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/m^3, 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/m^3) 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 ente 20 y 35 MPa.

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

ABSTRACT

To design Self-Compacting Concrete, SCC, (HAC, in Spanish), the trend has been… (cement + mineral admixtures) exceeding 500 kg/m^3, 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/m^3) 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 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.

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 cementício 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/m^3). 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% ± 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/m^3 [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
PU3 V [kg/m^3]	2379	2310	2240	2342	2191	2344	2227

Evaluaciones en estado fresco ensayos llevados a cabo:

Ensayo	Propiedad evaluada
Extendido libre Indice 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 Indice de Segregación Estática S [%], se calcula según la ecuación 1.

$$S = \frac{CA_{\text{sup}\,erior} - CA_{\text{inf}\,erior}}{\left(\frac{CA_{\text{sup}\,erior} + CA_{\text{inf}\,erior}}{2}\right)} \times 100 \qquad \textbf{(1)}$$

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%

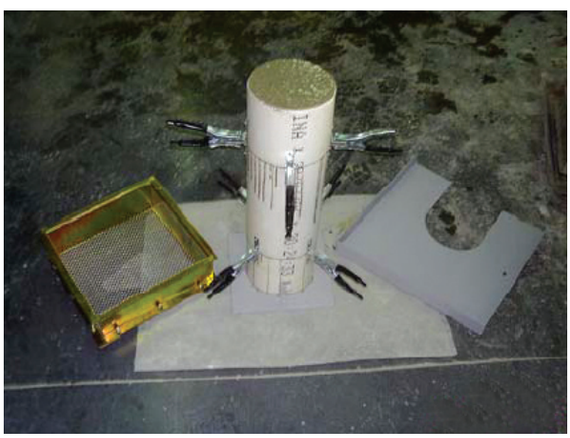

Foto. 4 Vista de la columna de segregación.

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/H1 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 dias	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/m^3 de material cementício. 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 cementício 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).

REQUISITOS PARA LOS AUTORES

Resumen de contenido
Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo es una revista que presenta los avances científicos y tecnológicos en materia de cemento y concreto, emanados de investigaciones, ensayos y trabajos originales desarrollados por investigadores, profesionales, docentes y estudiantes de posgrado, y que dan lugar a la presentación de discusiones de los lectores y la correspondiente réplica o respuesta de los autores, creando un foro de discusión entre los interesados en el tema.

Temática principal de la publicación
- Propiedades de los materiales utilizados en el concreto.
- Investigaciones sobre materiales y concreto.
- Durabilidad.
- Reología.
- Materiales compuestos.
- Propiedades, usos y fabricación de concreto.
- Normatividad de materiales y reportes de comités.
- Diseño de estructuras y elementos de concreto.
- Teorías del diseño y el análisis.
- Normatividad de estructuras de concreto.
- Rehabilitación y monitoreo de estructuras.
- Análisis de estructuras de concreto.
- Concreto presforzado.

Condiciones generales del contenido
Se publican artículos que son evaluados por árbitros nacionales e internacionales. El editor se reserva el derecho de quitar tablas, gráficos o dibujos que sean considerados por los árbitros como innecesarios para la comprensión cabal del texto.

Todos los artículos deberán ser originales. No deberán haber sido publicados, ni haber sido sometidos a arbitraje con anterioridad ni simultáneamente.

Derechos de autor
El autor deberá ceder los derechos de publicación sobre el artículo al Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.

Periodicidad
Semestral.

CARACTERÍSTICAS QUE DEBE CUMPLIR EL ESCRITO

A) Generales

Idiomas
Español, portugués o inglés.

Estructura mínima que deberá tener el artículo
Introducción; Metodología de investigación; Desarrollo; Resultados alcanzados y Conclusiones.

Amplitud del artículo
Extensión máxima de 10 mil palabras o equivalente.

Estructura que deberá tener el Resumen
Objetivos principales y alcance de la investigación; Metodología general empleada; Resultados alcanzados y Conclusiones.

Idioma del Resumen
Español, portugués e inglés.

Amplitud del Resumen
Extensión máxima de 200 palabras por cada idioma.

Número de palabras clave
10.

B) Específicas

Procesador de texto admitido
Word de Microsoft.

Tamaño de página y márgenes
Tamaño carta con 2.5 cm de margen por lado.

Tipografía

Título
Times New Roman 14 puntos negrilla. Un máximo de 70 caracteres incluyendo espacios. Deberá reflejar el contenido del artículo.

Subtítulos
Times New Roman 12 puntos, cursiva, negrilla.

Texto regular
Times New Roman 12 puntos en una sola columna, a doble espacio, en un solo lado de la hoja.

Resumen
Times New Roman 12 puntos.

Unidades
Todas las unidades deberán expresarse en el sistema internacional.

Ilustraciones, tablas, gráficos y fotografías
No se deberán insertar en el texto. Se deberán numerar consecutivamente en orden secuencial y enviar en archivo por separado del texto. Todos deberán tener subtítulo y número de referencia usado en el texto. En el caso de las fotografías se podrán entregar en archivo digital de alta resolución o impresas.

Referencias
La lista de referencias deberá incluirse al final del artículo en orden numérico, de forma secuencial a lo citado en el texto, debiendo anotar: apellido paterno, apellido materno, nombre, nombre del artículo del que se obtuvo, título de la publicación y periodicidad, editor, ciudad y país, número de volumen, número de edición, mes y año e inclusive número de página.

Datos del autor

- Nombre.
- Apellido paterno.
- Apellido materno.
- Grado académico.
- Dirección.
- Teléfono.
- Fax.
- Email.

Datos del artículo

- Título de artículo.

INSTRUCCIONES DE ENVÍO ANTES DEL ARBITRAJE

¿Qué se deberá enviar?
Archivo digital en PDF creado a partir de Word o Postscript utilizando Adobe Acrobat. Anexar figuras, gráficos, ilustraciones y fotografías.

¿Como se deberá enviar?
A través de la forma de envío que se encuentra publicada en la sección de presentación de artículos de la web: www.imcyc.com

¿Cuándo se deberán enviar?
Se recibirán trabajos en cualquier fecha.

INSTRUCCIONES DE ENVÍO UNA VEZ APROBADO EL ARTÍCULO

¿Qué se deberá enviar?
Texto con las correcciones y modificaciones indicadas por los árbitros en archivo digital en PDF creado a partir de Word o Postscript utilizando Adobe Acrobat.

¿Cuándo se deberán enviar?
Dentro del mes siguiente a la notificación de la aprobación del artículo y de las correcciones o modificaciones requeridas.

INSTRUCCIONES PARA LA DISCUSIÓN SOBRE EL ARTÍCULO

(Se abre la discusión sobre el artículo una vez que es publicado en el *Journal*)

¿Qué condiciones deberán reunir los documentos de discusión enviados por los lectores?
No deberán exceder de 1800 palabras y deberán ser presentados dentro de los siguientes 4 meses de haber sido publicado el artículo.

¿Qué condiciones deberán reunir los documentos de respuesta o réplica del autor?
Los documentos de discusión serán enviados al autor en el periodo indicado. La respuesta para cada uno de los documentos de discusión recibidos no deberán exceder de 1800 palabras y en el caso de que sean varios los documentos presentados por los lectores, la respuesta no deberá exceder de la mitad del espacio destinado a los documentos de discusión presentados.

¿Cuándo se publicarán los documentos de discusión enviados por los lectores y los de respuesta o réplica del autor?
Se publicarán en el mismo número del *Journal* los documentos de discusión y los de respuesta del autor correspondientes en el número más próximo a la fecha de recepción de los documentos de respuesta.

FECHA DE IMPRESIÓN Y TIRAJE
Julio de 2009 ▫ Impresión: 2,000 ejemplares.

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
Es una asociación no lucrativa que se dedica a la investigación, enseñanza y difusión de las técnicas de aplicación del cemento y del concreto. Su misión es promover la óptima utilización del cemento y del concreto para satisfacer las necesidades del mercado con calidad, productividad y oportunidad, contribuyendo así a mejorar el desempeño profesional, el desarrollo y beneficio económico de la industria, así como de la sociedad. Cabe decir que este 2009 el IMCYC cumple 50 años de haber sido fundado.

Consejo Directivo IMCYC

Presidente
LIC. JORGE L. SÁNCHEZ LAPARADE

Vicepresidentes
ING. GUILLERMO GARCÍA ANAYA
ING. HÉCTOR VELÁZQUEZ GARZA
ING. DANIEL MÉNDEZ DE LA PEÑA
ING. PEDRO CARRANZA ANDRESEN
LIC. ANTOINE ZENONE

Tesorero
ARQ. RICARDO PÉREZ SCHULZ

Secretario
LIC. ROBERTO J. SÁNCHEZ DÁVALOS

Estructura Operativa

Director General
M. EN C. DANIEL DÁMAZO JUÁREZ

Gerencia Administrativa
LIC. IGNACIO OSORIO SANTIAGO

Gerencia de Difusión y Publicaciones
LIC. ABEL CAMPOS PADILLA

Gerencia de Enseñanza
ING. DONATO FIGUEROA GALLO

Gerencia de Relaciones Internacionales y Eventos Especiales
LIC. SOLEDAD MOLINÉ VENANZI

Gerencia de Promoción y Comercialización
LIC. GERARDO ÁLVAREZ RAMÍREZ

Gerencia Técnica
ING. LUIS GARCÍA CHOWELL

Artículos
La publicación de artículos en este *Journal* requiere de un proceso de revisión y evaluación de los mismos. Los artículos se publican bajo la responsabilidad de sus autores. El Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., no se compromete con los comentarios, opiniones y/o recomendaciones vertidas por los autores de los documentos aquí presentados.