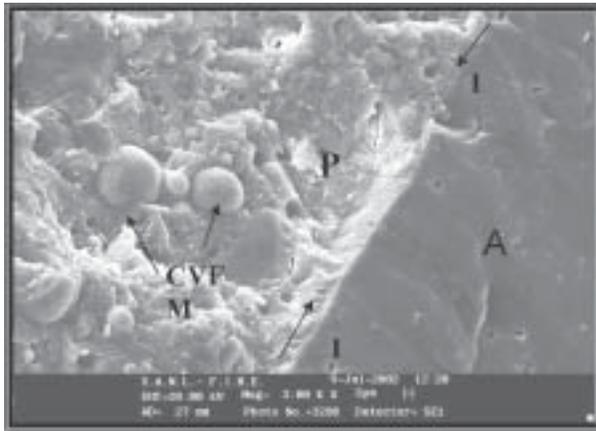


Fig. 6. Interfase (I) entre Pasta (P) y una partícula de andesita (A) en mortero definitivo con CVFM.

uso de un aditivo superfluidificante/superreductor de agua, de un cementante complementario que a la vez actúa como relleno (filler) y de microfibras de acero para darle ductilidad al compuesto. El presente trabajo involucró el uso de dos cementantes complementarios diferentes a la microsíllica, un subproducto industrial (CVFM) y un producto co-

mercial del mismo origen que el CVFM ( $M^3$ ). Se caracterizaron los ingredientes por diferentes técnicas, se determinaron los puntos de saturación (dosificación óptima de aditivo) para una fluidez objetivo, se determinó la dosificación óptima de microfibra. Los resultados muestran la importancia de la constitución físico-química del cemento en las propiedades reológicas en estado fresco y mecánicas en estado endurecido del concreto. Se identificaron los parámetros determinantes para la producción exitosa de estos compuestos. Por las propiedades reológicas y mecánicas que mostraron los sistemas cementantes con  $M^3$  y CVFM, estos cementantes representan una alternativa viable para usarse en la producción de estos concretos.

**Palabras clave:** Relación A/CM, Fluidez, Cementantes complementarios, Aditivo superfluidificante, Actividad puzolánica, Curado acelerado.

### Abstract

UHPC's are elaborated with low water/cementitious material ratios, causing the use of superplasticizing/

Tabla. I. Caracterización del CPO 40, los CC, las arenas de sílice y la andesita

Composición química							
	CPO 40	CC			Arenas		
		HSF	$M^3$	CVFM	F20/40	F40	Andesita
SiO <sub>2</sub>	19.28	94.05	48.51	60.42	—	—	80.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.03	0.13	25.30	27.28	—	—	7.28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.79	0.09	3.13	4.07	—	—	4.04
CaO	64.31	0.32	14.65	2.47	—	—	1.61
MgO	1.68	0.17	2.56	0.91	—	—	0.12
SO <sub>3</sub>	3.07	0.00	1.07	0.34	—	—	0.06
K <sub>2</sub> O	0.95	0.51	1.01	1.11	—	—	2.94
Na <sub>2</sub> O	0.23	0.88	0.52	0.62	—	—	1.36
Na <sub>2</sub> O equivalente	0.85	—	—	—	—	—	—
PPI	3.2	—	—	—	—	—	1.48
C <sub>3</sub> S	70.2	—	—	—	—	—	—
C <sub>2</sub> S	2.3	—	—	—	—	—	—
C <sub>3</sub> A	10.3	—	—	—	—	—	—
CaAF	5.5	—	—	—	—	—	—
Propiedades físicas							
SE Blaine m <sup>2</sup> /kg	1.37	—	—	—	9.55	14.50	—
SE BET m <sup>2</sup> /g	3.8	25.8	2.5	3.2	—	—	—
Densidad	3.06	2.18	2.56	2.27	2.65	2.63	—
Absorción %	—	—	—	—	—	—	—
T <sub>max</sub> , μm	—	—	—	—	1534	893	—
d(0.5), μm	16.03	11.04	2.95	59.43	669.73	436.35	—

SE= Superficie específica; T<sub>max</sub>= Tamaño en el que se retiene el 90% del material determinado por láser; Na<sub>2</sub>O equivalente= Determinado con base en ASTM C150 como Na<sub>2</sub>O + 0.658K<sub>2</sub>O

Tabla II. Proporciones de ingredientes en kg/m<sup>3</sup> para los morteros definitivos con 2% de FA y sin FA.

Ingredientes		Proporciones en kg/m <sup>3</sup>					
Cementante		HSF		M <sup>3</sup>		CVFM	
FA,%		0	2	0	2	0	2
Agua	Reacción	218	2	0	2	0	2
	Absorción	29	217	194	194	204	203
CPO 40		758	756	775	774	776	772
CC		189	189	194	194	194	193
Aditivo		26	26	25	25	25	25
Arena *1		1,013	959	1,154	1,098	1,052	1,045
Fibra		---	156	---	159	---	158
Aire atrapado, %		4.3	4.5	2.1	2.2	2.0	2.5
Fluidez promedio, %		147	105	154	72	155	93

\*1 Propiedades de arena; D<sub>ss</sub> = 2.74 y absorción de agua = 2.81%

water reducing admixtures to be absolutely necessary. Due to the maximum size of the fine aggregate that was used, the complementary cementitious material is also a filler, and ductility in the concrete is achieved by adding steel microfibers to it. This research involved the use of two complementary cementitious materials different from the silica fume: an industrial by-product (CVFM) and a commercial product from a source similar to CVFM's (M<sup>3</sup>). Different techniques were used to characterize the ingredients. Saturation points were determined for a target flow in the mix (optimum admixture dosification). The results show the importance of the physical and chemical composition of cement in the concrete's rheology (fresh) and mechanical (hardened) properties. The determining factors for the successful production of UHPC's were identified. According to the rheological and mechanical properties shown by the cementitious systems with M<sup>3</sup> and CVFM, the use of these cementitious materials is a feasible alternative in the production of UHPC's.

**Keywords:** W/CM ratio, Flow, Complementary cementitious, Superplasticizer admixture, Pozzolanic activity, Accelerated curing.

## Referencias

1. Olivier Bonneau, Mohamed Lachemi, Eric Dellaire, Jérôme Dugat y Pierre-Claude Aitcin; "Mechanical Properties and Durability of two Industrial Reactive Powder Concretes"; ACI Materials Journal, julio-agosto 1997; pp. 286.
2. William J. Semioli; "The New Concrete Technology"; ACI Concrete International, November 2001. pp.75.
3. M Moranville-Regourd; "Portland Cement-Based Binders-Cements for the next Millennium"; Proceedings of the International Conference on Modern Concrete Materials: Binders, Additions and Admixtures, University of Dundee, Scotland, UK, 1999. pp. 96.
4. Kendall, K, Howard, AJ and Birchall, J.D.; "The relation between porosity microstructure and strength, and the approach to advanced cement - based materials", Phil.Trans. R. Soc.London. A 310, 1983. pp. 139 - 153.
5. S. Collepardi, L. Coppola, R. Troli and M. Collepardi; "Mechanical Properties of Modified Reactive Powder Concretes"; ACI sp 173, Fifth CANMET/ACI International Conference on

- Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete, 1997; pp. 1-21.
6. Pierre-Claude Aïtcin; "Cements of Yesterday-Concrete of Tomorrow"; Cement and Concrete Research, 30, 2000. pp. 1349-1359.
  7. De Larrard F. Y Sedran T. "Optimization of Ultra High Performance Concrete by using a Packing Model". Cement and Concrete Research, V. 24, No. 6, 1994. pp. 997-1009.
  8. F. de Larrard. Ultrafine Particles for making Very High Performance Concretes; High performance concrete, from Material to Structure, edited by Ives Malier; E & FN SPON, 1994; pp 40.
  9. P. Rossi, P. Acker and Y. Mallier. "Effect of Steel Fibers at Two Stages: The Material and the Structure", Materials and Structures, V. 20, 1987. pp. 436-439.
  10. Surendra P. Shah; "Microcracking, Ductility and Durability"; Paper presented at the ACI Fall 2001 Convention, Dallas Texas, October 29, 11:00 A.M.
  11. "State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI 544.1R 96"; ACI Manual of Concrete Practice 2002, Volume 5. pp 3.
  12. Richard, P., and Cheyrezy, M. H., 1994, "Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 Mpa Compressive Strength". ACI SP – 144, pp 507 – 518.
  13. V. M. Malhotra and P. K. Metha; Pozzolanic and Cementitious Materials, Advances in Concrete Technology, Volume 1. Gordon and Breach Publishers, 1996. pp 22-26.
  14. A. Durán. Desarrollo de compuestos densificados reforzados. Base cemento Pórtland CPO 40 de la compañía CEMEX. PhD tesis, PDIMAT-FIME-UANL. 2003; 165 pp.
  15. Takemi Shibuya; Journal of the Society of Materials Science; V. 35, No 392; Kyoto 1986; pp 496-501.
  16. Bjorn Myhre and Aase M. Hundere; The use of particle size distribution in development of refractory castables; XXV ALAFAR Congress, San Carlos de Bariloche, Argentina, 1996; 7p.
  17. P. C. Aïtcin; "High Performance Concrete (Modern Concrete Technology 5)". E & FN Spon, 1998; pp 120, 166.
  18. Roy, D. M., and Gouda, G. R., Cement and Concrete Reseach, V.3, 1983, pp. 807-820.
  19. Bjor Myhre. Particle size distribution and its relevance in refractory castables; 2<sup>nd</sup> Indian Refractory congress, 1996. 7 p.