

HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES CON BAJO CONTENIDO DE POLVO: LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DEL FUTURO

Humberto Balzamo,^a Gastón Fornasier,^b Diego Mantegna,^c Claudio Hernández^d

RESUMEN

Para diseñar Hormigones Autocompactantes (HAC) se tiende a utilizar contenidos de material pulverulento (cemento + adiciones minerales) por encima de los 500 kg/m³, muy superiores a los empleados en los hormigones convencionales. El presente trabajo se focaliza en el diseño de HAC con bajos contenidos de material en polvo (entre 330 y 420 kg/m³) utilizando un aditivo diseñado especialmente para tal fin.

El estudio abarca la determinación de sus propiedades en estado fresco, aplicando las normas elaboradas recientemente por el Comité ASTM C09.47, que abarca la ASTM C1611-05 (Extendido) y ASTM C1621-06 (Extendido con J-Ring). Asimismo, se evalúa la segregación estática de los HAC empleando un método que se encuentra próximo a aprobarse como normativo. Complementariamente, se determinaron los ensayos sobre la caja "L", la caja "U" y el V-Funnel. Sin duda, la obtención de HAC con bajo contenido de polvo lo convierte en un material más competitivo frente a los hormigones convencionales, cuyas resistencias oscilan entre 20 y 35 MPa.

Palabras claves: HAC, Extendido, J-Ring, Índice de estabilidad visual, Segregación estática.

ABSTRACT

To design Self-Compacting Concrete (HAC, in Spanish), the trend has been... (cement + mineral admixtures) exceeding 500kg/m³, much higher than those used in conventional concrete. This paper focuses on the design of HAC with low content of powdery material (between 330 and 420 kg/m³) using an admixture designed for that purpose.

The study covers the determination of its properties in fresh state, applying the standards developed recently by the ASTM Committee C09.47, which includes ASTM C1611-05 (Extended) and ASTM C1621-06 (Extended with J-Ring). The HAC static segregation is also assessed using a method segregation of HAC's using a method which is about to be approved as regulatory.

Additionally, tests were performed on the "L" box, the "U" Box and the V-Funnel.

There is no doubt that manufacturing of HAC with low powder content makes it a more competitive material in comparison with conventional concrete, which has resistances ranging from 20 to 35 MPa.

Keywords: HAC, Extended, J-Ring, Visual stability index, Static segregation.

Laboratorio de Materiales y Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires – Las Heras 2214 (C 1127 AAR), Ciudad de Buenos Aires, Argentina – Tel/Fax: 0054114514-3009/3010.
Centro Técnico LOMA NEGRA – Av. Cnel Roca 6757 (C1439DWE).
Ciudad de Buenos Aires, Argentina - Tel: 005411-4605-3000.
Fax: 005411-4605-3006.
BASF Argentina S.A., Ruta Panamericana km 47,5 Colectora Oeste (B1625KWW).
Belén de Escobar, Buenos Aires, Argentina. Tel: 00543488-433000; Fax: 00543488-432828.

a. Ingeniero civil, Docente e Investigador Universidad de Buenos Aires, Asesor Técnico BASF Argentina.

b. Ingeniero civil, Líder de Producción, Hormigones LOMAX.

c. Ingeniero civil, Líder de Calidad, Hormigones LOMAX.

d. Técnico especializado, Centro Técnico LOMA NEGRA.

RESUMO

Para desenhar Concretos de Auto-Compactação (HAC, pela sigla em espanhol), se tem a tendência de utilizar conteúdos de material pulverulento (cimento + adições minerais) por acima dos 500kg/m³, conteúdos muito mais elevado daqueles utilizados no concreto convencional. Este artigo enfoca-se à concepção do HAC com baixo teor de material em pó (entre 330 e 420 kg/m³), com um aditivo concebido para esse fim.

O estudo abrange a determinação das propriedades dele no estado fresco, aplicando as normas desenvolvidas recentemente pela Comissão ASTM C09.47, incluindo a norma ASTM C1611-05 (Estendido) e ASTM C1621-06 (Estendida com J-Ring). Também avalia-se a segregação estática dos HAC usando um método perto de ser aprovado como normativo.

De forma complementar, testes fizeram-se na caixa "L" na caixa "U" e no funil V.

Sem dúvida, a obtenção de HAC com baixos conteúdos de pó, o torna um material mais competitivo junto a concretos convencionais, com resistências variando entre 20 e 35 MPa.

Palavras-chave: HAC, Estendido, J-Ring, Índice de Estabilidade Visual, Segregação estática.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, los hormigones autocompactantes tienen fuerte penetración en el mercado de los prefabricados debido a diversos factores: la facilidad con que éstos son capaces de llenar elementos con formas muy variadas e intrincadas, la eliminación de los vibradores de inmersión o de contacto para compactar el hormigón y la resistencia inicial que adquieren debido al alto contenido de cemento y las bajas relaciones agua/material cementicio. Esto último permite eliminar en muchos casos los tratamientos térmicos como el curado a vapor.

En consecuencia, existen claros beneficios vinculados con la reducción del costo de la mano de obra: la eliminación de la compactación y del curado a vapor. Esta situación se suma al hecho que la diferencia de costos de materia prima por metro cúbico entre un hormigón convencional y un HAC es relativamente baja dado que la industria de los premoldeados emplea altos contenidos de cemento *per se* (entre 400 y 500 kg/m³). A partir de las ventajas técnico-económicas mencionadas, los HAC han penetrado con gran velocidad en este tipo de industria, habiéndose reportado en el último congreso mundial del tema realizado en la ciudad de Chicago (2005), que más del 60% de las empresas de premoldeados en los Estados Unidos, habían incorporado el HAC.

Por otro lado, para la industria del hormigón elaborado, donde los requisitos de resistencias iniciales y finales normalmente no son tan elevados, la penetración de los HAC se hace más difícil. Esto se debe a que los contenidos de cemento son sustancialmente mayores y que la disminución en los costos de mano de obra al parecer no son tan evidentes. Teniendo en cuenta que una buena parte del hormigón que se emplea actualmente es de 20 a 35 MPa de resistencia media, los HAC presentan diferencias de costo de materia prima relativamente altas en comparación con los hormigones convencionales de resistencia equivalente [1][2]. La Figura 1, muestra un gráfico teórico que intenta explicar conceptualmente estos aspectos.

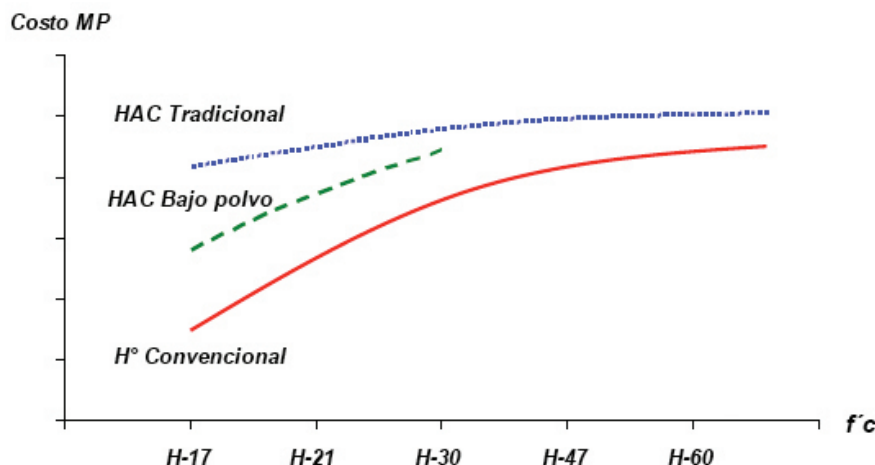


Figura 1. Comparativa teórica costo materia prima vs. f'c.

En América Latina, se han llevado a cabo un buen número de obras con HAC [3] empleando hormigones con resistencias comprendidas entre 30 y 60 MPa con excelentes resultados [2]. Actualmente las empresas de premoldeados también están comenzando a emplearlo dentro de sus productos de línea.

El objetivo de este trabajo, fue obtener mezclas HAC con bajo contenido de material pulverulento, transformándolo así en un producto más competitivo frente a los hormigones convencionales, que son los más solicitados en el mercado del hormigón elaborado.

MATERIALES UTILIZADOS

El material cementicio empleado fue una combinación de 65% de cemento Pórtland normal (CPN 40) y un 35% de escoria granulada de alto horno molida. Los agregados finos empleados se obtuvieron mediante una mezcla de arena fina del Río Paraná (Modulo de Finura 1,70-1,90) con una arena gruesa, compuesta a su vez, por arena oriental (33%) y arena de trituración granítica lavada (67%). El agregado grueso utilizado fue una piedra partida granítica de tamaño máximo nominal 12,5 mm.

Como aditivos químicos, se emplearon un incorporador de aire (AEA) y un prototipo de laboratorio denominado L131. Este aditivo fue formulado especialmente para el conjunto de materiales utilizado con el fin de obtener una elevada fluidez y una adecuada estabilidad y resistencia a la segregación en estado fresco, aún con bajos volúmenes de pasta.

ESTUDIOS Y ENSAYOS REALIZADOS

Mezclas evaluadas

El detalle de las mezclas evaluadas y las determinaciones de aire incorporado y peso de la unidad de volumen se presentan en la Tabla 1. Como puede observarse, el objetivo fue diseñar hormigones autocompactantes con volúmenes de pasta (excluyendo el aire) cercanos al límite mínimo recomendado en diferentes métodos de diseño [4]. Este valor es del orden de los 340 litros de pasta por metro cúbico de hormigón.

Como se aprecia en la Tabla 1 (ver celdas sombreadas de color gris), todas las mezclas estudiadas presentan volúmenes de pasta sin aire inferiores al mencionado (340 lts/m³). Inclusive, si se considerara el aire naturalmente incorporado en el volumen de pasta de las mezclas denominadas 390, 360 y 330, el mismo sería insuficiente para asegurar una adecuada autocompactabilidad.

En cambio, la incorporación de aire en forma intencional a niveles del orden de $7\% \pm 1,5\%$ en las mezclas 390-A, 360-A y 330-A permitió elevar el volumen de pasta a niveles cercanos al límite superior recomendado de 390 lts/m³ [4]. En el caso de la mezcla denominada 420, la variante con aire intencionalmente incorporado no fue aplicada por resultar satisfactorio su comportamiento en estado fresco a partir del empleo del aditivo L131 solamente.

Tabla 1. Características de las mezclas estudiadas.

ID Mezcla	420	390	390A	360	360A	330	330A
CUMC [kg/m ³]	420	390	390	360	360	330	330
CUA [lts/m ³]	185	180	185	185	185	190	190
Volumen Pasta sin aire [lts/m ³]	322	307	312	303	303	298	298
Volumen Pasta con aire [lts/m ³]	337	328	380	325	388	317	376
Agr. Fino/ Agr. Total	54%	55%	55%	53%	53%	54%	55%
Arena Fina/ Arena Total	80%	85%	100%	100%	100%	100%	100%
Aire Medido [%]	1,5	2,1	6,8	2,2	8,5	1,9	7,8
PU3V [kg/m ³]	2379	2310	2240	2342	2191	2344	2227

Evaluaciones en estado fresco ensayos llevados a cabo:

Ensayo	Propiedad evaluada
Extendido libre Índice de Estabilidad Visual (IEV).	Fluidez y aspecto de la mezcla.
Determinación del tiempo T50 y tiempo de pasaje por el V-Funnel.	Viscosidad plástica.
Extendido con el anillo J-Ring, relación de alturas en la caja "L" y diferencia entre la rama ascendente y la descendente en la caja "U".	Capacidad de sortear obstáculos.
Columna de segregación.	Segregación estática.

Extendido libre e Índice de Estabilidad Visual (IEV).

Las mezclas fueron diseñadas para un extendido libre de 650 ± 30 mm. La norma ASTM C1611 aprobada en el año 2005 establece el método de ensayo y, luego de una serie de estudios, ha verificado que la posición del cono de Abrams (invertido o en su posición natural) no afecta el extendido final. En el anexo de la citada norma se brindan pautas para poder evaluar el IEV, especificando una escala de 0 a 3. La escala califica con "0" al HAC estable y con "3" a aquel HAC donde se observa una clara segregación de la pasta y un "halo" mayor a 5 mm en el borde de ataque. En las Fotos 1 y 2, se puede observar el aspecto del extendido libre de las mezclas 330 y 330-A, notándose claramente las diferencias mencionadas.

Comparando ambas fotos puede comprobarse el efecto benéfico de la incorporación de aire en forma intencional. La mezcla 330, a pesar de comportarse adecuadamente en movimiento, es incapaz de tener un comportamiento estable cuando se encuentra en reposo. La Foto. 1, muestra claramente la segregación en el borde de ataque con la formación de un halo alrededor del mismo.



Foto. 1 Extendido libre de mezcla 330.

Viscosidad plástica.

Los resultados obtenidos muestran que todas las mezclas evaluadas son de baja viscosidad plástica debido a que los tiempos de pasaje por el V-Funnel y los tiempos T50 son significativamente bajos. Si bien los ensayos de medición de tiempos tan cortos son muy dependientes del operador, la norma ASTM C1611 incorporó el tiempo T50 como anexo. A diferencia del extendido libre, este tiempo depende de la posición del cono de Abrams en el ensayo de extendido.



Foto. 2 Extendido libre de mezcla 330-A.

Extendido con el anillo J-Ring

Si bien los ensayos de la caja “L” y “U” fueron más difundidos, la norma ASTM C1621-06 incorporó el extendido con el anillo J-Ring como parámetro de medida de la capacidad de pasaje de un HAC. Como puede verse en la Foto 3, consiste en una jaula con barras que restringe el movimiento libre del ensayo de extendido descrito anteriormente. Sin lugar a dudas es un ensayo de mayor simplicidad para ser aplicado en obra respecto de las cajas “L” y “U”. La capacidad de pasaje está asociada a la diferencia con el extendido libre. Para ello, la norma plantea 3 límites:

- Diferencia < 25 mm: Óptimo.
- Diferencia > 25 < 50 mm: Aceptable.
- Diferencia > 50 mm: Inaceptable.



Foto. 3 Extendido con J-Ring (360-A).

Columna de segregación

Sin lugar a dudas, la estabilidad de un HAC es tan importante en movimiento (segregación dinámica) como también en reposo (segregación estática). Para ello se encuentra en estudio el ensayo de la columna de segregación. Como puede verse en las Fotos 4 y 5, el objetivo es establecer la diferencia de agregado grueso entre la parte superior e inferior de la columna luego de haber dejado 15 minutos en reposo al material. El hormigón se lava por el tamiz de 4,75 mm de abertura de malla. Luego del lavado, el Índice de Segregación Estática S [%], se calcula según la ecuación 1.

$$S = \frac{CA_{superior} - CA_{inferior}}{\left(\frac{CA_{superior} + CA_{inferior}}{2} \right)} \times 100 \quad (1)$$

Siendo: $CA_{SUPERIOR}$ = Contenido de agregado grueso de la parte superior.

$CA_{INFERIOR}$ = Contenido de agregado grueso de la parte inferior.

Si $S < 0$ deberá informarse $S = 0\%$



Foto. 4 Vista de la columna de segregación.



Foto. 5 Lavado del hormigón.

Estado endurecido

En todas las mezclas fue determinada la evolución de la resistencia a compresión a 1, 3, 7 y 28 días como primera aproximación del comportamiento mecánico de estos hormigones. El programa experimental trazado incluye la evaluación de la contracción por secado, la determinación del módulo de elasticidad a diferentes edades y algunos parámetros durables tales como la velocidad de succión capilar a 28 y 56 días. En la Tabla 3, se muestran los valores de resistencia obtenidos.

RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 2 puede observarse que las mezclas 330, 360 y 390, que no poseían aire intencionalmente incorporado, presentaron las mayores diferencias entre el extendido libre y el extendido con el J-Ring. De la misma forma, los valores de las cajas “L” y “U” de estas mismas mezclas marcaron una tendencia que demuestra un comportamiento inadecuado respecto de la habilidad de un HAC de sortear obstáculos.

La misma tabla muestra que la columna de segregación también mostró sensibilidad frente a las mezclas sin aire incorporado. Respecto de los límites de aceptación, debe mencionarse que aún no existe un criterio unificado. Sin embargo, un índice S mayor al 10% puede asociarse con un HAC inadecuado, mientras que un índice de segregación menor que 5% sería óptimo desde el punto de vista de la segregación estática.

Analizando las resistencias detalladas en la Tabla 3, se puede observar que las mezclas 360 y 330 que evidenciaron un comportamiento inadecuado en estado fresco tanto por el índice de estabilidad visual como también por la segregación estática, presentaron resistencias inferiores en comparación con las mezclas 360-A y 330-A, a pesar de que poseían aire intencionalmente incorporado. Luego de la rotura se observó que las probetas mostraban en la cara superior, un espesor de 3 a 4 cm de mortero, producto de la inestabilidad mencionada en estado fresco.

Respecto de las mezclas 390 y 390-A, el nivel de resistencia alcanzado resultó satisfactorio. Las diferencias son relativamente bajas teniendo en cuenta que el contenido de aire incorporado intencionalmente de la mezcla 390-A fue del orden del 7%. Asimismo, como puede verse en la Tabla 3, las mezclas evaluadas barren un espectro de resistencias a compresión amplio, entre 25 a 45 MPa aproximadamente.

Tabla 2. Determinaciones en estado fresco.

Parámetros fluidez/aspecto							
Mezcla	420	390	390A	360	360A	330	330A
Extendido [mm]	660	670	630	685	670	680	665
IEV	1	1	0	2	0	3	1
Parámetros viscosidad plástica							
T50 [seg]	2,4	1,8	1,6	2,5	1,2	2,6	1,0
V-Funnel [seg]	4,4	4,4	3,0	4,1	2,1	3,1	2,7
Parámetros capacidad de pasaje							
H ₂ /H ₁ Caja "L"	0,88	0,72	0,83	0,86	0,90	0,82	0,88
Diferencia entre ramas Caja "U" [cm]	1,0	7,8	3,4	4,7	1,8	5,7	1,5
J Ring [mm]	655	600	600	640	650	640	645
Diferencia Ext./J-Ring [mm]	5	70	30	45	20	40	20
Segregación estática							
S [%]	9,4	12,3	6,9	11,0	7,6	12,2	5,8

Tabla 3. Evolución de resistencia a compresión.

Mezcla		420	390	390A	360	360A	330	330A
Resistencia Compresión (MPa)	1 día	10,57	,4	6,5	2,0	7,4	1,0	4,0
	3 días	28,3	21,8	19,5	12,0	16,8	9,7	11,7
	7 días	34,9	29,7	26,9	17,1	18,5	13,4	16,2
	28 días	54,2	46,4	41,1	25,0	32,5	20,3	24,7

CONCLUSIONES

En función de los resultados obtenidos hasta el momento y teniendo en cuenta que el desarrollo y optimización de HAC con bajos contenidos de polvo pueden convertirse en una alternativa viable para el mercado del hormigón elaborado, pueden extraerse las siguientes consideraciones preliminares:

- Es posible conseguir HAC con bajos contenidos de polvo que se comporten adecuadamente desde el punto de vista estático, dinámico y de su capacidad de sortear obstáculos. Las mezclas obtenidas con este conjunto de materiales presentaron una baja viscosidad plástica medidas por el ensayo T50 y el tiempo de pasaje por el V-Funnel.
- La incorporación de aire en forma intencional mejoró notablemente el comportamiento en estado fresco de los HAC con 390, 360 y 330 kg/m³ de material cementicio. Para evaluar este comportamiento, el grupo de ensayos planteados por ASTM (Extendido libre, Extendido con J-Ring y Columna de Segregación), mostró sensibilidad para detectar comportamientos inadecuados de las mezclas evaluadas.
- La evolución de resistencia a la compresión se corresponde, en principio, con los comportamientos observados en estado fresco. La heterogeneidad y la falta de estabilidad de las mezclas sin aire (Mezclas 390, 360 y 330) influyen negativamente en el comportamiento resistente.
- Si bien resta parte importante del programa experimental, esta primera aproximación permite aseverar que es posible obtener HAC con resistencias y contenidos de material cementicio comparables a los hormigones convencionales.

REFERENCIAS

- [1] Grunewald, Walraven, "The effect of viscosity agents on the characteristics of SCC", Second North American Conference and Fourth International RILEM Symposium SCC., USA, (2005), pp 9-15.
- [2] Terpstra, Jacob, "Stabilizing low viscous self compacting concrete", Second North American Conference and Fourth International RILEM Symposium on SCC, Chicago, USA, (2005), pp 47-54.
- [3] Fornasier, Giovambattista P., Zitzer, "Self Consolidating Concrete in Argentina: Development program & applications", First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete, Chicago, USA, (2002), pp. 439-445.
- [4] Fornasier, Fava, "Hormigones autocompactantes", Capitulo 3, Hormigones especiales, AATH, (2004).