

Revista **ALCONPAT**

Revista Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y
Recuperación de la Construcción

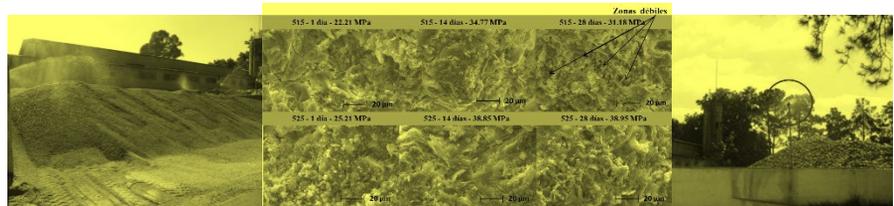
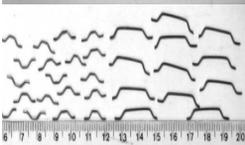
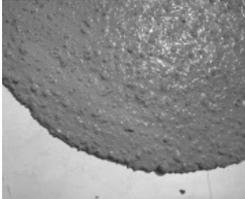
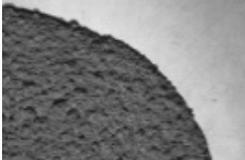
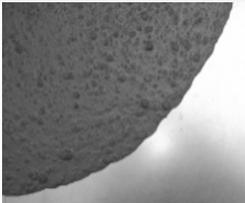
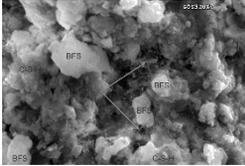
Número Completo DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i1>
revistaalconpat@gmail.com

eISSN: 2007-6835

Volumen 6

Enero - Abril 2016

Número 1



substrato de transição ancorado ao concreto e armaduras



Revista Latinoamericana de Control, de Calidad Patología y
Recuperación de la Construcción

<http://www.revistaalconpat.org>



ALCONPAT Internacional

Miembros Fundadores:

Liana Arrieta de Bustillos – **Venezuela**
Antonio Carmona Filho - **Brasil**
Dante Domene – **Argentina**
Manuel Fernández Cánovas – **España**
José Calavera Ruiz – **España**
Paulo Helene, **Brasil**

Junta Directiva Internacional:

Presidente de Honor

Paulo Do Lago Helene, **Brasil**

Presidente

Angélica Ayala Piola, **Paraguay**

Director General

Pedro Castro Borges, **México**

Secretario Ejecutivo

José Manuel Mendoza Rangel, **México**

Vicepresidente Técnico

Pedro Garcés Terradillos, **España**

Vicepresidente Administrativo

Margita Kliewer, **Paraguay**

Gestor

Bernardo Tutikian, **Brasil**

Revista ALCONPAT

Editor en Jefe:

Dr. Pedro Castro Borges
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida
(CINVESTAV IPN – Mérida)
Mérida, Yucatán, **México**

Co-Editor en Jefe:

MSc. Sergio Raúl Espejo Niño
PhD en Estructuras UPM, Gestión Civil Ingeniero
Bogotá, **Colombia**

Editor Ejecutivo:

Dr. José Manuel Mendoza Rangel
Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de
Ingeniería Civil
Monterrey, Nuevo León, **México**

Editores Asociados:

Dr. Manuel Fernandez Canovas
Universidad Politécnica de Madrid.
Madrid, **España**

Ing. Raúl Husni

Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires.
Buenos Aires, **Argentina**

Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

Universidade de São Paulo.
São Paulo, **Brasil**

Dr. José Iván Escalante García

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional (Unidad Saltillo)
Saltillo, Coahuila, **México**.

Dr. Mauricio López.

Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción,
Escuela de Ingeniería,
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago de Chile, **Chile**

Dra. Oladis Troconis de Rincón

Centro de Estudios de Corrosión
Universidad de Zulia
Maracaibo, **Venezuela**

Dr. Fernando Branco

Universidade Técnica de Lisboa
Lisboa, **Portugal**

Mensaje del Editor en Jefe y del Editor invitado

REVISTA LATINOAMERICANA DE CONTROL DE CALIDAD, PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN

<http://www.revistas-conacyt.unam.mx/alconpat/index.php/RA>

Es motivo de satisfacción y alegría para el equipo de la Revista ALCONPAT ver publicado el primer número de nuestro sexto año.

El objetivo de la Revista ALCONPAT (RA) es la publicación de casos de estudio relacionados con los temas de nuestra asociación, o sea control de calidad, patología y recuperación de las construcciones motivando desde luego la presentación de investigaciones básicas o aplicadas, revisiones o investigación documental.

Este número presenta nuestra cuarta edición especial, esta vez dedicada a las **Aplicaciones de Concretos Especiales**.

Esta edición V6N1, inicia con un trabajo procedente de **España y México**, donde José Bernal y colegas obtienen hormigones autocompactantes con nano-sílice, humo de sílice y mezclas binarias de ambas adiciones que satisfacen la demanda de altas resistencias mecánicas y durables, determinando que la dosificación con mejores prestaciones es la que contiene 2.5% de nano y 2.5% de humo de sílice.

En el segundo trabajo, procedente de **México**, Marisol Gallardo y colegas nos hablan sobre la sintetización de un clínker de sulfoaluminato de calcio calcinando una mezcla de ceniza volante, fluoryeso, escoria de aluminio y carbonato de calcio a 1250 °C. El clínker fue mezclado con 15, 20 o 25 % e.p. de $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$. Evaluaron la resistencia a la compresión de los cementos obtenidos curados en agua potable y en medios corrosivos a 40 °C. Los cementos curados en agua potable desarrollaron resistencias a la compresión de 38-39 MPa, mientras los inmersos en medios corrosivos presentaron una disminución en ésta. La degradación de los cementos por ataque químico fue debida a una descalcificación y dealuminación de las pastas.

En el tercer artículo procedente de **Brasil**, Carlos Britez y colegas hablan sobre el Edificio Comercial Brookfield Century Plaza, localizado en Alphaville, São Paulo, Brasil, que se proyectó apoyado en dos grandes zapatas de hormigón. Un hormigón de alta resistencia (70 MPa) y autocompactante (SCC) fue desarrollado para estas zapatas de grandes dimensiones (cada una mide 28.4m x 18.6m x 4.5m). Un modelo numérico utilizando un software FEM se desarrolló para predecir la ganancia térmica de hidratación de diferentes capas de hormigonado con el fin de establecer el procedimiento más adecuado para atender los requisitos de tiempo y de construcción, sin que aparezcan fisuras. Se establecieron y supervisaron procedimientos para controlar la producción del hormigón en la empresa productora del mismo y durante el hormigonado. Finalmente, se registró la

temperatura interna del hormigón para permitir una mejor calibración del modelo.

El cuarto artículo, de José Manuel Mendoza Rangel y colegas, proviene de **México y España**; ellos evalúan la durabilidad de dos morteros elaborados con sustituciones de ceniza volante (CV) en peso con respecto al cementante total comparando su desempeño con tres morteros de reparación comerciales, expuestos al ataque de CO_2 en ambiente industrial.

El quinto trabajo de este número lo escriben Vladimir Ferrari y colegas de **Brasil**, quienes hacen el desarrollo y análisis del comportamiento de compuestos cementicios de elevado desempeño reforzados con fibras. Es particularmente interesante leer la forma en que desarrollan sus compuestos híbridos y su desarrollo experimental. Un artículo que vale la pena leer.

El artículo que cierra la edición especial es de Alejandro Cabrera Madrid y colegas de **México**, quienes presentan un trabajo de revisión del estado del arte del sistema cementante CP-EAH, enfatizando su efecto en la resistencia mecánica del concreto. El aprovechamiento de las características cementantes de la EAH con altos niveles de reemplazo resulta viable, pudiendo mejorar la resistencia a compresión y en algunos casos la resistencia a la corrosión del acero, dicho mejoramiento dependerá de la cantidad de EAH y del ambiente de exposición del concreto. En esta revisión se confirmaron como benéficos los reemplazos de EAH hasta de un 70% en microclimas húmedos o ambientes marinos, y hasta 50% en ambientes propensos a carbonatación. En estos rangos se puede lograr una eficiencia del reemplazo mayor con respecto a la resistencia a la compresión.

Este primer número especial del año abre con buenas noticias pues desde ya todos los artículos de RA desde su primer número cuentan con número DOI. De igual manera, estrenamos plataforma OJS donde podrán disfrutar y ver con una nueva y más eficiente plataforma el contenido de la revista.

Tenemos la seguridad de que los artículos de este número constituirán una referencia importante para aquellos lectores involucrados con cuestiones de aplicaciones de concretos especiales. Agradecemos a los autores participantes en este número por su voluntad y esfuerzo para presentar artículos de calidad y cumplir con los tiempos establecidos

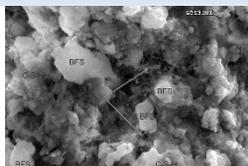
Por el Consejo Editorial



Pedro Castro Borges
Editor en Jefe



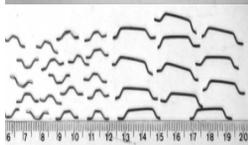
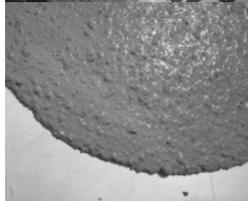
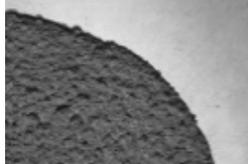
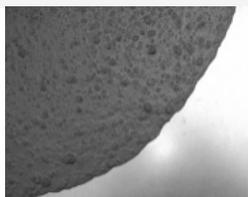
Bernardo Tutikian
Editor Invitado



CONTENIDO

Página

- N. León, J. Bernal, A. Moragues, E. Sanchez-Espinosa:** Propiedades reológicas y mecánicas de un hormigón autocompactante con adición de nano-sílice y micro-sílice. 1
- M. Gallardo Heredia, J. M. Almanza R., D. A. Cortés H., J. C. Escobedo B.:** Comportamiento mecánico y químico de cementos de sulfoaluminato de calcio obtenido a partir de desechos industriales. 15
- C. Britez, J. Gadea, M. Carvalho, P. Helene:** Hormigón y Hormigonado de Cimentación con Hormigón Autocompactante y de Elevadas Prestaciones (70 MPa). 28
- J. M. Mendoza-Rangel, J. M. Flores-Jarquín, E. U. de Los Santos, P. Garcés:** Durabilidad de morteros de reparación sustentables expuestos a ambiente industrial. 41
- V. J. Ferrari, A. P. Arquez, J. B. De Hanai:** Compósitos cimenticios de alto desempeño para aplicação como substrato de transição em vigas. 52
- Artículo de Revisión:**
- J. A. Cabrera-Madrid, J. I. Escalante-García, P. Castro-Borges:** Resistencia a la compresión de concretos con escoria de alto horno. Estado del arte re-visitado. 64





Propiedades reológicas y mecánicas de un hormigón autocompactante con adición de nano-sílice y micro-sílice

E. Sánchez¹, J. Bernal², N. León³, A. Moragues³

¹ Departamento de Ingeniería Agroforestal, Universidad Politécnica de Madrid; España.

² Escuela de Ingeniería Mazatlán. Universidad Autónoma de Sinaloa. México.

³ Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, Universidad Politécnica de Madrid; España.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i1.111>

Artículo recibido el 22 septiembre de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 15 de Diciembre de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2016.

© 2016 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 6, No. 1, Enero – Abril 2016, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de enero de 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMEN

El hormigón autocompactante es el resultado de diseñar mezclas de calidad con capacidad para asegurar su correcta colocación en estructuras fuertemente armadas en las cuales el proceso del vibrado resulta muy complicado y con riesgo de alterar la posición de las armaduras. Unido a las ventajas de este hormigón y debido a la mayor demanda de hormigones de altas prestaciones, se utiliza humo de sílice y, más recientemente, nanomateriales como adiciones. Principalmente nano-sílice. El objetivo de este trabajo es obtener hormigones autocompactantes con nano-sílice, humo de sílice y mezclas binarias de ambas adiciones que satisfagan la demanda de altas resistencias mecánicas y durables, determinando que la dosificación con mejores prestaciones es la que contiene 2.5% de nano y 2.5% de humo de sílice.

Palabras clave: Autocompactante; nanosílice; humo de sílice; reología; propiedades mecánicas.

ABSTRACT

Self-compacting concrete is the result of the redesign of quality mixtures with the ability to ensure its correct placement in strongly assembled structures, where the vibration process is too complicated and where there is the risk of altering the position of the reinforcement bars. Along with the advantages of this concrete and due to the greater demand for high performance concrete, silica fume is used, and more recently, nanomaterials with nano-silica as well; mainly, nano-silica. The objective of this work is to obtain self-compacting concretes with nano-silica, silica fume and binary mixtures of both, which satisfy the demands for high mechanical resistance and durability, determining that the dosage with the best features contains: 2.5% of nano and 2.5% of silica fume.

Keywords: Self-compacting; nano-silica; silica fume; rheology; mechanical properties.

RESUMO

O Concreto Auto-adensável é o resultado da concepção de um concreto de qualidade com a capacidade para assegurar a colocação de reforço em estruturas fortemente armados em que o processo de vibração é muito complicado e arriscado por alterar a posição da armadura. Juntamente com as vantagens deste concreto e devido ao aumento da procura de concretos de alto desempenho, o fumo de sílica e mais recentemente, os nano-materiais são usados como adições. Principalmente a nano-sílica. O objetivo deste trabalho é a obtenção de concreto auto-adensável com nano-sílica, sílica ativa e misturas binárias das duas adições para atender a demanda de alta resistência mecânica e durável. A mistura com melhores desempenhos é aquela que contém 2,5 % de nano-sílica e 2,5% de pó de sílica.

Palavras-chave: Auto-compactável; nano-sílica; sílica activa; reologia; propriedades mecánicas.

Autor de correspondencia: Elvira Sánchez (elvira.sanchez.espinosa@upm.es)

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón autocompactante es el resultado de diseñar un hormigón de calidad con capacidad para asegurar su correcta colocación en estructuras fuertemente armadas en las cuales el proceso del vibrado resulta muy complicado y con riesgo de alterar la posición de las armaduras. El profesor Okamura y Ozawa (1996) inicia el desarrollo de dicho hormigón en la Universidad de Tokio a mediados de los 90, poniéndolo a punto en los años siguientes (Okamura, 1997, Okamura y Ouchi, 1999, Okamura, Ozawa, y Ouchi, 2000, Okamura, Maekawa, y Mishima, 2005). Este hormigón se caracteriza por una reducida relación agua/cemento, un alto contenido de finos, para lo cual se agrega filler calizo a la mezcla, un reducido contenido en árido grueso y la inclusión de aditivos superplastificante. Todo ello permite obtener un hormigón de alta fluidez que, por acción de su propio peso, consigue una buena consolidación sin exudación ni segregación (De la Peña, 2001, EHE-08, 2010). En la industria de los prefabricados las ventajas del uso de este hormigón son aún mayores, ya que aumenta la vida útil de los moldes debido a que la ausencia de vibrado permite que estos sean más ligeros y, por tanto, se reducen los gastos de mantenimiento.

Unido a las ventajas que presenta el hormigón autocompactante y como consecuencia del incremento en la demanda de hormigones de altas resistencias, se comienzan a utilizar nanomateriales como adiciones. Esto tiene como objeto conferir al material características especiales ya sea en su capacidad resistente o en su comportamiento durable. Por lo tanto, el hormigón que se pretende obtener se considera como un hormigón de altas prestaciones, ya que no solo debe satisfacer la demanda de altas resistencias mecánicas, sino que también debe cumplir con altas exigencias respecto a su durabilidad.

Son numerosas las nano-partículas investigadas, siendo las más usadas las de sílice, titanio, alúmina y hierro (Sanchez y Sobolev, 2010). La naturaleza del tipo de adición a elegir, depende de las propiedades que se quieran mejorar o conferir al material, en relación con la funcionalidad que se le quiera dar. La mayor concentración de estudios referentes a la incorporación de nanopartículas en el área de la ingeniería civil son las referentes a la nano-SiO₂ (Kawashima, Hou, Corr, Shah, 2013). La mayoría de estudios coinciden en afirmar que la incorporación de dicha nano-partícula produce cambios microestructurales ya que es un activador de las reacciones puzolánicas (Bjornstrom, Martinelli, Matic, Borjesson, Panas, 2004). De forma similar al ya muy conocido humo de sílice o micro-sílice, la nano-SiO₂ reacciona con el hidróxido de calcio (Ca(OH)₂), produciendo una mayor cantidad de gel CSH que densifica el material, con la consiguiente reducción de su permeabilidad (Said, Zeidan, Bassuoni, Tian, 2012) y control de la lixiviación del Ca²⁺ (Nazari y Riahi, 2010). El tamaño de la sílice adicionada produce cambios en el número y tamaño medio de los cristales de portlandita. Estos cambios microestructurales vienen asociados a cambios en las propiedades macroestructurales tanto de morteros como de hormigones tales como resistencia a compresión, módulo elástico (Yu, Spiesz, Brouwers, 2014; Zyganitidis, Stefanidou, Kalfagiannis, Logothetidis, 2011) y durabilidad León, Massana, Alonso, Moragues, Sánchez-Espinosa, 2014) entre otras.

Hay varios estudios sobre la influencia de nano y micro sílice en hormigones en las que se comparan distintos parámetros (Mondal, Shah, Marks, Gaitero, 2010; Borralleras, 2012; Craeye, Van Itterbeeck, Desnerck, Boel, De Schutter, 2014; Rong, Sun, Xiao, Jiang, 2015) pero hay pocos trabajos en donde se incluyan mezclas binarias de ambas adiciones en hormigones autocompactantes de altas prestaciones. Por tanto, en este trabajo se pretende estudiar la influencia de la nano-sílice, de la micro-sílice o humo de sílice, así como adiciones de mezclas ternarias sobre las propiedades reológicas y mecánicas de hormigones autocompactantes con el fin de establecer las diferencias entre las distintas dosificaciones y poder determinar la mezcla con el

mejor comportamiento frente a estas propiedades, tanto en estado fresco como en estado endurecido.

2. PROCEDIMIENTO

Para la fabricación de las mezclas se utilizó cemento portland CEM I 52,5 R (CP) según EN 197-1, cuyas propiedades están en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físico-químicas del cemento Portland (CP), nanoSi (nSi) y microSi (mSi).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Pérd. al fuego (%)	Dens (g/cm ³)	Sup. espec. (m ² /g)
CP	19.20	6.07	1.70	63.41	2.56	3.38	0.2	0,33	2,09	3,5	0,42
nSi	99.90	-	-	-	-	-	-	-	0,10	1,29	200
mSi	94	-	-	-	-	-	-	-			

La nanosílice (nSi) utilizada es Levasil 200/40% en forma de dispersión acuosa con una riqueza del 40%, una superficie específica de 200 m²/g y un tamaño de partícula de 15 nm (aprox.) (véase Tabla 1). La microsílice o humo de sílice (mSi) utilizada es Elkem Microsilica MS 940 U, compuesta de esferas amorfas, submicrómicas, no porosas de SiO₂ y pequeños aglomerados de éstos, con una superficie específica de 15-30 m²/g y un tamaño medio de partícula de las esferas de aproximadamente 0,15 micras. Aunque algunas de las esferas pueden encontrarse individualmente, la mayoría de ellas forman aglomerados de partículas primarias con un rango típico de 0.1-1 micra (véase Tabla 1). Los aditivos utilizados fueron: superplastificante SIKA Viscocrete 5720 (SP) (polycarboxylato polímero) y aditivo modificador de viscosidad (MV) SIKA Stabilizer 4R. Los áridos empleados en las mezclas fueron: arena de río menor a 4 mm, grava rodada de 6 a 12 mm y filler calizo cuya granulometría cumple con la norma UNE 12620:2003+A1:2009, con un diámetro máximo de 63 µm.

Se diseñaron diez dosificaciones (véase Tabla 2). Todas las muestras mantuvieron una relación agua/material cementante de 0.36. Las dosificaciones fueron: tres con 2.5%, 5% y 7.5% de nano-SiO₂ ([nSi]-2.5; [nSi]-5; [nSi]-7.5), tres con 2.5%, 5% y 7.5% de micro-SiO₂ ([mSi]-2.5; [mSi]-5; [mSi]-7.5), y tres con mezclas de ambas con los porcentajes de cada adición de 2.5%/2.5%, 5%/2.5% y 2.5%/5% de nano-SiO₂ y micro-SiO₂ respectivamente ([nmSi]-2.5/2.5; [nmSi]-5/2.5; [nmSi]-2.5/5) respecto al peso del cemento. Se diseñó una décima mezcla, sin ningún tipo de adición, que será considerada el hormigón de referencia.

Para evaluar las características de autocompactabilidad de los hormigones diseñados se realizaron, en estado fresco, los ensayos normalizados de acuerdo con la instrucción EHE-08 (2010). Dichos ensayos son el de escurrimiento o extensión de flujo (UNE-EN 12350-8), el ensayo del embudo en V (UNE-EN 12350-9), el ensayo de la caja en L (UNE-EN 12350-10) y el ensayo de escurrimiento con anillo japonés (UNE-EN 12350-12).

Comprobada la autocompactabilidad de la mezcla, se procedió a la fabricación de 12 probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura y 2 probetas normalizadas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. Estas probetas se mantuvieron en el laboratorio durante 24 h. Transcurrido ese tiempo, fueron desmoldadas y se sometieron a un curado durante 28 días dentro de una cámara a una temperatura de 20±2 °C y una humedad superior a 95%, de acuerdo a la norma UNE-EN 12390-2.

Tabla 2. Dosificación de los hormigones estudiados

Componentes (kg/m ³)	HAC	[nSi]-2,5	[nSi]-5	[nSi]-7,5	[mSi]-2,5	[mSi]-5	[mSi]-7,5	[nmSi]-2,5/2,5	[nmSi]-5/2,5	[nmSi]-2,5/5
Cemento	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Nanoslice	-	11,25	22,5	33,75	-	-	-	11,25	22,5	11,25
		2,5%	5%	7,50%				2,5%	5%	2,5%
Microsilíce	-	-	-	-	11,25	22,5	33,75	11,25	11,25	22,5
					2,5%	5%	7,50%	2,5%	2,5%	5%
Agua	162	166,0	170,1	174,1	166,0	170,1	174,1	170,1	174,1	174,1
Filler calizo	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Arena	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160
Grava 6/12	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585
SP (%)*	2	3,30	4	6	2,30	2,50	2,70	3,60	4,80	3,90
MV (%)*	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

(*) *Porcentaje en peso de cemento.*

Para caracterizar los hormigones de acuerdo a sus propiedades mecánicas se ensayaron 3 probetas a resistencia a compresión a los 7, 28 y 90 días de su fabricación, según la norma UNE-EN 12390-3. El tamaño máximo del árido, inferior a 12 mm, es lo que permitió su uso para dicho ensayo (Fernandez, 2013). También, y a 28 días de curado, se procedió a determinar la resistencia a tracción indirecta mediante el ensayo de 2 probetas de 100x200 mm de acuerdo a la norma UNE-EN 12390-6:2001. Las 2 probetas de 150x300 mm se ensayaron a esa misma edad para determinar el módulo de elasticidad de acuerdo a la norma UNE-EN 83316:1996. Dichos ensayos se realizaron en una prensa IBERTEST, con una capacidad máxima de 1.500 kN. Para determinar el módulo de elasticidad se midieron las deformaciones en las probetas normalizadas mediante un transformador diferencial de variación lineal de la casa IBERTEST con un sistema de adquisición de datos controlado por ordenador. Las cargas se incrementaron uniformemente a la velocidad de 0.2 MPa/s, durante 3 ciclos sucesivos de carga y descarga hasta un 40 % de la resistencia de compresión. Los valores de resistencia a compresión, tracción indirecta y módulo de elasticidad son el valor medio de los resultados obtenidos en su correspondiente ensayo.

La probeta restante se utiliza para la caracterización microestructural de las mezclas. Para ello se realizó, para todas las edades y mezclas diseñadas, un análisis termogravimétrico (ATG) a 7, 28 y 90 días, según la norma ASTM E1131:(2008).

Para este ensayo se empleó una muestra en polvo, con un tamaño de partícula inferior a 0,5 mm. Para conseguir estas características se utilizó una muestra de 20mm obtenida de la probeta después de haber eliminado los 20mm más externos. La muestra obtenida se pasó por una molidora de mandíbulas para obtener partículas de tamaños inferiores a los 8 mm. Estas partículas se colocaron en un desecador conectado a una bomba de vacío, que garantizó una presión de vacío entre 1 y 5 kPa. Se mantuvo en el desecador durante 45 min. Posteriormente, se sumergió, durante 24 horas, en isopropanol al 95%, con objeto de detener los procesos de hidratación en el hormigón. Posteriormente, se secó en estufa a 40°C durante un tiempo mínimo de 72 horas, para garantizar el completo secado de la muestra.

Previo a la realización del ensayo, las partículas se molieron en un mortero manual de acero, terminándose de refinar el grano en un molino de ágata, Retsch RM 200. El proceso finaliza mediante el cribado del polvo a través de un tamiz de 0.5 mm. La masa molida, de aproximadamente un peso de 300 g, se agitó, en bolsa de cierre hermético, para homogeneizarla. Se hizo un cuarteo de la muestra, dividiendo el total en 8 partes y tomando una porción de cada parte hasta completar dos muestras de 2 g, que se colocaron en estufa a 40°C durante 7 días para estabilizar la masa. El equipo utilizado para el análisis termogravimétrico fue un analizador térmico simultáneo, marca SETARAM, modelo LABSYS EVO, con una balanza de precisión de 0.1 µg. Para el ensayo se empleó una muestra de aproximadamente 55 mg, que se sometió a una rampa de calentamiento dinámico que varió entre 40°C y 1.100°C con una velocidad de calentamiento de 10°C/min. Se utilizaron crisoles de alúmina, como material de referencia α -alúmina (α -Al₂O₃), previamente calcinada a 1.200°C, y una atmósfera de ensayo de nitrógeno (N₂). Este análisis permitió determinar la cantidad de gel CSH y de portlandita (Ca (OH)₂) presente en cada hormigón. Para ello se determinaron los valores de las pérdidas de agua de gel que se obtuvieron sometiendo a la muestra a temperaturas entre 105°C y 400°C aproximadamente. Las pérdidas de agua de portlandita libre se obtuvieron en un rango de temperatura entre 400°C y 600°C aproximadamente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Propiedades reológicas

En la 0 se observa la inspección visual de las 10 mezclas, donde en ningún caso se presentó segregación ni exudación de la lechada. Este resultado es contrario al obtenido por Dubey y Kumar (2012) que afirman que con cantidades superiores al 2% de un SP de tipo carboxilato, similar al utilizado en este estudio, se observa segregación de la mezcla.

Sin embargo, la evaluación visual de las mezclas mostró una gran cantidad de burbujeo en aquellas que contenían nSi. Este fenómeno es atribuido a la cantidad de SP que se utiliza para obtener la docilidad necesaria, tal como plantea Borrelleras Mas (2012).

En el caso de este estudio no se realizó un ensayo de aire ocluido a las mezclas. Sin embargo, Yu *et al.* (2014), realizaron ensayos en hormigones de altas prestaciones con contenidos de nanosílice entre un 1% hasta el 5% de adición con la cantidad de SP constante, y obtienen un aumento exponencial del contenido de aire ocluido, cuanto mayor es la cantidad de nSi, lo que permite concluir que tanto la cantidad de SP como la nSi, traen como consecuencia un aumento en la cantidad de aire ocluido.

Por otra parte, para evaluar si esta cantidad de aire podría eliminarse de las mezclas, se repitieron las amasadas con adición de nSi y se realizó un vibrado en mesa vibradora donde se observó que las burbujas de aire no salían a la superficie, y que la mezcla se movía de forma homogénea dentro de los moldes, formado una única masa que se movía uniformemente. Además, la capa superficial tenía una apariencia plástica que no permitía la expulsión de dichas burbujas. Posteriormente se realizaron ensayos de resistencia a compresión y PIM a estas mezclas vibradas, y no se observaron, en ningún caso, diferencias significativas, por lo que los valores de las mismas no se muestran en este estudio.

La propuesta de los autores de este estudio para mitigar la cantidad de burbujeo es dar mayor energía de mezclado a los hormigones, y aumentar el tiempo de mezclado en la amasadora, logrando así que esta cantidad de burbujas escapen por los movimientos mecánicos del amasado y obtener una mayor docilidad en las mezclas. También se recomienda la utilización, junto con el policarboxilato, de un polietileno condensado que actúe como desespumante.

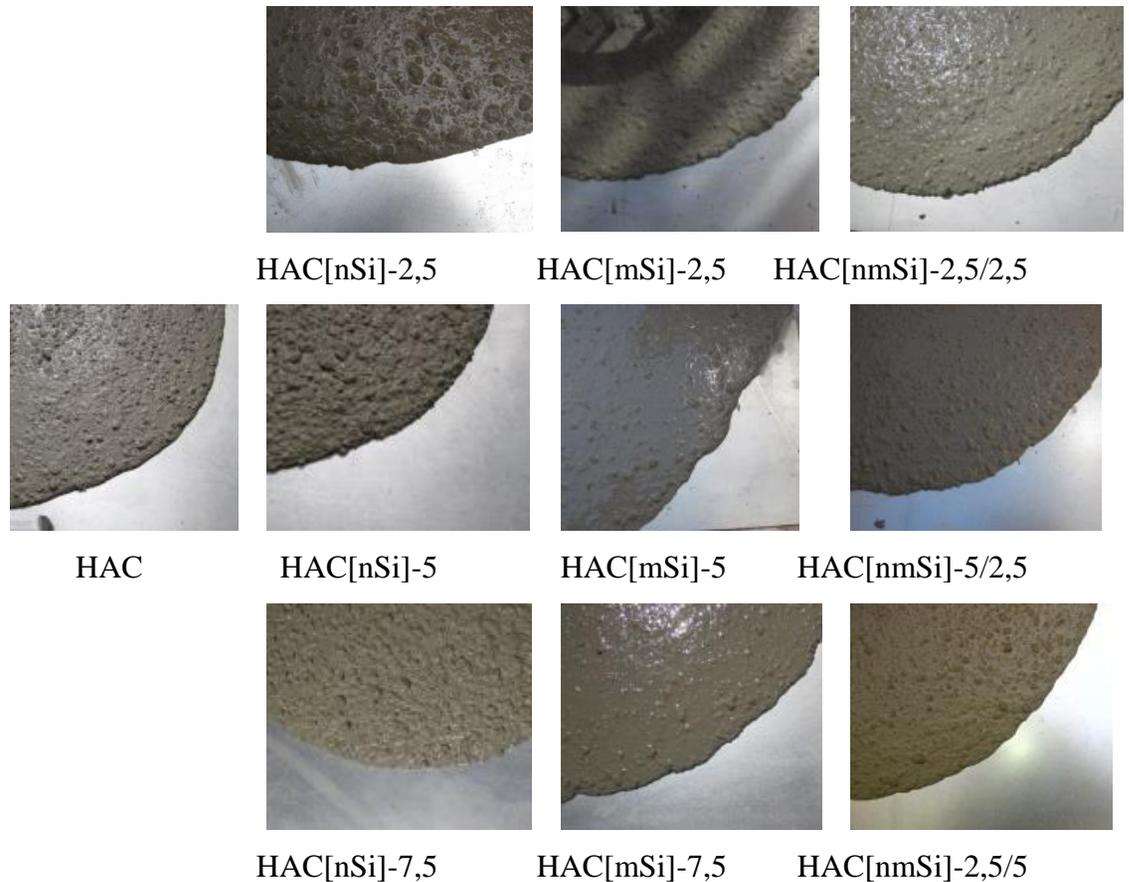


Figura 1. Aspecto del borde de las diferentes mezclas diseñadas, en estado fresco, después del ensayo de escurrimiento

Los valores obtenidos en los distintos ensayos para verificar la autocompactabilidad de las mezclas, de acuerdo a la EHE-08 (2010), se recogen en las Figuras 2, 3, 4 y 5. Estas presentan el diámetro de escurrimiento de las mezclas (d_f) y el SP usado para su fabricación (Figura 2), el tiempo T_v de paso por el embudo en V (Figura 3), la capacidad de paso por la caja en L (C_{bl}) (Figura 4) y el diámetro de escurrimiento con anillo japonés (d_{jf}) (Figura 5).

En la figura 2 y de forma general, se observa que el diámetro de escurrimiento se encuentra entre 550 mm y 850 mm, por lo que todas las mezclas cumplen con dicho parámetro. Además, no presentan segregación ni exudación, a pesar de tener elevadas cantidades de SP e incluso, para la mezcla [nSi]-7.5, superiores a lo permitido por la Instrucción Española del Hormigón Estructural (EHE-08) que es de un 5%. Estos resultados contradicen a Dubey y Kumar (2012) que afirman que con cantidades superiores al 2% de un SP de tipo carboxilato, similar al utilizado en este estudio, se observa segregación de la mezcla. Incluso hay autores (Borralleras, 2012) que defienden que la cantidad máxima de SP queda determinada cuando el aditivo deja de producir mejoras reológicas en el material en estado fresco.

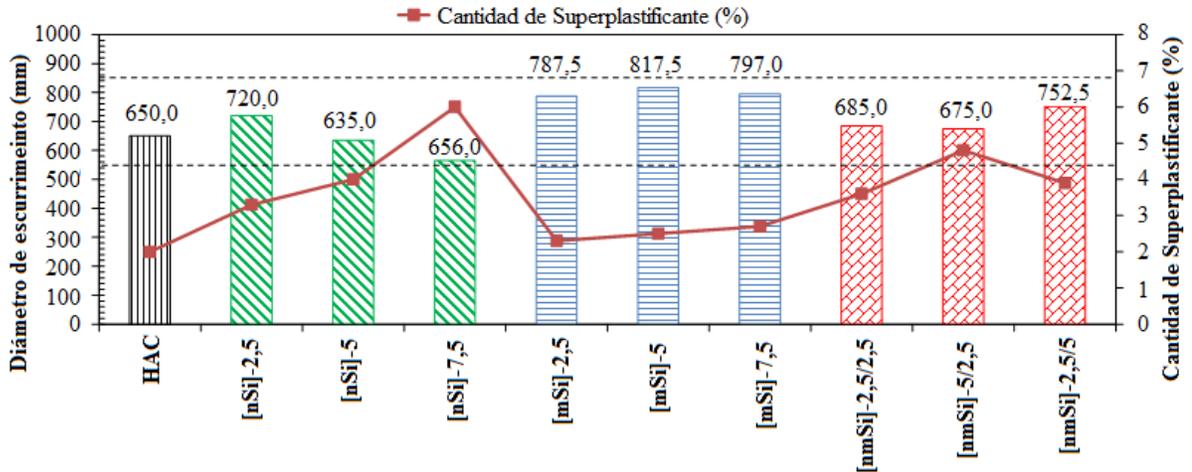


Figura 2. Diámetro de escurrimiento (d_f) (mm) y cantidad de superplastificante.

También se puede observar la existencia de una clara influencia del tipo de adición. Así, las mezclas con adición de nSi muestran una disminución del diámetro de escurrimiento a medida que aumenta dicha adición. Esto se traduce en una menor docilidad de la mezcla, aun cuando hay un incremento hasta el 6% en la cantidad de SP, superior al recomendado por la EHE. Este fenómeno no se produce cuando se utiliza mSi como adición. En este caso, existe muy poca variabilidad en el diámetro, que se encuentra alrededor de 800 mm. Por último, en las mezclas binarias, se observa como la nSi compromete la docilidad del material, siendo necesario aumentar la cantidad de SP al aumentar la cantidad de nSi que se incorpore. Jalal *et al.* (2012) afirman que tanto la nSi como la mSi mejoran la consistencia del hormigón autocompactante, pero no entran a valorar el aumento de dicha consistencia con respecto al contenido ni tipo de estas. Sin embargo, constatan que cantidades de nSi del 2% respecto al peso de cemento no varían sustancialmente el diámetro de escurrimiento y si lo hacen las mezclas con un 10% de mSi y 2% de nSi. Por otra parte, esta cantidad de aditivo produce un importante burbujeo que es directamente proporcional a la cantidad agregada (Nazari y Riahi, 2010). Estas burbujas pueden dar lugar a la formación de poros no interconectados en el material endurecido, que pueden comprometer las características resistentes de este hormigón por lo que se recomienda la utilización, junto con el policarboxilato, de un polietileno condensado que actúa como desespumante (Jalal *et al.*, 2012).

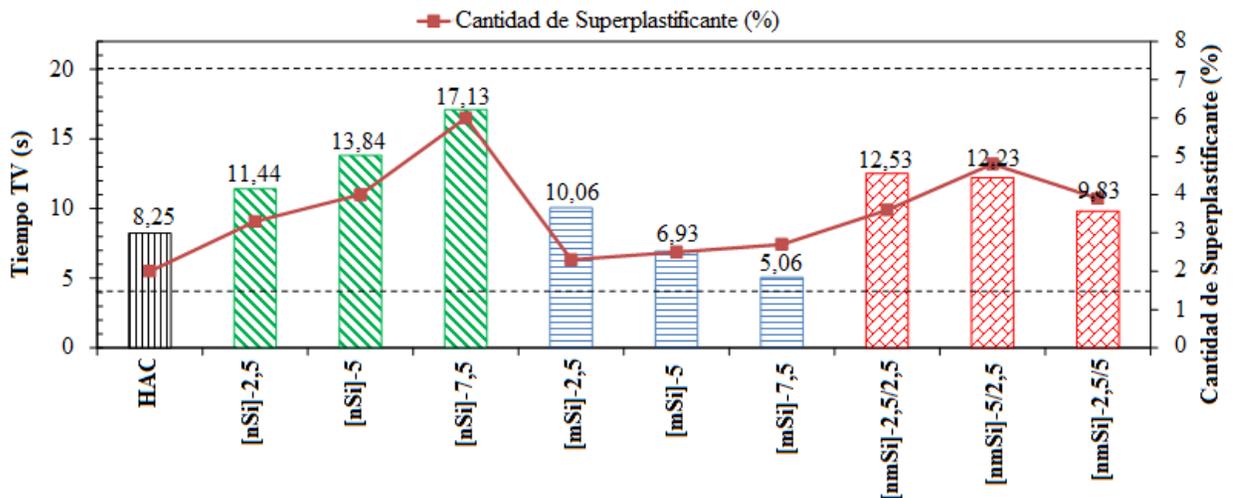


Figura 3. Tiempo (TV) de paso (s) por el embudo en V y cantidad de superplastificante.

En la figura 3 se muestra el tiempo TV de paso por el embudo en V. También para este parámetro se cumplen los requerimientos de la EHE-08 en cuanto a autocompactabilidad, ya que los valores se encuentran entre 4 s y 20 s.

En ella, se observa que el comportamiento de las mezclas es claramente diferente. Las que contienen solo nSi incrementan TV a medida que se incrementa el contenido en nSi, es decir, se densifican, mientras que en las mezclas con mSi, el efecto es contrario, reduciéndose TV hasta 5.06 segundos cuando el contenido de mSi es del 7.5% respecto a la cantidad de cemento. En ambos casos es necesario un incremento de SP, siendo muy superior la cantidad de éste en las dosificaciones con nSi. Por lo tanto, se puede afirmar que en las mezclas con nSi, con una cantidad similar de SP, se logran d_f similares, aunque la mezcla se hace cada vez más líquida, por la acción de la mayor cantidad de SP en ellas. Las mezclas binarias presentan un comportamiento poco concluyente, ya que a mayor contenido en nSi mayor exigencia en SP, aunque su TV es similar, siendo más viscosa la mezcla al aumentar la cantidad de mSi aunque la demanda de SP es menor. Estos resultados discrepan de los obtenidos por Jalal *et al.* (2012) quienes obtienen un tiempo de paso, por el embudo en V, mínimo de 4 s para la mezcla con 500 kg/m³ y un 2% de nSi y máximo (12 s) para la mezcla binaria 10% mSi+2% nSi y 400 kg/m³. Las diferencias en los contenidos de cemento podrían ser las responsables de estas notables diferencias en los resultados ya que un incremento en la cantidad de cemento mejora todas las propiedades reológicas debido a un incremento en el volumen de la pasta (Jalal *et al.*, 2012).

En la figura 4 se presentan la medida de la capacidad de paso C_{bl} encontrándose todos los hormigones con valores comprendidos entre los valores límite de 0.75 y 1. A pesar de ello, se vuelve a observar un comportamiento diferente según el tipo de adición. Así, la capacidad de paso para mezclas con nSi experimenta un decrecimiento al incrementarse la cantidad de nSi.

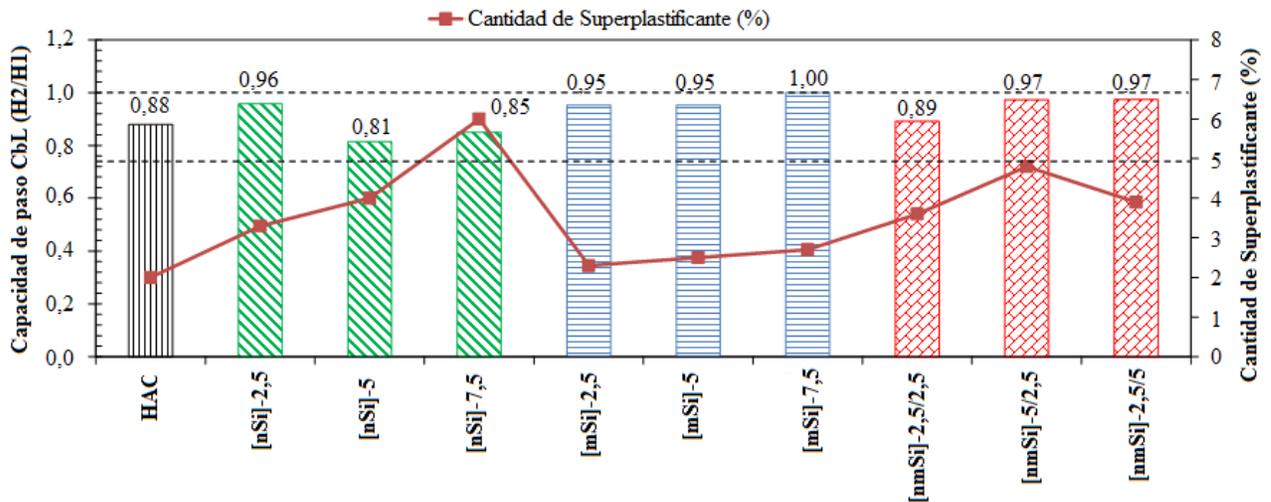


Figura 4. Capacidad de paso por la caja en L y cantidad de superplastificante.

Además, este parámetro proporciona información sobre la capacidad de autonivelación de los hormigones (EHE-08, 2010), siendo menos autonivelantes cuanto mayor es el contenido de nSi. Sin embargo, los valores permanecen prácticamente constantes tanto para las dosificaciones con mSi, como para las mezclas con adiciones binarias. Cabe destacar, la muy buena capacidad autonivelante del hormigón que contiene un total de 7.5% de mSi con un valor de la unidad. Este buen comportamiento pueda deberse a que esta mezcla es la que presenta la mínima velocidad de paso PV, es decir, es la mezcla más líquida de todas las estudiadas.

En la figura 5, se muestra el valor del diámetro de escurrimiento con anillo japonés (d_{jf}). La EHE-08 limita el valor de este parámetro en función del diámetro de escurrimiento (d_f) obtenido en la misma mezcla, teniéndose que cumplir que su diferencia sea inferior a 50 mm, que se cumple para la totalidad de las mezclas diseñadas.

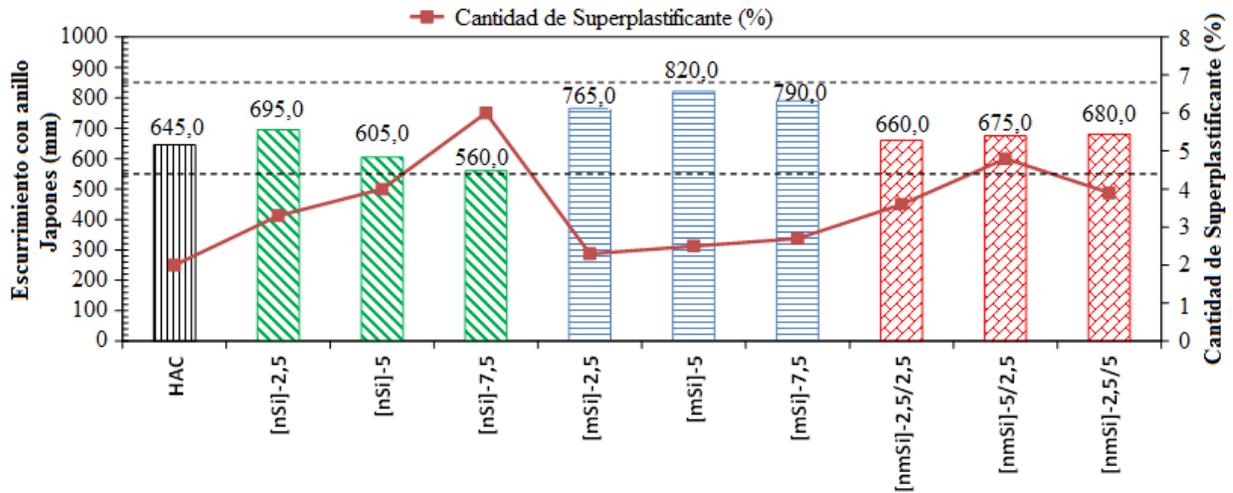


Figura 5. Diámetro de escurrimiento con anillo japonés (cm) y cantidad de superplastificante.

Al observar la figura 5 destaca que los hormigones con adición de nSi tienen un comportamiento similar a la del ensayo de escurrimiento (d_f), aunque con valores inferiores, puesto que con él se determina la dificultad que puede tener el hormigón al paso con obstáculos. Así, a medida que es mayor la cantidad de nSi menor es el valor de este parámetro. En hormigones con mSi se dan los valores más altos. En las mezclas con adiciones binarias los valores no presentan diferencias significativas entre sí, ni con el obtenido en [nSi]-2.5. Esto indica que es el contenido de nSi quien gobierna estas mezclas, teniendo que aumentar el contenido de SP, cuando aumenta en contenido en nSi. Una observación importante, en la fabricación de las mezclas, fue que los hormigones con adición de nSi obtuvieron un notable aumento en la velocidad de fraguado, donde sin importar la cantidad de SP añadida, el comienzo del fraguado se producía a los pocos minutos de la fabricación. Esto dificultaba la manipulación de la mezcla y, por tanto, su puesta en obra. Sin embargo, este fenómeno, puede ser una ventaja en la industria de los prefabricados, en las que un fraguado rápido puede ser beneficioso, debido a la posibilidad de desmoldar en tiempos más cortos. Este hecho coincide con lo estudiado por Bjornstrom *et al.* (2004) que afirma que la nSi es un activador de las reacciones puzolánicas.

3.2 Propiedades mecánicas

3.2.1. Resistencia a compresión

La resistencia a compresión de las distintas dosificaciones se presenta en la Figura 6. En esta, se observa que los hormigones con nSi tienen resistencias mayores a las obtenidas en el hormigón de referencia. Además, dicha resistencia aumenta a medida que aumenta la cantidad de adición.

En el caso de los hormigones con mSi, las resistencias a compresión son ligeramente mayores al hormigón de referencia, con incrementos notables a los 7 días y moderados para el resto de edades. Por último, y en el caso de las mezclas con adiciones binarias, no hay un comportamiento consistente que sugiera la preponderancia de uno de los tipos de adición. Sin embargo, las resistencias más altas se consiguen con la mezcla [nmSi]-2.5/2.5, por lo que los autores consideran que la resistencia a compresión no solo depende del tamaño de partícula y de la cantidad de adición sino también de la distribución granulométrica de todos los componentes de la mezcla. Por

lo que cuanto mayor continuidad en la granulometría de los componentes de la mezcla mayor será su compactación y, por lo tanto, mayor su capacidad resistente.

En estas mezclas, los valores de resistencia a compresión son de 82.17 MPa a los 28 días de curado y de 86.87 MPa a los 90 días. Esto supone un incremento de un 36% con respecto a los valores obtenidos por el hormigón de referencia a los tiempos de curado de 28 y 90 días respectivamente.

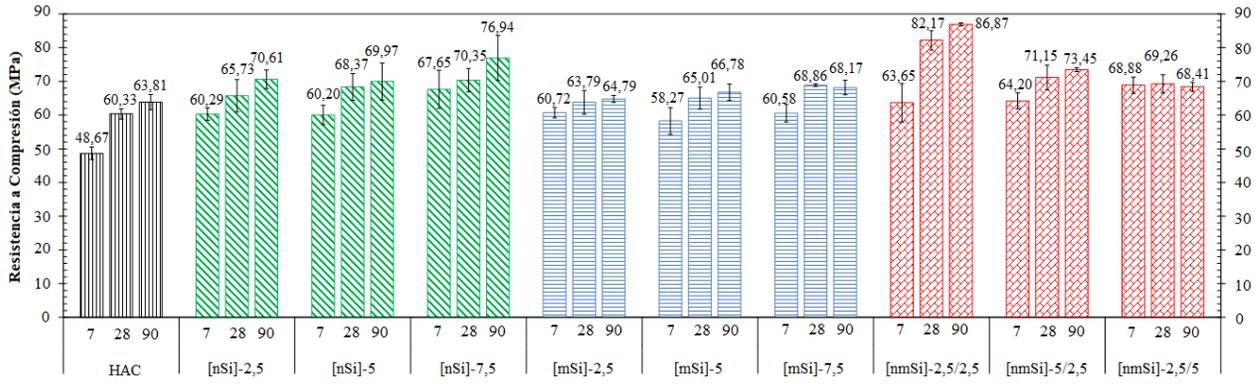


Figura 6. Resistencia a Compresión (MPa)

3.2.2. Resistencia a tracción indirecta y módulo de elasticidad

En las figuras 7 y 8 se presentan los resultados de resistencia a tracción indirecta y del módulo de elasticidad.

El valor de la tracción indirecta en hormigones con adiciones es significativamente mayor al valor del hormigón de referencia, a pesar de que estas sean diferencias pequeñas. Sin embargo, no existen diferencias significativas entre las mezclas con adiciones. Es decir, el tamaño y contenido de las distintas adiciones contenidas en las diferentes mezclas no cambian significativamente esta propiedad.

En cuanto al módulo de elasticidad se observan valores significativamente menores para las mezclas que contienen nSi. En el resto de los hormigones, los valores obtenidos son similares no siendo significativos entre ellos ni respecto al hormigón de referencia.

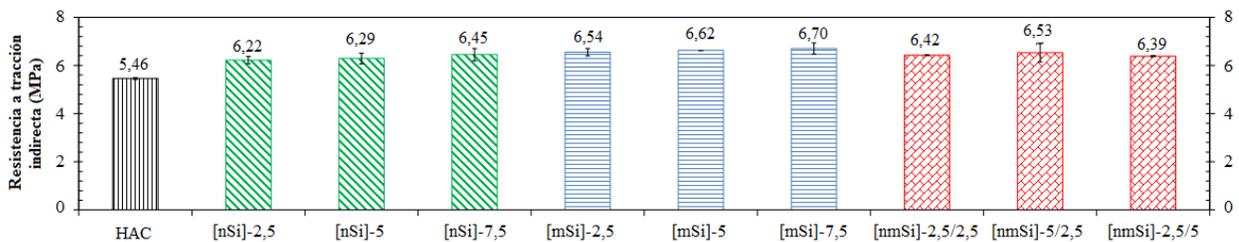


Figura 7. Resistencia a tracción indirecta (MPa)

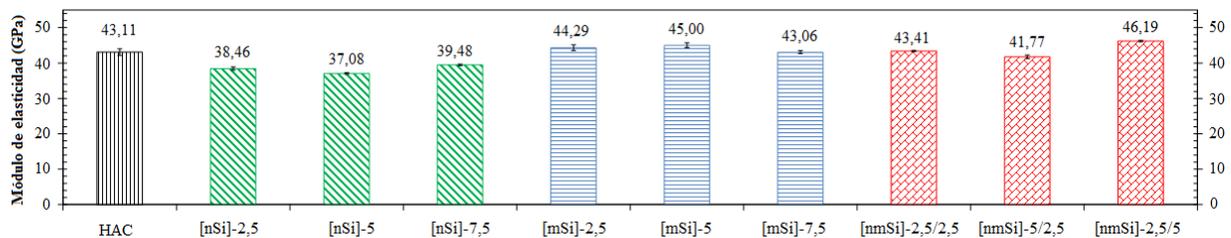


Figura 8. Módulo de elasticidad (GPa)

3.3 Caracterización microestructural. Análisis termogravimétrico

Los resultados del análisis termogravimétrico de las diez dosificaciones se muestran en las Figuras 9, 10 y 11 en la que se presentan la relación entre las pérdidas de agua de gel y de agua de portlandita libre a los 7, 28 y 90 días de curado, respectivamente.

En general, los valores obtenidos permiten afirmar que, a todas las edades, los mayores valores de dicha relación son los obtenidos en los hormigones con nSi. Esto pone de manifiesto que la formación de gel secundario o tobermorita es mayor lo que conlleva la menor presencia de portlandita.

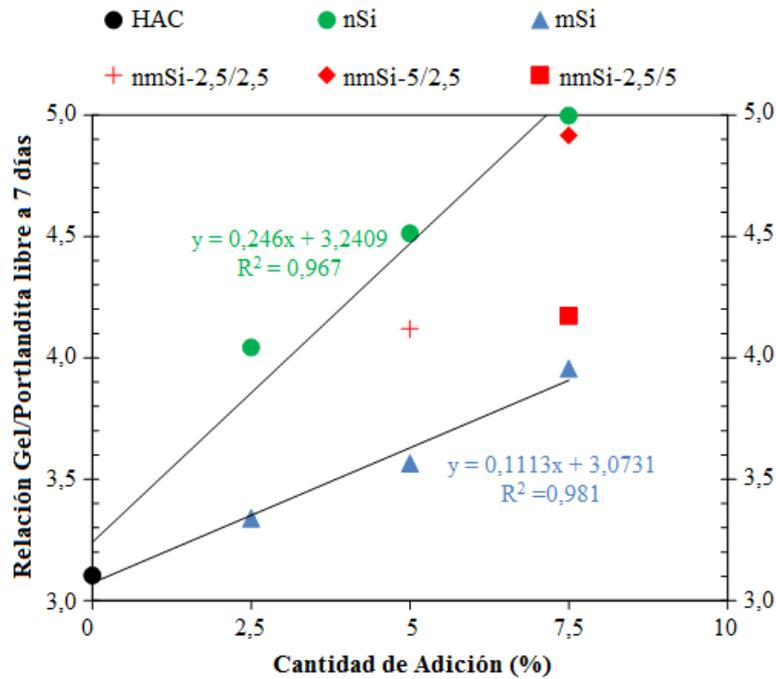


Figura 9. Relación gel/portlandita libre a 7 días de curado

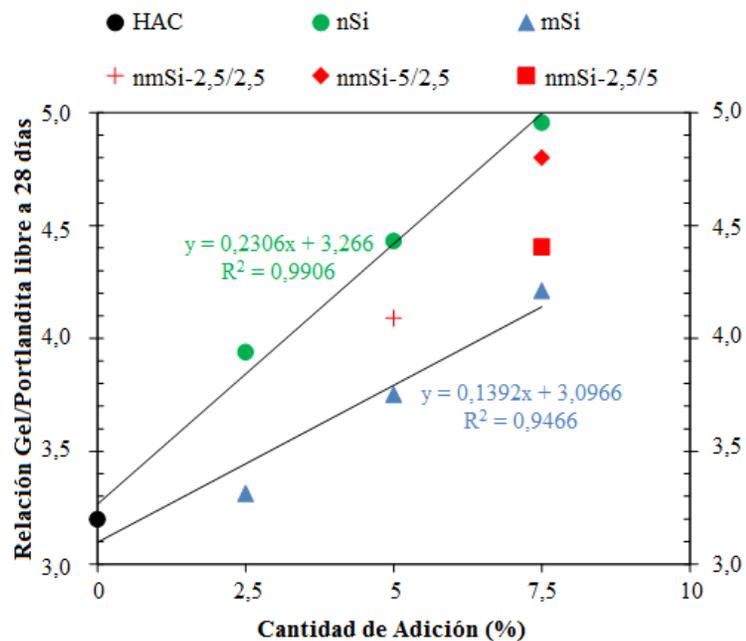


Figura 10. Relación gel/portlandita libre a 28 días de curado

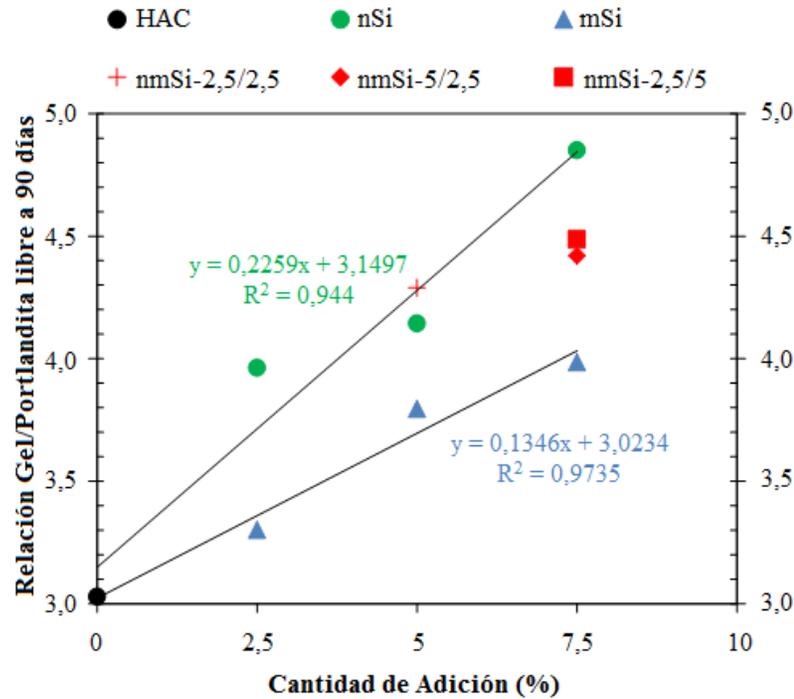


Figura 11. Relación gel/portlandita libre a 90 días de curado

Así mismo, en el caso de los hormigones con mSi, las relaciones presentan valores menores coincidiendo con lo obtenido por Mondal *et al.* (2010), Zyganitidis *et al.* (2011), Jalal *et al.* (2012) y León *et al.* (2014). En ambos casos, la relación aumenta cuando lo hace el contenido de la adición. Como anteriormente se indicó, los hormigones con combinación de adiciones no presentan un comportamiento concluyente. El comportamiento parece definido por el mayor contenido de cada una de las adiciones.

Por otra parte, es importante destacar que a medida que transcurre el tiempo de curado, las mezclas con nSi muestran un descenso en los valores de la relación gel/portlandita libre, fenómeno que se evidencia por la reducción en las pendientes de las rectas. Dicho fenómeno se puede observar, de forma progresiva en las Figura 9, 10 y 11. Esto sugiere que la formación de geles se ralentiza con la edad de curado, siendo en edades tempranas cuando mayor actividad puzolánica se observa (Jalal *et al.*, 2012). Esto es concordante con los valores de resistencia a compresión a los 7 días de curado. Sin embargo, en los hormigones con mSi, los valores de la relación gel/portlandita libre aumentan a medida que aumenta el tiempo de curado. Un menor tamaño de partícula acelera la activación de la reacción puzolánica

Al analizar los hormigones que contienen mezclas binarias destaca que en las primeras edades las mezclas mixtas se comportan de manera similar a como lo hacen las mezclas que contienen un porcentaje de adición similar a la suma de los dos, pero en cada caso próximas a la adición que aparece en mayor porcentaje. Cuando el porcentaje de ambas adiciones es el mismo el comportamiento es prácticamente intermedio. Al ser diferente la evolución en el tiempo de la micro y la nano adición, las mezclas que contienen ambas van igualando su comportamiento, resultando a los 90 días un comportamiento intermedio al que se obtiene para el mismo porcentaje de cada adición. La mezcla con el 2,5 de nano y micro sílice presenta un comportamiento diferencial a edades largas. En este caso su relación gel/ portlandita es superior a la que se obtiene utilizando un 5% de nano sílice. Este resultado es coherente con el comportamiento mecánico y durable de la mezcla. Este comportamiento podría indicar que en esta dosificación la relación entre la superficie de la adición y el agua libre ha resultado óptima.

4. CONCLUSIONES

La incorporación de nSi genera una pérdida de docilidad del material asociado a un aumento en la velocidad de fraguado. Fenómeno que dificulta su colocación “in situ”. La viscosidad y adaptación al molde se dificulta notablemente cuando se incorpora a la masa nSi. Los hormigones con un contenido del 7.5% en mSi o con mezclas binarias [nmSi]-5/2.5; [nmSi]-2.5/5 se pueden considerar hormigones con capacidad autoniveladora. Sin embargo, la adición de nSi como única adición, supone una pérdida de esta propiedad. La dificultad que puede tener el hormigón al paso con obstáculos aumenta a medida que es mayor la cantidad de nSi. Sin embargo, en hormigones con mSi o con adiciones binarias se puede considerar que esta propiedad es independiente del contenido de dichas adiciones, aunque hay que señalar que son las mezclas con mSi las que presentan mejor comportamiento.

La incorporación de nSi genera un aumento significativo en la resistencia a compresión respecto a los hormigones con mSi y respecto al de referencia. La mezcla [nmSi]-2.5/2.5 es la que presenta valores más altos, esto puede deberse a una distribución granulométrica más continua considerando todos los componentes que contiene el hormigón, de manera que hay una menor formación de huecos y por tanto, se obtiene un hormigón más compacto. La incorporación de nSi, mSi o mezclas binarias de ambas adiciones producen, en los hormigones diseñados, un ligero aumento en el valor de tracción indirecta. Los hormigones con solo nSi presentan una disminución en su módulo de elasticidad, lo que conlleva mezclas con menor ductilidad.

Los hormigones con nSi presentan los mayores valores en las relaciones entre la pérdida de agua de gel y de la portlandita a las primeras edades, lo que pone de manifiesto que la formación de gel secundario o tobermorita es mayor cuando se utilizan nano adiciones. Así mismo, en el caso de los hormigones con mSi, las relaciones presentan valores menores, resultado concordante con la menor resistencia que presentan. En mezclas binarias y con la misma cantidad total de adiciones y a largas edades, los valores de la relación se aproximan a los valores intermedios de las dos adiciones en la misma proporción. El comportamiento singularmente bueno de la mezcla [nmSi]-2.5/2.5 podría sugerir que existe una relación óptima de superficie/agua libre que mejoraría el comportamiento de cualquiera de las dos adiciones estudiadas individualmente.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del M^o de Economía y Competitividad (España), Proyecto de investigación MAT2013-48009-C04-04-P.

6. REFERENCIAS

Bjornstrom, J., Martinelli, A., Matic, A., Borjesson, L., Panas, I. (2004), “*Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silica-hydrate formation in cement*”, Chem Phys Lett 392 (1-3), 242-248.

Borralleras, P. (2012), “*Criterios de selección del aditivo superplastificante en HAC*”, 3^o Congreso Iberoamericano sobre hormigón autocompactante: Avances y oportunidades., 3-4 diciembre. Madrid. España.

Craeye, B., Van Itterbeeck, P., Desnerck, P., Boel, V., De Schutter, G. (2014), “*Modulus of elasticity and tensile strength of self-compacting concrete: Survey of experimental data and structural design codes*”, Cement and Concrete Composites 54, 53–61.

De la Peña R. Bernardo (2001), “*Hormigón Autocompactante*”, Revista BIT, pp. 7-12.

- Dubey, R., Kumar, P. (2012), “*Effect of superplasticizer dosages on compressive strength of self compacting concrete*”, International Journal of civil, structural, environmental and infrastructure engineering research and development vol. 2, (3), pp 98-105.
- EHE-08. (2010), “*Instrucción de Hormigón Estructural*”, Serie Normativa, Ministerio de Fomento. Secretaría General Técnica. 4ª Edición. Madrid. España.
- Jalal, M., Mansouri, E., Sharifipour, M., Pouladkhan, A. R. (2012), “*Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles*”, Materials and Design 34, 389–400
- Kawashima, S., Hou, P., Corr, D. J., Shah, S. P. (2013), “*Modification of cement-based materials with nanoparticles*”, Cement and Concrete Composites. 36, 8-15.
- León, N., Massana, J., Alonso, F., Moragues, A., Sánchez-Espinosa; E. (2014), “*Effect of nano-Si₂O and nano-Al₂O₃ on cement mortars for use in agriculture and livestock production*”, Biosystems engineering 123, 1-11.
- Mondal, P., Shah, S. P.; Marks, L. D.; Gaitero, J. J. (2010), “*Comparative Study of the Effects of Microsilica and Nanosilica in Concrete*”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n° 2141, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 6–9.
- Nazari, A., Riahi, S. (2010), “*Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self-compacting concrete containing SiO₂ nanoparticles*”, Materials Science and Engineering A 527.7663–7672.
- Okamura, H., Ozawa, K. (1996), “*Self-compactable high-performance concrete in Japan*”, ACI publicación especial SP159-02, pp. 31-44.
- Okamura, H. (1997), “*Self-compacting high-performance concrete*”, Concrete International, 19 (7), pp. 50-54.
- Okamura, H., Ouchi, M. (1999), “*Self-compacting concrete development, present and future*”, Proceedings of the First International RILEM Symposium, pp. 3-14.
- Okamura, H., Ozawa, K., Ouchi, M. (2000), “*Self compacting concrete*”, Structural Concrete, 1, pp. 3-17.
- Okamura, H., Maekawa, K., Mishima, T. (2005), “*Performance based design for self-compacting structural high-strength concrete*”, ACI publicación especial SP228-02, pp. 13- 33.
- Rong, Z., Sun, W., Xiao, H., Jiang, G. (2015), “*Effects of nano-SiO₂ particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites*”, Cement and Concrete Composites 56, 25–31.
- Said, A. M.; Zeidan, M. S.; Bassuoni, M. T., Tian, Y. (2012), “*Properties of concrete incorporating nano-silica*”, Construction and Building Materials 36. 838–844.
- Sánchez, F., Sobolev, K. (2010), “*Nanotechnology in concrete – A Review*”, Construction and Building Materials. 24 2060–2071.
- Yu, R., Spiesz, P., Brouwers, H. J. H. (2014), “*Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount*”, Construction and Building Materials 65,140–150.
- Zyganitidis; I.; Stefanidou, M.; Kalfagiannis; N.; Logothetidis S.; (2011), “*Nanomechanical characterization of cement-based pastes enriched with SiO₂ nanoparticles*”, Materials Science and Engineering B, 176, 1580-1584.



Comportamiento mecánico y químico de cementos de sulfoaluminato de calcio obtenido a partir de desechos industriales

M. Gallardo H.¹, J. M. Almanza R.¹, D. A. Cortés H.¹, J. C. Escobedo B.¹

¹ Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Av. Industria Metalúrgica 1062, Parque industrial Saltillo-Ramos Arizpe, Ramos Arizpe, Coah., México CP. 25900.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i1.112>

Artículo recibido el 29 de agosto de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 10 de Diciembre de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2016.

© 2016 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 6, No. 1, Enero – Abril 2016, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: [Revista ALCONPAT](http://RevistaALCONPAT).

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de última modificación: 30 de marzo de 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMEN

Se sintetizó un clínker de sulfoaluminato de calcio calcinando una mezcla de ceniza volante, fluoryeso, escoria de aluminio y carbonato de calcio a 1250 °C. El clínker fue mezclado con 15, 20 o 25 % e.p. de $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$. Las pastas se prepararon con relaciones agua/cemento de 0.5. Se evaluó la resistencia a la compresión de cementos curados en agua potable y en medios corrosivos a 40 °C. Los cementos curados en agua potable desarrollaron resistencias a la compresión de 38-39 MPa, los inmersos en medios corrosivos presentaron una disminución en esta propiedad después del ataque químico. La etringita fue el principal producto de hidratación. La degradación de los cementos por ataque químico es debida a una descalcificación y dealuminación de las pastas.

Palabras clave: sulfoaluminato de calcio; etringita; resistencia a la compresión; ataque químico.

ABSTRACT

A calcium sulfoaluminate clinker was synthesized calcining a mixture of fly ash, fluorogypsum, aluminum slag, and calcium carbonate at 1250 °C. The clinker was mixed with 15, 20, or 25% e.p. of $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$. The pastes were prepared with a water/cement ratio of 0.5. Compression resistance of cements cured in potable water and corrosive mediums at 40 °C was evaluated. The cements cured in potable water developed compressive strengths of 38-39 MPa; those immersed in corrosive mediums showed a decrease in this property after the chemical attack. Etringite was the main product of hydration. The degradation of the cements by chemical attack was due to a decalcification and dealumination of the pastes.

Keywords. calcium sulfoaluminate; ettringite; compressive strength; chemical attack.

RESUMO

Foi produzido um clínquer de sulfoaluminato de cálcio a partir da calcinação a 1250°C de uma mistura de cinza volante, escória de alumínio, carbonato de cálcio e gesso de flúor. Esse clínquer foi misturado com 15%, 20% e 25% e.p. de $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$. As pastas foram preparadas com relação água/cimento igual a 0,5. Foi avaliada a resistência à compressão das pastas curadas em água potável e em meios corrosivos a 40°C. As pastas curadas em água alcançaram resistências à compressão de 38-39 MPa, enquanto as pastas imersas em meios corrosivos apresentaram uma redução da resistência frente ao ataque químico. A etringita foi o principal produto da hidratação desses cimentos. A degradação dessas pastas de cimento por ataque químico ocorreu devido a uma descalcificação e dealuminização dos produtos hidratados.

Palabras-clave: sulfoaluminato de cálcio; etringita; resistência à compressão; ataque químico.

Autor de contacto: Marisol Gallardo Heredia (marisol.gallardo@uadec.edu.mx)

1. INTRODUCCIÓN

El cemento es un material que se emplea en la construcción de urbes y viviendas las cuales crecen en demanda a la par del crecimiento demográfico. El uso de concretos constituidos con materiales apropiados, convenientemente proporcionados y bien consolidados, aseguran la durabilidad de las construcciones. El material ligante que más se utiliza en la construcción es el cemento Portland, sin embargo en los procesos de su producción se consumen grandes cantidades de combustibles fósiles y, de forma paralela, en el proceso de descarbonatación de las materias primas se emiten grandes volúmenes de CO₂ a la atmósfera, contribuyendo con alrededor del 7 % de las emisiones mundiales de este gas (Roy et al., 1999; Gartner et al., 2004). Existe una variedad de materiales alternativos y viables (desechos industriales) para la sustitución del cemento Portland. El uso de éstos está basado en la importancia de minimizar las emisiones de CO₂, incrementándose el interés en la producción de materiales cementivos que desarrollen buenas propiedades mecánicas y buena estabilidad en ambientes corrosivos.

Una alternativa para sustituir total o parcialmente el uso del cemento Portland, es la manufactura del cemento de sulfoaluminato de calcio (SAC) que presenta una estructura cristalina que consiste de un arreglo tridimensional de tetraedros de AlO₄ entrelazados con iones Ca⁺² y SO₄⁻² localizados en los intersticios existentes (Sharp J.H. et al., 1999). Este tipo de cemento presenta una baja emisión de CO₂, formándose a una temperatura aproximada de 1250 °C, además de desarrollar buenas propiedades mecánicas (resistencia a la compresión) (Older, 2005; Zhou et al., 2006; Garcia-Maté et al., 2015; Hargis et al., 2014). Por otro lado, existe una gran cantidad de desechos tales como escorias, yesos y cenizas entre otros, que presentan en su composición química cantidades considerables de Al₂O₃, CaO, CaSO₄ entre otros, siendo estos los componentes principales para la producción de clinkers de SAC. Una ventaja muy importante derivada de la manufactura de éste clinker a partir de desechos industriales, es la disminución de la contaminación del aire, suelo y visual que éstos originan (almacenados al aire libre) y la disminución de emisiones de CO₂ al medio ambiente. Li et., al reportaron la síntesis de SAC utilizando ceniza de alta alúmina, bauxita y caliza como materiales de partida (Li et al., 2007) donde las principales fases de síntesis fueron SAC y silicato tricálcico (C₃S). Un sulfoaluminato-belita se sintetizó a 1150 °C, a partir de ceniza volante, polvos y lodos recolectados en procesos industriales. El clinker obtenido presentó como producto de síntesis fases como la gehlenita (formada por la descomposición de la belita a temperaturas mayores de 1100 °C) SAC y belita (Li et al., 2001). Durante la síntesis de SAC utilizando desechos industriales, se obtiene la formación de la gehlenita como producto secundario de síntesis, siendo esta fase la responsable de la disminución de formación de SAC (Arjunan et al., 1999). La síntesis de un sulfoaluminoférrico a través del uso de cal, yeso, lodo rojo y bauxita a 1250 °C, presentó fases como C₄(A₃F)₃ $\bar{5}$, C₄AF y C₂F. La densidad de éste aumentó con el incremento de la cantidad de lodo rojo, finalmente los productos de hidratación formados fueron etringita y C₃(AF)H₆ (Singh et al., 1997). El uso de desechos de plantas procesadoras de fertilizantes, bauxita y hierro mineral como materias primas para la síntesis de SAC a 1230 °C, generó fases como SAC, C₄AF, C₂AF, 2C₂S·C $\bar{5}$ y una pequeña cantidad de cal libre. Una mayor cantidad de hierro mineral incrementó la cantidad de C₄AF y disminuyó la cantidad de SAC (Singh et al., 2008). Se ha sintetizado de SAC a partir de una mezcla de la jarosita-alunita y un desecho de un proceso hidrometalúrgico (desarrollado para tratar económicamente menas de óxidos de níquel de bajo grado) a 1300 °C (Katsioti et al., 2005). En general, las pastas elaboradas con los clinkers obtenidos a partir de desechos o subproductos industriales mencionados presentaron buenas propiedades mecánicas. La etringita es el principal producto de hidratación en un cemento de SAC, donde ésta ocurre como un proceso natural de la combinación de este cemento, agua y sulfato de calcio (Mehta, 1967). La morfología característica

de la etringita se compone de cristales que exhiben prismas hexagonales o placas (Moore et al., 1968). La formación de la etringita en las primeras etapas de hidratación contribuye al desarrollo de las propiedades mecánicas. Sin embargo, el desarrollo o formación de esta fase en etapas tardías (formación de etringita tardía, FET) puede ser perjudicial. La FET en materiales cementivos endurecidos, genera microgrietas deteriorando las propiedades mecánicas debido a que es considerada expansiva. En muchos casos, la FET es atribuida a una excesiva cantidad de sulfatos presente en el cemento (Taylor, 2001; Gallardo M. et al., 2014). El desarrollo de propiedades físicas y químicas de nuevos materiales de construcción en ambientes similares a los que cotidianamente es expuesto el cemento Portland ha despertado un gran interés en el área de la investigación. Se han realizado estudios sobre la durabilidad o estabilidad química de diferentes tipos de cementos, cuya finalidad es el estudio del comportamiento de las reacciones que ocurren sobre éstos materiales de construcción variando las condiciones a la que cotidianamente se expone. Por ejemplo, investigaciones sobre el ataque químico en concretos Portland, puzolánicos y de escoria se llevaron a cabo simulando lluvia ácida con una solución de H_2SO_4 y HNO_3 con un pH de 3.5. Los resultados indicaron que el hidróxido de calcio es el compuesto en el que se inicia el ataque de las soluciones por lo tanto podría actuar como una barrera contra el ataque a los silicatos hidratados. Los concretos puzolanicos presentaron un mayor ataque que aquellos elaborados con escorias. Se incrementó la difusión a altas relaciones de agua/cemento debido a la alta permeabilidad (R. Sersele et al., 1997). Estudios realizados sobre la durabilidad química de un cemento API clase B (utilizado en pozos petroleros) para determinar los efectos resultantes por ataques de iones SO_4^{2-} , Mg^{+2} y Cl^- , fueron llevados a cabo utilizando como medio de curado soluciones acuosas de Na_2SO_4 , $NaCl$ y $MgCl_2$. Se detectó la formación de tobermorita, portlandita etringita y monocloroaluminato como resultado de la transformación de las fases anhidras del cemento. La portlandita incrementó en cantidad con el transcurso del tiempo. La interacción entre los iones SO_4^{2-} y el cemento generó yeso parcialmente soluble el que posteriormente reaccionó con C_3A facilitando la formación de etringita. Los iones Cl^- se fijaron químicamente en los aluminatos de calcio hidratados dando como resultado la formación de la sal de Friedel. Los iones Mg^{2+} propiciaron la descalcificación del cemento, a su vez reaccionaron con hidroxilos dando lugar a la formación de brucita (Martin J.J. et al., 2008). El estudio de la durabilidad química de un geopolímero elaborado con metacaolín, expuesto a solución de HCl durante 10 días con una concentración 0.5 N a 60 °C, dio como resultado una degradación de las pastas debido a la destrucción de la estructura geopolimérica y la liberación de Na, Al y Si hacia la solución ácida. Se evidenció un intercambio de especies iónicas entre H_3O^+ y Na^+ . El ataque químico fue más intenso en pastas con una mayor relación $SiO_2/Al_2O_3=3$ y $Na_2O/Al_2O_3=0.55$ con una pérdida de 33.1 % de su resistencia inicial. Pastas con una menor relación $SiO_2/Al_2O_3=2.6$ y $Na_2O/Al_2O_3=0.55$ solo perdieron el 2 % de su resistencia inicial. El mecanismo involucrado en el deterioro fue el intercambio iónico de la disociación del HCl en iones Cl^- y H_3O^+ donde iones Cl^- neutralizaron cargas con iones Na^+ dando lugar a un precipitado de $NaCl$ (Burciaga-Diaz O. et al., 2007). El objetivo de este trabajo, es la evaluación del desarrollo de la resistencia a la compresión y la estabilidad química de cementos de sulfoaluminato de calcio sintetizado a partir de una mezcla de ceniza volante, escoria de aluminio y fluoryeso a 1250 °C.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los materiales que se utilizaron fueron ceniza volante (cv), escoria de aluminio (ea) y fluoryeso (fy). Los dos últimos se sometieron a un proceso de molienda hasta obtener un tamaño de partícula menor de 106 μm (#140 ASTM mesh). Posteriormente se analizó la composición química de cada material mediante fluorescencia de rayos X (FRX) cuyos resultados se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Composición química en óxidos de las materias primas.

Óxidos	Escoria de aluminio ea (e.p. %)	Ceniza Volante cv (e.p.%)	Fluor-yeso fy (e.p.%)
Na ₂ O	2.496	-	-
MgO	5.000	1.377	-
Al ₂ O ₃	63.19	24.81	-
SiO ₂	11.69	59.49	0.103
SO ₃	0.833	-	56.33
Cl ₂	4.636	-	-
K ₂ O	2.203	1.716	-
CaO	7.263	4.806	43.24
TiO ₂	0.983	1.663	-
MnO	0.503	-	-
Fe ₂ O ₃	1.203	6.126	-

Basado en la composición química se mezclaron los desechos en la proporción requerida para la obtención de SAC de acuerdo con la siguiente reacción: $ea + cv + fy + CaCO_3 = SAC$ (80 % e.p.) + Ca_2SiO_4 (20 % e.p.). Las proporciones de cada material de partida fueron ajustadas con $CaCO_3$ (97% pureza). Los materiales de partida se homogenizaron en contenedores de plástico con acetona y bolas de alúmina durante 4 horas, posteriormente se secaron a 80 °C por 12 horas. Se conformaron pastillas de 2 cm de diámetro por prensado uniaxial a 45 MPa, las cuales fueron sometidas a tratamiento térmico a 1250 °C, durante 4 horas. Se corroboró la formación del SAC mediante difracción de rayos X. El clínker obtenido se sometió a molienda hasta obtener un área superficial específica aproximada de 3800 cm²/g (ASTM C-204), posteriormente fue mezclado con 15, 20 o 25 % e.p. de sulfato de calcio ($CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$) para preparar el cemento de SAC. Las pastas se prepararon con una relación agua/cemento de 0.5 de acuerdo al procedimiento indicado en la norma mexicana NMX-C-085-ONNCCE-2002 (NMX-C-085). La nomenclatura de los sistemas fue la siguiente: 515, 520 y 525 donde el primer dígito indica la relación agua/cemento y los últimos dos el contenido de sulfato de calcio. Las mezclas se vaciaron en moldes de Nyalcero y se vibraron durante 60 s para eliminar porosidad. Los moldes ya llenos se cubrieron con plástico y fueron colocados en cámaras isotérmicas a 40 °C durante 24 horas. Posteriormente se desmoldaron los cubos y se colocaron en contenedores con agua (agua potable) para iniciar el curado en húmedo a la temperatura antes mencionada durante 1, 3, 7, 14 o 28 días, después de cada periodo de curado se evaluó la resistencia a la compresión. Para efectos de comparación, se elaboraron muestras de cemento Portland Ordinario (CPO comercial) como blancos de referencia. Éstas se elaboraron y curaron bajo las mismas condiciones que las preparadas a base de cementos de SAC.

Para las pruebas de durabilidad química, se curaron muestras durante 7 días en agua potable y posteriormente fueron sumergidas en medios corrosivos durante 14, 28 o 42 días para la evaluación de la resistencia química, mediante la medición de su resistencia a la compresión. Las muestras fueron sumergidas en 2 litros de solución (elaborada con agua desionizada) de H₂SO₄ 0.5N, MgCl₂ 0.6 N y Na₂SO₄ 0.04 N a 40 °C para simular condiciones agresivas. Las mediciones de resistencia a la compresión se realizaron en una prensa hidráulica automatizada (Controls modelo 50-C7024) con una capacidad de 250 kN, utilizando una velocidad de carga de 350 N/s. Los ensayos se realizaron conforme al procedimiento que describe la norma ASTM C109/C109-M95 (ASTM-C109). Para identificar las fases presentes, resultantes de las reacciones de hidratación y del ataque químico, se analizaron muestras con 28 (agua potable) y 42 (medio

corrosivo) días de inmersión, mediante difracción de rayos X (DRX). Se seleccionaron fragmentos, preferentemente de la superficie de cada uno de los cubos ensayados en ataque químico, y fueron sumergidos en metanol, secados durante 48 horas en una estufa a 40 °C. Mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) se analizaron muestras antes y después del ataque químico.

3. RESULTADOS

En la Figura 1 se presenta el patrón de difracción del clinker sintetizado a una temperatura de 1250 °C. Se observaron principalmente las reflexiones correspondientes al SAC. Se formaron fases secundarias como la gehlenita ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{SiO}_7$), aluminato de calcio (CaAl_2O_4), mayenita ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$) y preocroita ($\text{Ca}_{20}\text{Al}_{26}\text{Mg}_3\text{Si}_3\text{O}_{68}$). La belita (Ca_2SiO_4) se obtuvo en un porcentaje menor al que se pretendía debido a la estabilidad termodinámica de fases secundarias que se formaron a 1250 °C. Por otro lado, la gehlenita y espinela se consideran fases no cementantes por su poca o nula reactividad en presencia de agua, pero éstas pueden actuar como fases de refuerzo.

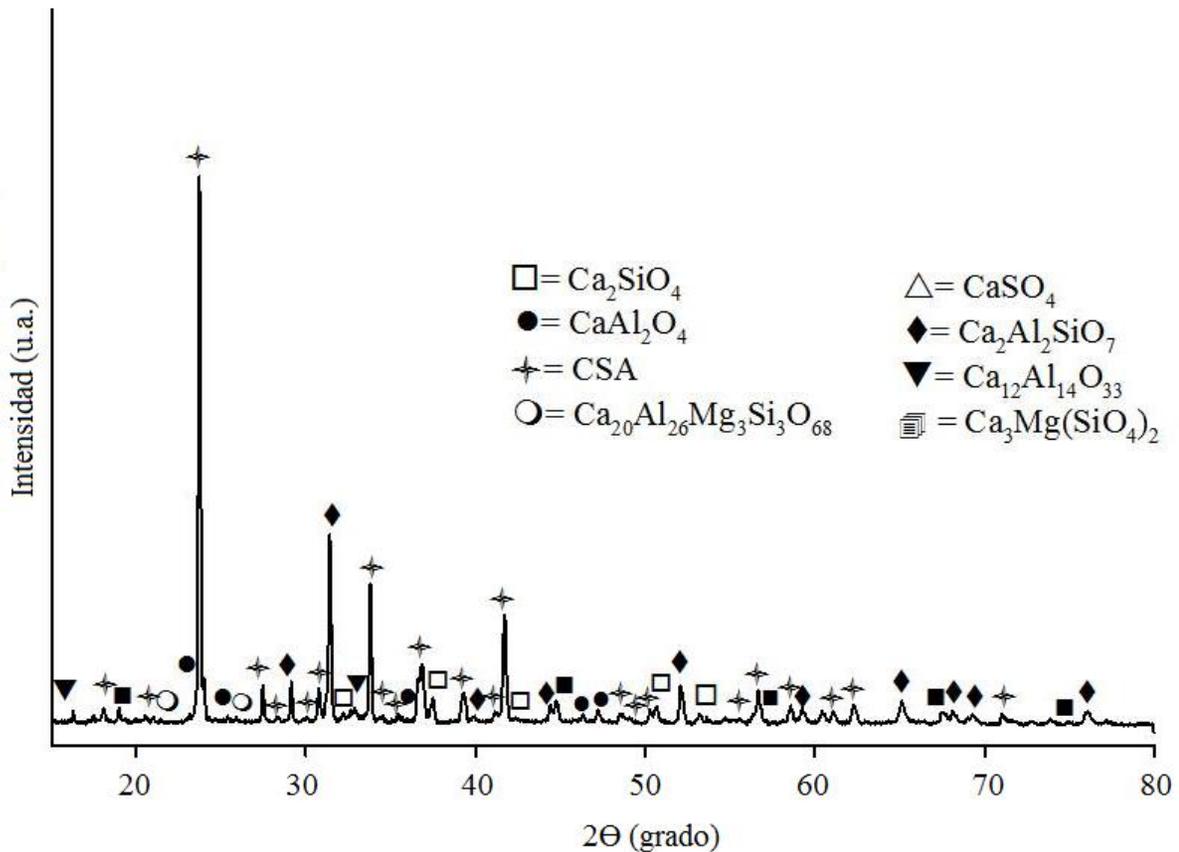


Figura 1. Patrón de DRX del sintetizado a 1250 °C.

En la Figura 2 se presentan los resultados de resistencia a la compresión de los sistemas 515, 520 y 525 curados de 1 a 28 días a 40 °C. En el sistema 515 se observó un paulatino desarrollo de resistencia a la compresión del primer y hasta los 14 días; a los 28 días disminuyó la resistencia a la compresión, propiciado por la formación de etringita tardía. El sistema 520 presentó una disminución en la resistencia a la compresión a los 7 días con un ligero incremento de ésta a los 14 y 28; sin embargo se desarrolló una baja resistencia finalizando con 24.25 MPa. En el sistema 525 se observó un incremento de la resistencia a la compresión en función del tiempo (de 1 a 14 días), a

tiempos posteriores se mantuvo la misma resistencia con 38.9 MPa a los 28 días. Posiblemente la etringita se formó casi en su totalidad en los primeros días de curado, y el posterior aumento se debió al crecimiento de esta fase dentro de poros y zonas débiles (microgrietas). La presencia de un remanente de yeso y de SAC en días posteriores al inicio del curado indican que las reacciones de hidratación continuaran conforme pase el tiempo. Este sistema presentó los mejores valores de resistencia a la compresión. Con base a lo anterior, una mayor cantidad de yeso incrementa la resistencia mecánica debido a la formación de la mayor cantidad etringita desde los primeros días de curado. Los resultados de resistencia a la compresión obtenidos se encontraron dentro del valor establecido en la norma NMX-C-061-ONNCCE-2001 (20-40 MPa a los 28 días de curado). El valor obtenido experimentalmente para el cemento de CPO fue de 38 MPa.

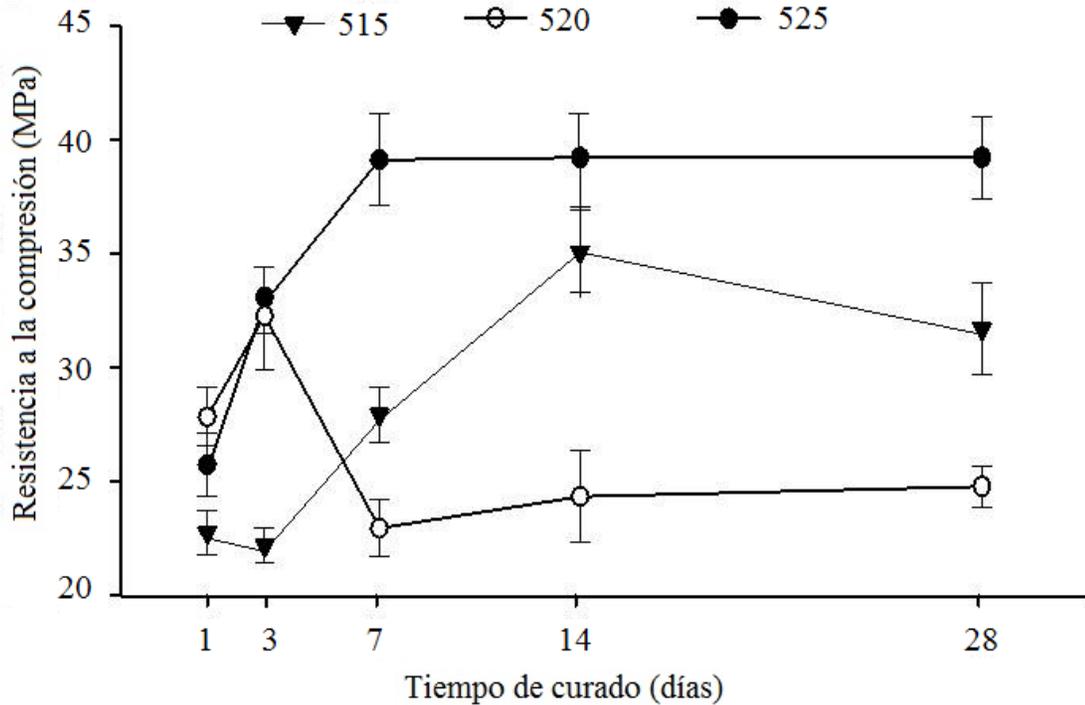


Figura 2. Resistencia a la compresión de los sistemas 515, 520 y 525 curados a 40 °C.

En las Figuras 3 y 4 se presentan los patrones de DRX de los sistemas 515 y 525 curados durante 1, 14 y 28 días a 40 °C. En el sistema 515 (Figura 3) al primer día se observaron reflexiones correspondientes a la etringita y éstas se incrementaron en intensidad a los 14 y 28 días de curado. En el sistema 525 (Figura 4), al primer día se observaron las reflexiones correspondientes al SAC y al yeso, éstas últimas se observaron hasta los 14 días. Las reflexiones correspondientes a la etringita fueron visibles al un día de curado e incrementaron su intensidad a los 14 y 28 días. El gradual aumento en la intensidad de las reflexiones de los productos de hidratación indicó la formación de etringita tardía. Ésta no fue suficiente para afectar las propiedades mecánicas ya que posiblemente el incremento de esta fase se llevó a cabo dentro de los poros presentes. Para ambos sistemas se observaron reflexiones correspondientes a la espinela y a la gehlenita sin cambios aparentes en la intensidad de reflexiones en función del tiempo de curado debido a que estas dos fases son inertes frente al agua.

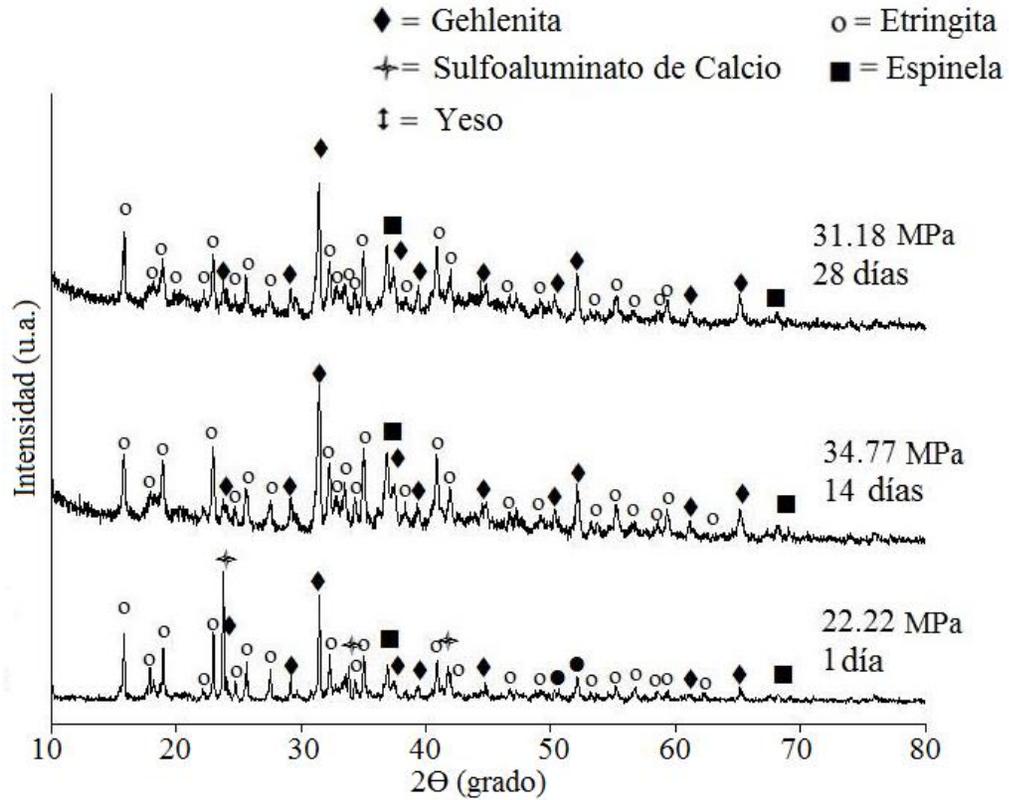


Figura 3. Patrones de DRX del sistema 515 curado durante 1, 14 y 28 días a 40 °C.

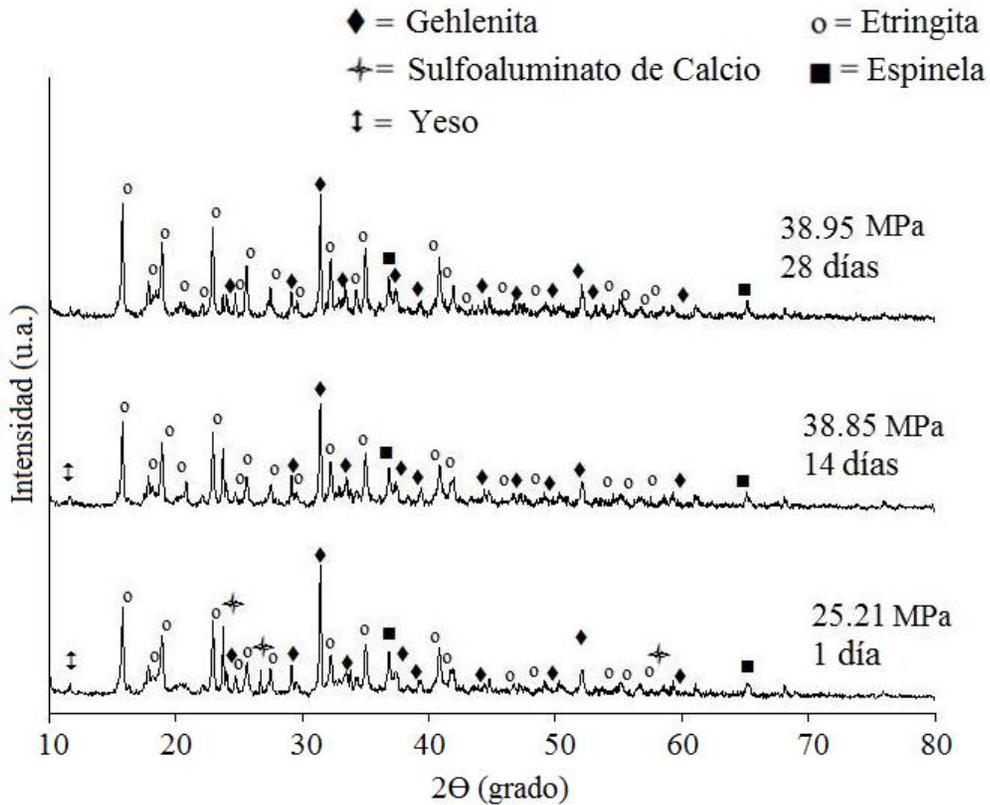


Figura 4. Patrones de DRX del sistema 525 curado durante 1, 14 y 28 días a 40 °C

En la Figura 5 se presentan las micrografías de superficies de fractura de los sistemas 515 y 525 curados a 1, 14 y 28 días a 40 °C. En el sistema 515 al primer día se exhibe una microestructura densificada con la presencia de algunas grietas distribuidas en la matriz. A los 14 días se observó una microestructura con una matriz más densificada y compacta donde las grietas disminuyen en cantidad explicando el incremento en la resistencia a la compresión que se presentó en este tiempo de curado. A los 28 días de curado se observaron algunas zonas débiles generadas por el crecimiento de hidratos dando lugar a una disminución de la resistencia a la compresión del material.

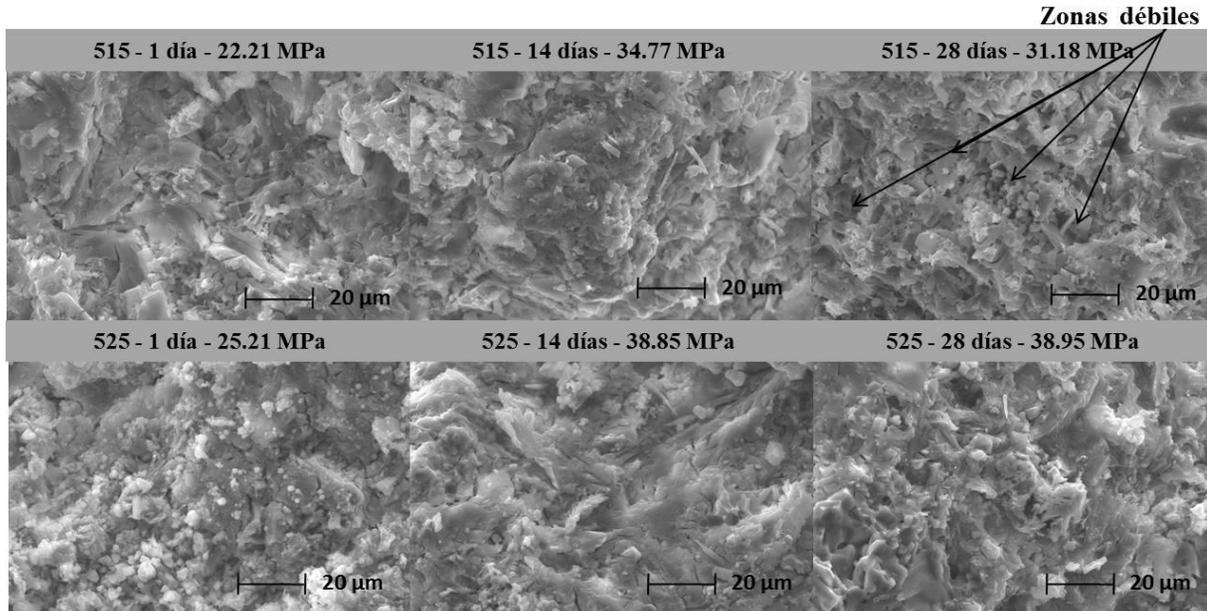


Figura 5. Micrografías de superficie de fractura de muestras de los sistemas 515 y 525 curadas a 1, 14 y 28 días a 40 °C

En las microestructuras de superficie del sistema 525 al día 1 se observaron nódulos blancos inmersos en una matriz de etringita densa. Estos nódulos blancos se asocian a la formación de yeso. A los 14 días de curado, se presentó una mayor densificación de la matriz siendo similar a la microestructura que se observó a los 28 días, corroborando la similitud en las propiedades mecánicas a los 14 y 28 días de curado. El sistema 525 desarrolló las mejores resistencias a la compresión, mostrando mejor estabilidad en función del tiempo al no presentar bajas en la resistencia. Por lo anterior se evaluó la estabilidad de este sistema inmerso en soluciones agresivas. Muestras de este cemento fueron previamente curadas durante 7 días en agua potable (38.95) y posteriormente inmersas en soluciones corrosivas.

En la Figura 6 se presentan los resultados de resistencia a la compresión que obtuvieron muestras después de estar inmersas en medios corrosivos durante 7, 14, 28 y 42 días a 40 °C. Las muestras inmersas en una solución de NaSO_4 0.04 N desarrollaron la mayor resistencia a la compresión a los 42 días de curado (34.63 MPa). Las muestras inmersas en soluciones de H_2SO_4 y MgCl_2 desarrollaron resistencia a la compresión a los 42 días similares con 28.10 y 29.2 MPa respectivamente. Se observó una disminución de resistencia a la compresión de 28.6 % y de 25.83 % en muestras inmersas en la solución de H_2SO_4 y MgCl_2 respectivamente. Estas variaciones pueden ser atribuidas a la interacción de las muestras con los iones Cl^- , Mg^{+2} , SO_4^{-2} y Na^+ presentes en las soluciones corrosivas. Las muestras inmersas en agua potable no presentaron disminución en la resistencia a la compresión en ningún tiempo de curado (1-28 días).

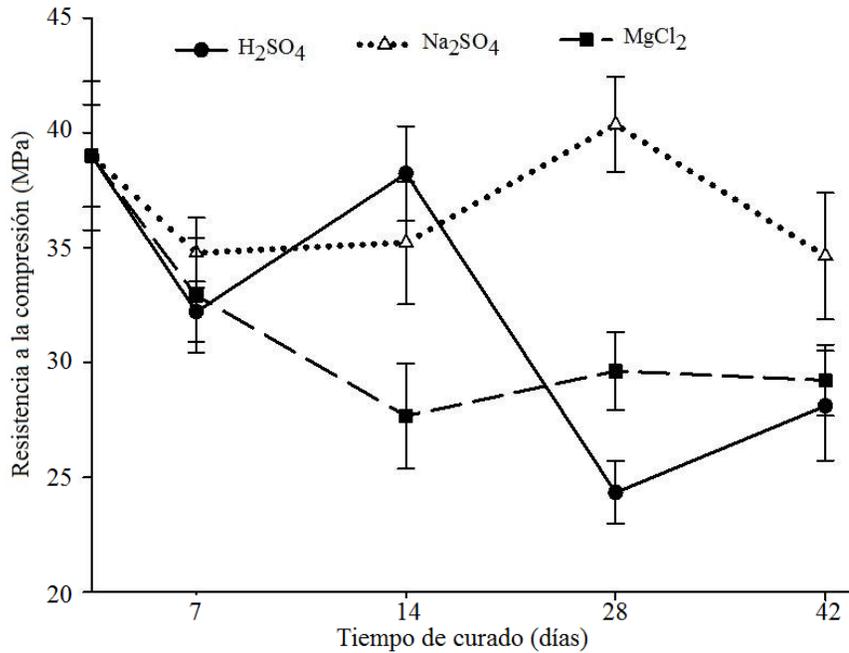


Figura 6. Resistencia a la compresión del sistema 525 curado en soluciones agresivas a 40 °C.

Los resultados obtenidos de la caracterización por DRX de las muestras inmersas en soluciones agresivas a 42 días de curado se presentan en la Figura 7. Se observaron reflexiones de alta intensidad correspondientes al yeso en muestras inmersas en una solución de H₂SO₄, indicando una degradación de la etringita, causada por la difusión de iones SO₄⁻² dentro de la microestructura, originando una disolución del material. Para muestras inmersas en MgCl₂ y Na₂SO₄ se presentó un patrón similar al descrito anteriormente, a excepción de que las reflexiones correspondientes al yeso se presentaron en baja intensidad indicando un ataque moderado al material.

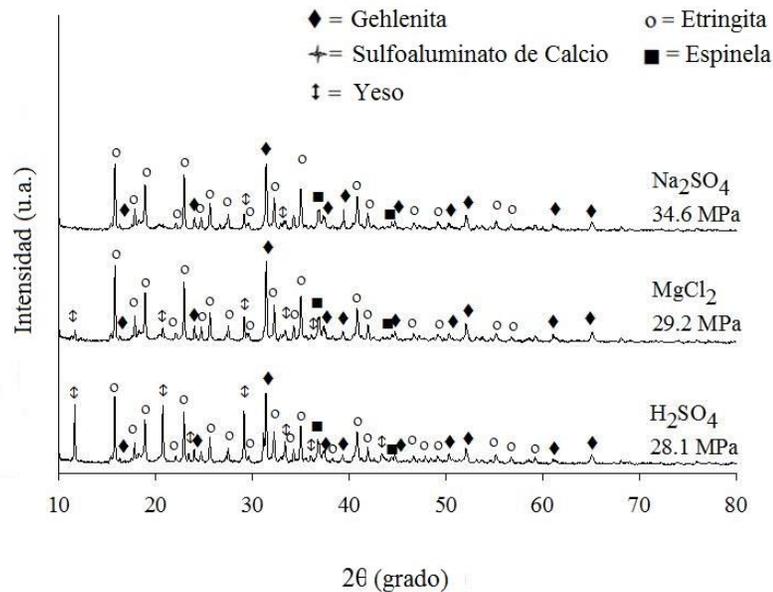


Figura 7. Patrones de DRX del sistema 525 inmerso en soluciones agresivas durante 42 días a 40 °C.

Algunos daños se reflejaron durante un análisis visual, donde se observó un ablandamiento de la superficie siendo mayor en las muestras inmersas en la solución ácida indicando una mayor agresividad por parte de esta solución.

En la Figura 8 se presenta una micrografía correspondiente a una muestra inmersa en la solución de H_2SO_4 0.5N a 40 °C. Se observó la región de ataque químico desde la superficie con una profundidad de aproximadamente 129 μm notándose visualmente una tonalidad más gris que el resto de la muestra. El análisis por EDS indicó una migración de iones Al^{+3} provocada por el ataque de la solución ácida. Se formó una grieta de 22 μm de espesor originada por un cambio en el volumen, causada por la migración de iones calcio y sulfatos hacia el exterior, incrementando el ataque ya que las nuevas superficies estuvieron expuestas a la solución corrosiva. Bajo la grieta se observó una matriz densa y compacta sugiriendo que es una zona donde el medio corrosivo no penetró.

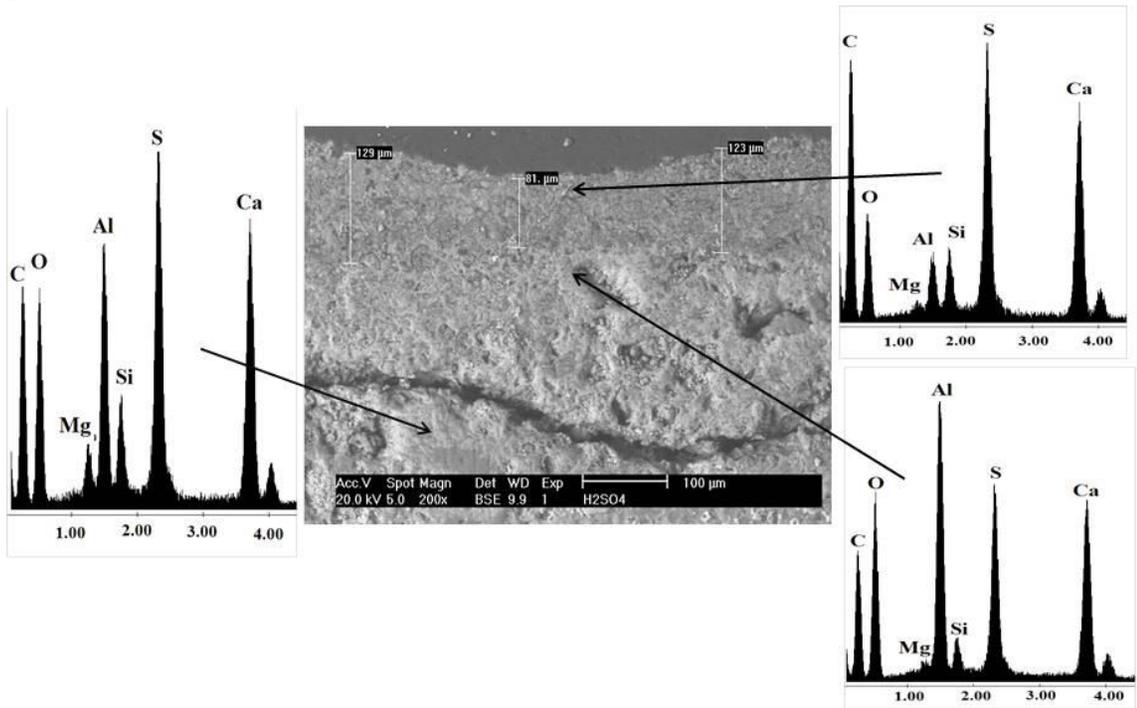


Figura 8. Micrografía del cemento después de 42 días de inmersión en una solución de H_2SO_4 0.5 N.

En la Figura 9 se presenta la microestructura de una muestra inmersa en la solución de $MgCl_2$ 0.6N durante 42 días a 40 °C. La profundidad de ataque químico fue de aproximadamente 380 μm siendo mayor a la observada en el cemento atacado con una solución de H_2SO_4 . Se observó la formación de una grieta a nivel de superficie de aproximadamente 1.16-1.25 μm . En el área superior a la grieta se observó una interfaz de alto contenido de Mg, por una lenta difusión de iones Mg^{+2} en la muestra. Indicando un intercambio iónico con iones calcio. El área no corroída presentó una microestructura compacta.

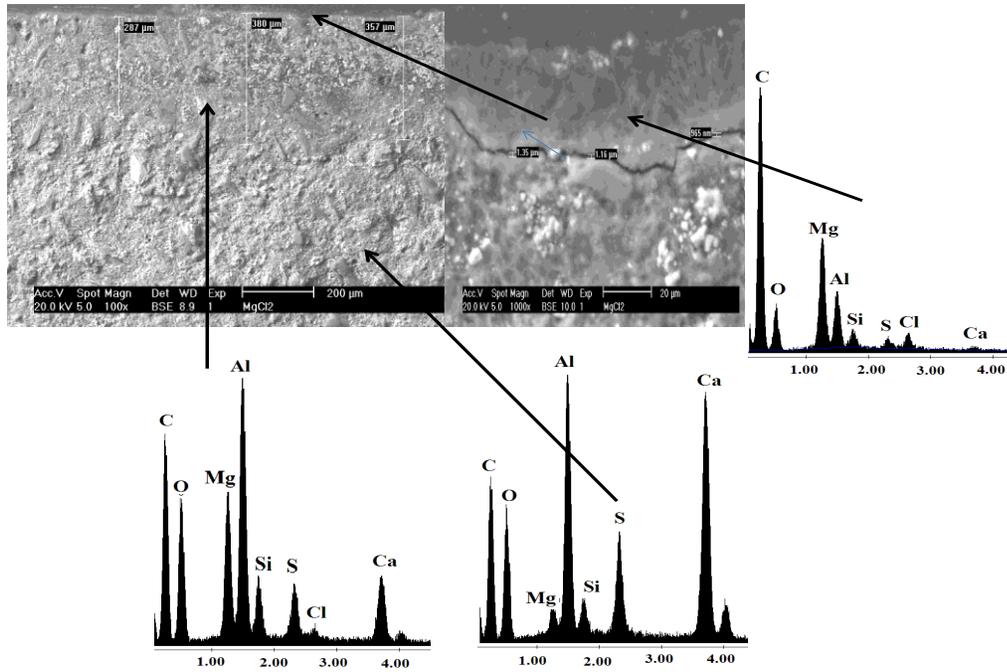


Figura 9. Micrografía del cemento después de 42 días de inmersión en una solución de $MgCl_2$ 0.6 N.

En la Figura 10 se presenta la microestructura de una muestra inmersa en la solución de Na_2SO_4 0.04 N durante 42 días a 40 °C. Se observó una profundidad de ataque de 46.7 μm con una apariencia granular, estos nódulos posiblemente son de yeso, producto de una descalcificación del material. Se observaron partículas de alúmina adentradas en la matriz, indicando una migración hacia el exterior de iones calcio y sulfatos. El cemento inmerso en esta solución presentó una mayor resistencia al ataque y su resistencia a la compresión fue 34.63 MPa a los 42 días de inmersión, esto posiblemente a que los iones Na^+ desplazaron a los iones Ca^{+2} y formaron parte de la red cristalina.

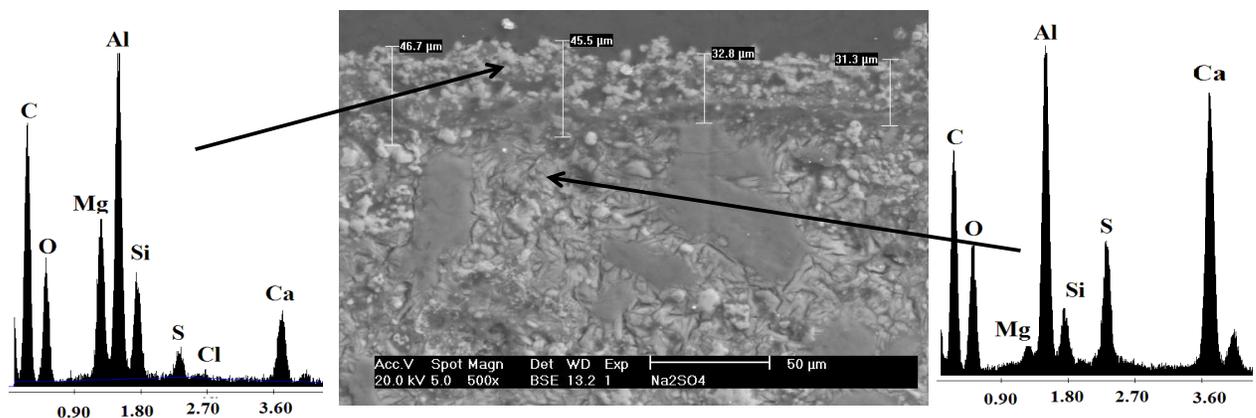


Figura 10. Micrografía del cemento después de 42 días de inmersión en una solución de Na_2SO_4 0.6 N.

4. CONCLUSIONES

Se obtuvo un clinker de sulfoaluminato de calcio a partir de la síntesis de una mezcla de escoria de aluminio, ceniza volante y fluoryeso. El clinker presentó en su composición fases como sulfoaluminato de calcio, gehlenita, aluminato de calcio, mayenita y belita.

Los cementos elaborados con sulfoaluminato de calcio sintetizado a partir de desechos industriales desarrollaron resistencias a la compresión de 38.95 MPa, siendo éstas similares a las desarrolladas por pastas de Portland ordinario curadas bajo las mismas condiciones.

Las pastas inmersas en una solución de (Na_2SO_4) presentaron una alta resistencia al ataque por sulfatos, desarrollando una resistencia a la compresión de 34.63 MPa después de 42 días de inmersión.

La degradación de pastas por el ataque de H_2SO_4 y MgCl_2 ocurre por procesos de dealuminación y descalcificación. Las muestras inmersas en H_2SO_4 y MgCl_2 desarrollaron una resistencia de 28.10 y 29.2 MPa, respectivamente después de 42 días de curado.

5. REFERENCIAS

Arjunan, P., Silsbee, M. R., Roy, D. M. (1999) *Sulfoaluminato-belite cement from low-calcium fly ash and sulfur-rich and other industrial by-products*. Cement and Concrete Research, Vol. 29: pp. 1305-1311.

ASTM C109/C109-M95, (1995), *Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens)*, Vol 04.01 Cement, Lime, gypsum.

ASTM C-204, (1995), *Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus, Annual*, Book of ASTM Standards. Section 4. Construction. Volume 04.01. Cement, Lime, Gypsum.

Burciaga-Diaz, O., Escalante-García J. I. (2012) "*Strength and durability in acid media of alkali silicate activated metakaolin geopolymers*", Journal of the American Ceramic Society, Vol 97, 7: pp.2307-2313

Gallardo M., Almanza J. M., Cortés D. A., Escobedo J. C., Escalante-García J. I. (2014) "*Synthesis and mechanical properties of a calcium sulfoaluminato cement made of industrial wastes*", Materiales de Construcción, Vol 64, 315, e023: pp. 1-8.

García-Maté M., De la Torre A., Leon-Reina L., Losilla E., Aranda M. A. G., Santacruz I. (2015), "*Effect of calcium sulfate source on the hydration of calcium sulfoaluminato eco-cement*", Cement and Concrete Composites, Vol 55: pp.53-61.

Gartner, E. (2004), "*Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements*", Cement and Concrete Research, Vol. 34, 9: pp. 1489–1498.

Hargis C. W., Telesca A., Monteiro P. J. M., "*Calcium sulfoaluminato (Ye'elimite) hydration in the presence of gypsum, calcite, and vaterite*", Cement and Concrete Research, Vol 65: pp.15-20.

Katsioti, M., Tsakiridis P. E., Agatzini-Leonardou, S., Oustadakis, P. (2005), "*Examination of the jarosite–alunite precipitate addition in the raw meal for the production of Portland and sulfoaluminato-based cement s*", International Journal of Mineral Processing, Vol. 76: pp. 217 – 224.

Li, H., Agrawal, D. K., Cheng, J., Silsbee, M. R. (2001), "*Microwave sintering of sulfoaluminato cement with utility wastes*", Cement and Concrete Research, Vol. 31: pp 1257- 1261.

Li, J., Ma, H., Zhao, H. (2007), "*Preparation of sulfoaluminato-alite composite mineralogical phase cement from high alumina fly ash*", Key Engineering Materials, Vol. 334-335: pp. 421-424.

- Martin, J. J., Márques G., Alejandro F. J., Hernandez M. E. (2008), "*Durability of API class cement pastes exposed to aqueous solutions containing choride, sulphate and magnesium ion*", *Materiales de construcción*, Vol 58,292: pp. 1701-1707.
- Mehta, P. K. (1967) "*Expansion characteristics of calcium sulfoaluminate hydrates*", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 50, 4: pp. 204–208.
- Moore, A., Taylor, H. F. W. (1968), "*Crystal structure of ettringite*", *Nature*, Vol. 218: pp. 1048 – 1049.
- NMX-C-061-ONNCCE-2001. (2001), *Industria de la construcción-cemento-determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación para la Construcción y Edificación, México DF.
- NMX-C-085-ONNCCE-2002 (2002), *Industria de la construcción-Cementos hidráulicos-Método estándar para el mezclado de pastas y morteros de cementantes hidráulicos*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación para la Construcción y Edificación, México DF.
- Older, I. (2005), "*Cements containing calcium sulfoaluminate*", *Special Inorganic Cements, Modern Concrete Technology 8*, Taylor and Francis Group: pp. 63-81.
- Roy, D. M. (1999), "*Alkali-activated cements opportunities and challenges*", *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 2: pp 249–254.
- Sersale, R., Frigiones, G., Bonavita, L. (1998), "*Acid depositions and concrete attack: main influences*", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28 pp. 19-24.
- Sharp J. H., Lawrence C. D., Yang R. (1999) "*Calcium sulfoaluminate cements—low-energy cements, special cements or what?*", *Advances in Cement Research*, Vol 11, 1: pp 3 –13
- Singh, M., Kapur, P. C., Pradip. (2008), "*Preparation of calcium sulphoaluminate cement using fertiliser plant wastes*", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 157: pp. 106–113.
- Singh, M., Upadhayay, S. N., Prasad, P. M. (1997), "*Preparation of iron rich cements using red mud*", *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, 7: pp. 1037–1046.
- Taylor, H. F. W., Famy, C., Scrivener, K. L. (2001), "*Delayed ettringite formation*", *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 5: pp. 683–693.
- Zhou, Q., Milestone, N. B., Hayes, M. (2006) "*An alternative to Portland Cement for waste encapsulation—The calcium sulfoaluminate cement system*", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 136, 1: pp. 120–129.
- Zhou, Q., Milestone, N. B., Hayes, M. (2006) "*An alternative to Portland Cement for waste encapsulation—The calcium sulfoaluminate cement system*", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 136, 1: pp. 120–129.



Hormigón y hormigonado de cimentación con hormigón autocompactante y de elevadas prestaciones (70 MPa)

C. Britze¹; J. Gadea¹; M. Carvalho¹; P. Helene²

¹ PhD Engenharia.

² Universidad de São Paulo, USP & PhD Engenharia.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i1.113>

Artículo recibido el 30 de noviembre de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 20 de enero de 2016. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2016.

© 2016 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 6, No. 1, Enero – Abril 2016, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, [Página Web: Revista ALCONPAT](http://www.revistaalconpat.org).

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de última modificación: 30 de marzo de 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMEN

El Edificio Comercial Brookfield Century Plaza, localizado en Alphaville, São Paulo, Brasil, se proyectó apoyado por dos grandes zapatas de hormigón. Un hormigón de alta resistencia (70 MPa) y autocompactante (SCC) fue desarrollado para estas zapatas de grandes dimensiones (cada una mide 28.4m x 18.6m x 4.5m). Un modelo numérico utilizando un software FEM se desarrolló para predecir la ganancia térmica de hidratación de diferentes capas de hormigonado con el fin de establecer el procedimiento más adecuado para atender los requisitos de tiempo y de construcción, sin que aparezcan fisuras. Se establecieron y supervisaron procedimientos para controlar la producción del hormigón en la empresa productora del mismo y durante el hormigonado. Finalmente, se registró la temperatura interna del hormigón para permitir una mejor calibración del modelo.

Palabras clave: hormigón de alta resistencia, hormigón autocompactante, hormigón en masa, producción de hormigón refrigerado.

ABSTRACT

The Brookfield Century Plaza Commercial Building, located in Alphaville District, in São Paulo, Brazil, was designed to be supported by two direct foundation concrete blocks. A high strength (70 MPa), self-compacting concrete SCC was developed for these two massive foundation blocks (each one measures 28.4m x 18.6m x 4.5m). A numerical model by employing a FEM software was developed to predict the thermal hydration gain of different casting procedures, to establish the most appropriate one to meet the construction and schedule requirements without cracks. Directions to control concrete production at mixing plant and placing at construction site were established as well as supervised. Finally, internal concrete temperatures were recorded to enable a better model calibration.

Keywords: high strength concrete, self-compacting concrete, concrete modelling, refrigerated concrete production.

RESUMO

O Edifício Comercial Brookfield Century Plaza, localizado em Alphaville, São Paulo, Brasil, foi projetado para ser apoiado em dois grandes blocos de concreto. Um concreto de alta resistência (70 MPa) e autoadensável SCC foi desenvolvido para estes dois blocos maciços de fundação (cada um medindo 28.4m x 18.6m por 4.5m de altura). Um modelo numérico empregando um software FEM foi desenvolvido para prever o ganho de hidratação térmica de diferentes camadas de concretagem, a fim de estabelecer o procedimento mais adequado para cumprir o cronograma e os requisitos de construção, sem fissurar. Diretrizes para controlar a produção do concreto na empresa de serviços de concretagem e procedimentos de como aplicá-lo no canteiro de obras foram estabelecidas e supervisionadas. Finalmente, as temperaturas internas do concreto foram registradas para permitir uma melhor calibração do modelo.

Palavras-chave: concreto de alta resistência, concreto autoadensável, modelagem de concreto massa, produção de concreto refrigerado.

Autor a contactar: Carlos Britze (carlos.britez@concretophd.com.br)

1. INTRODUCCIÓN

El edificio comercial Brookfield Century Plaza (Figura 1), ubicado en el barrio Alphaville, en São Paulo, Brasil, se proyectó apoyado en dos grandes zapatas de hormigón. Cada una mide 28.4m x 18.6m por 4.5m, de altura (lo que representa aproximadamente 2,400m³ de hormigón) y tienen 200t de armaduras. La resistencia a la compresión del hormigón (f_{ck}) a 28 días, se especificó en $f_{ck} \geq 70$ MPa.



Figura 1. Perspectiva del edificio comercial Brookfield Century Plaza (<http://www.br.brookfield.com/>).

En este artículo se describirán los procedimientos seguidos en la oficina de proyectos y en la obra para conseguir los mejores resultados para construir estas dos grandes zapatas de hormigón de alta resistencia, incluyendo el diseño de la dosificación del hormigón para atender las especificaciones, el desarrollo de cálculos térmicos del calor de hidratación, establecer la producción del hormigón y el método de hormigonado, así como supervisar el mismo y su ejecución en obra.

2. CONCEPTO DE HORMIGÓN EN MASA

Si se le compara al hormigón “tradicional”, el hormigón en masa se distingue por la dificultad de disipar el calor que se origina por las reacciones exotérmicas de hidratación acompañadas por la variación volumétrica resultante, que requieren medidas especiales de control para minimizar la fisuración (ACI, 2005; Mehta y Monteiro, 2014; Isaia, 2011).

La hidratación del cemento Portland es una reacción exotérmica que emite energía térmica dentro de la masa del hormigón durante el fraguado. El calor que se disipa al medio externo está influenciado por las características térmicas de los materiales empleados, por las condiciones del ambiente externo y por las dimensiones del elemento estructural.

El hormigón, en función de su coeficiente de dilatación térmica, sufre variaciones dimensionales por dilatación cuando se le somete a las temperaturas resultantes de esa reacción química exotérmica. Al principio, durante las primeras edades, se expande rápidamente generando esfuerzos de compresión, dado que las principales reacciones exotérmicas ocurren en las primeras edades, alrededor de 50h a 120h después del hormigonado.

Cuando el hormigón se enfría hasta la temperatura ambiente, lo que ocurre de manera irregular y del exterior hacia el interior creando gradientes térmicos importantes, está sometido a una contracción térmica. Esta contracción, debido a las restricciones naturales producidas por el rozamiento o por la geometría de la pieza, produce tensiones que pueden ser mayores que la resistencia a la tracción del hormigón, produciendo fisuras en los miembros estructurales (ACI, 2005; Furnas, 2007).

En función de esto, debe entenderse que para concebir elementos estructurales que involucren hormigón en masa, tales como las zapatas enfocadas en este artículo, se deben tomar cuidados especiales con las proporciones de los materiales del hormigón [por ejemplo, con la menor cantidad posible de cemento (clínker), el empleo o no de hielo o agua helada, el uso o no de adiciones como escoria, cenizas volantes o metacaolín], una simulación térmica eficiente (capaz de informar si se debe o no hormigonar en más de una capa, y también suministrar datos para preparar un plan detallado de hormigonado), el procedimiento ejecutivo apropiado (que permita establecer directivas para controlar la temperatura máxima del hormigón y otros parámetros importantes) y también la supervisión técnica especializada de la producción y vertido del hormigón para minimizar potenciales manifestaciones patológicas futuras.

3. DISEÑO DE LA DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN

El diseño de la dosificación de hormigón para este caso particular se desarrolló mediante estudios intensos en laboratorio y en campo. La dosificación tuvo por base las directivas del método del IBRACON (Tutikian y Helene, 2011), la información disponible, las características de local y de acuerdo con las normas ABNT NBR 12655:2006 (ABNT, 2006) y ACI 237R-07 (ACI, 2007), así como las especificaciones del proyecto estructural, orientado por dos metas principales a ser alcanzadas:

- Como puede esperarse, una zapata de hormigón de 70 MPa y de 2.400m³ generará temperaturas bastante altas durante el fraguado, por lo tanto, se necesitó diseñar un hormigón que fuese capaz de reducir al mínimo el calor de hidratación,
- Después de analizar el proyecto estructural y descubrir que la armadura de refuerzo en algunos lugares era bastante densa, fue necesario escoger un método de hormigonado capaz de evitar anomalías como huecos, nidos de abeja o coqueras.

Por estas razones, se decidió reemplazar toda el agua de mezclado por hielo y cemento CP III 40 (con 50% a 70% de escoria) y metacaolín HP en la dosificación del hormigón (con la finalidad de reducir el calor de hidratación), así como también emplear hormigón autocompactante, SCC, para acelerar el hormigonado y evitar errores.

Se desarrollaron diferentes dosificaciones con distintas proporciones de mortero (Figura 2). Para cada dosificación, se midieron propiedades del hormigón fresco como aire incluido (atrapado), densidad aparente y extensión de flujo, y se moldearon tres probetas, ensayadas a 3, 7 y 28 días, para verificar la resistencia a la compresión, como se ilustra en las Figuras 3 y 4, a continuación.



Figura 2. Dosificaciones con diferente proporción de mortero.



Figura 3. Medidas del contenido de aire incluido (atrapado) y de la densidad aparente.



Figura 4. Ensayo de extensión de flujo y probetas moldeadas para ensayos de resistencia a la compresión.

La dosificación final, que satisfizo todas las características deseadas, se obtuvo con la proporción de materiales expuesta en la Tabla 1.

Tabla 1. Dosificación de los materiales componentes del SCC para utilización en las zapatas del Brookfield Century Plaza.

$f_{ck} \geq 70$ MPa relación agua/aglomerante = 0.36	
Cemento (CP III 40 Mizú)	447kg (313kg de escoria + 134kg de clinker)
Metacaolín HP	38kg
Arena artificial (roca triturada)	481kg
Arena natural (de río, cuarzo)	321kg
Piedra partida 9-19mm	194kg
Piedra partida 19-25mm	777kg
Agua total (hielo + humedad de los áridos)	175L
Sikament 735 Aditivo plastificante (0.5% en masa de cemento)	2.2L
Sika 5700 Aditivo superplastificante (1% en masa de cemento)	4.6L

4. ESTUDIO TÉRMICO

El estudio térmico se realizó con el *software b4cast 3.0*, que emplea el método de la madurez (calculado por la ecuación de Arrhenius) como se describe en ASTM C 1074–04 (ASTM, 2004). Este programa tiene por base el Método de Elementos Finitos, MEF y es capaz de simular el historial de temperaturas del elemento estructural que será moldeado y las tensiones que resultan de las diferencias de temperatura dentro del elemento. Para estimar la resistencia a la tracción se empleó la ecuación (1), tal como se prescribe en la norma brasileña de hormigón.

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (1)$$

Se realizaron diversas simulaciones explorando diferentes estrategias de hormigonado. El Contratista quería investigar la posibilidad de moldear toda la zapata en sólo una o dos veces, lo que resultó imposible, porque las tensiones de tracción internas serían mayores que la resistencia real del hormigón a la tracción. Como resultado de las simulaciones de hormigonar en una o dos veces, se decidió investigar el comportamiento de temperaturas y tensiones hormigonando la zapata en 4 capas de 1,125m de altura cada una, con un lapso de 3 días entre el hormigonado de capas. El pico de temperatura disminuyó de 64,6°C a 54,0°C, una reducción del 20%. Las tensiones de tracción también disminuyeron, quedando muy próximas de la evolución de la curva de crecimiento de la resistencia a la tracción, lo que significa que hay una baja posibilidad de fisuras originadas por tensiones térmicas (Figura 5).

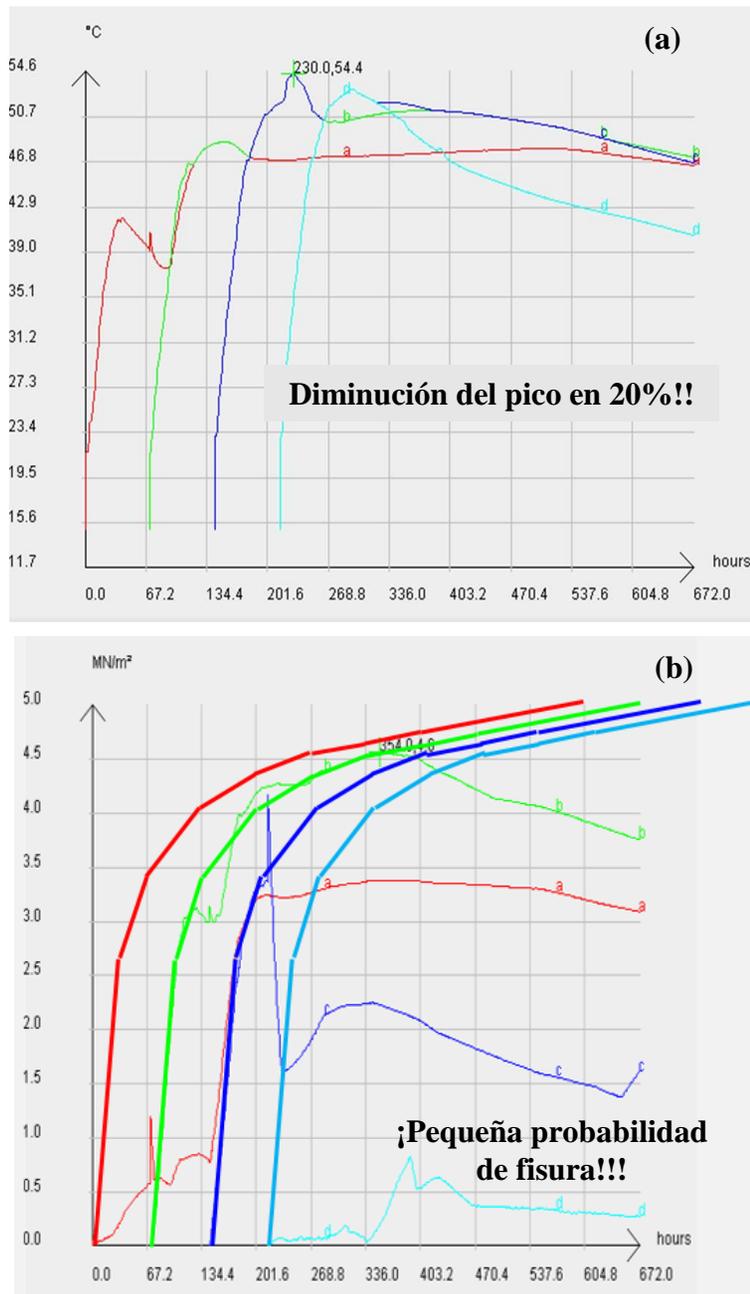


Figura 5. Zapata hormigonada en cuatro capas de 1,125m de altura y lapso de tres días entre hormigonado: (a) temperaturas y (b) tensiones térmicas vs. resistencia a tracción.

5. PRODUCCIÓN DEL HORMIGÓN Y PROCEDIMIENTOS DE HORMIGONADO

Los procedimientos recomendados para el hormigonado de las zapatas tuvieron por base las instrucciones de la normativa nacional corriente (ABNT, 2004; ACI, 2010) y buenas prácticas de ingeniería (Kosmatka y Wilson, 2011; Kennedy, 2005).

Para asegurar que la producción del hormigón en la planta dosificadora y que el hormigonado en obra mantuviese los estándares de calidad y las características especificadas, se definieron procedimientos (Tabla 2) para el hormigonado, que fueron seguidos por la Compañía de Hormigón Premezclado, por el equipo del Contratista y por el Laboratorio de Control de Calidad del Hormigón.

Tabla 2. Producción del hormigón y procedimientos de hormigonado.

Control propuesto y responsable	Procedimientos que se deberán seguir
<p>Control de la producción del hormigón en la planta dosificadora Responsable: La Compañía de Hormigón Premezclado y el Laboratorio de Control de Calidad del Hormigón</p>	<ul style="list-style-type: none"> • El árido grueso se deberá rociar con agua fresca; • Se deberán medir las temperaturas de áridos y cemento, los áridos deberán permanecer abajo de 25°C y el cemento de 70°C; • Toda el agua de mezclado se debe substituir por hielo; • Las bolsas de hielo se deben pesar para determinar el peso promedio; • Se debe medir el contenido de humedad de la arena; • Cada camión hormigonera se debe cargar sólo con 6m³, y los aditivos se deben mezclar en la planta dosificadora; • Se debe establecer un flujo constante de camiones hormigonera.
<p>Control de hormigonado en la obra Responsable: Laboratorio de Control de Calidad del Hormigón</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se debe medir la temperatura del hormigón y debe ser $\leq 20^{\circ}\text{C}$; • Se debe medir la extensión del flujo; • Se deben moldear probetas para ensayos de resistencia a la compresión y de tracción diametral; • La temperatura en puntos definidos de cada capa de hormigón se deberá registrar con termopares, a intervalos preestablecidos.
<p>Recomendaciones para hormigonado Responsable: Contratista</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Encofrados y armaduras colocadas, capa inferior/fondo limpio, depresión de napas en funcionamiento, desagües/diques para agua de lluvia instalados; • Bombas de hormigón para cada zapata ubicadas(tres); • Preparación de la superficie del hormigón entre capas para evitar juntas frías; • Cura del hormigón y limpieza de las superficies de juntas.

Es muy importante subrayar el hecho que para que el hormigón llegue a la obra con menos de 20°C, se deberá realizar un estricto control periódico de la humedad de la arena y del peso real de las bolsas de hielo que se cargan en cada camión hormigonera. Como en Brasil el hielo se vende normalmente en bolsas de 20kg, el peso promedio de una bolsa se debe determinar con mucha frecuencia, para asegurar que la cantidad estipulada de agua se haya efectivamente agregado a la mezcla.

6. SUPERVISIÓN TÉCNICA

La producción de hormigón y los procedimientos de hormigonado se supervisaron en obra, para asegurarse que se habían seguido las recomendaciones y también para corregir cualquier desvío que pudiese ocurrir o para dar soporte técnico en ocasiones específicas, si fuese necesario.

6.1. Supervisión en la planta dosificadora

En la planta dosificadora de la Compañía de Hormigón Premezclado, situada a 20 minutos de la obra, se verificaron las temperaturas del cemento y áridos a diferentes horas del día. La temperatura del cemento nunca sobrepasó 50°C. Los áridos se rociaron con agua (Figura 6), porque durante la tarde la temperatura ambiente llegaba a 30°C. El rociado con agua mantuvo la temperatura de los áridos abajo de 25°C (Figura 7).



Figura 6. Árido grueso siendo rociado con agua en la planta dosificadora de la Compañía de Hormigón Premezclado



Figura 7. Registros de la temperatura del árido grueso antes y después de haber sido rociado con agua en la planta dosificadora de la Compañía de Hormigón Premezclado.

El número de bolsas de hielo se determinó midiendo la humedad de la arena para después calcular el peso promedio de las bolsas. A medida que la temperatura aumentaba, el hielo se derretía con mayor velocidad, obligando a efectuar nuevas medidas.

Una plataforma móvil se instaló en la parte trasera del camión hormigonera y la cantidad especificada de bolsas de hielo se cargó en cada camión. Un técnico del Laboratorio de Control de Calidad del Hormigón verificó el número de bolsas de cada carga.

6.2. Supervisión en la obra. Temperatura y extensión de flujo del hormigón

Cuando el hormigón llegaba a la obra, se controlaba su temperatura. Si fuese mayor que 20°C, el hormigón se rechazaba. La media de temperaturas fue menor que 18°C (Figura 8).



Figura 8. La temperatura del hormigón fresco se controlaba para cada camión hormigonera mediante un termómetro digital de inmersión (ejemplo: 13.2°C).

Si la temperatura del hormigón atendía lo especificado, se medía la extensión del flujo. La extensión debía estar entre 600mm y 750mm y el hormigón no podía estar segregado para que fuese aceptado. La medida de la extensión de flujo debe ser el promedio de tres medidas diametrales diferentes, y la realizaba el equipo del Laboratorio de Control de la Calidad del Hormigón (Figura 9).



Figura 9. Medida de la extensión de flujo.

6.3. Supervisión en la obra – Historial de temperaturas del hormigón durante el endurecimiento

Con la finalidad de registrar el historial de temperaturas del hormigón durante el endurecimiento, el Laboratorio de Control de Calidad del Hormigón instaló 12 termopares en tres puntos a la mitad de la altura de cada capa de hormigonado. Los intervalos de tiempo en que las temperaturas se debían medir también fueron definidos. Los resultados se registraron para análisis posterior y para calibrar el modelo.

6.4. Supervisión en la obra – Ubicación de las bombas de hormigón y procedimiento de hormigonado

La ubicación de las bombas y la secuencia de hormigonado se discutieron en conjunto con el equipo técnico de la Contratista. Se emplearon tres bombas (Figura 10). El hormigón se debía depositar en subcapas uniformes, de 0,3m de altura aproximadamente, comenzando por el lado de la entrada con la bomba N°.1 y continuando hacia el fondo con las bombas N°s. 2 y 3.



Figura 10. Vista general – bombas de hormigón ubicadas en su sitio.

La secuencia de hormigonado descrita se empleó para todas las capas. Las dos primeras se hormigonaron sin la armadura superior (Figura 11a). Al finalizar cada hormigonado, la superficie de la capa se preparó para obtenerse la rugosidad necesaria que permitiese una buena adherencia para la capa siguiente. La cura del hormigón comenzó inmediatamente después, creándose una piscina sobre toda la superficie. Antes de iniciar un nuevo hormigonado, la superficie se drenaba y limpiaba con chorros de agua. El hormigón se depositaba sobre la superficie saturada. Al finalizar la segunda capa, se instalaron las armaduras de los pilares y la superior, y el hormigón se colocó por tubos tremises (Figuras 11b y 12).



Figura 11. (a) Hormigonado de la segunda capa sin la armadura superior y (b) hormigonado después de haber colocado toda la armadura.



Figura 12. La armadura superior consistía en dos capas dobles de barras de 32mm. El hormigón HAC se diseñó para pasar a través de esta armadura.

7. RESULTADOS

7.1 Control tecnológico

En lo que respecta al control tecnológico del hormigón, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión en la muestra total (en 100% de los camiones hormigonera) a 7, 28 y 63 días de edad. La mayor parte de los resultados satisfizo el valor especificado de resistencia a la compresión ($f_{ck} \geq 70$ MPa) del proyecto estructural. Los resultados de la resistencia a la compresión a 28 días de una de las capas se muestran gráficamente en la Figura 13.

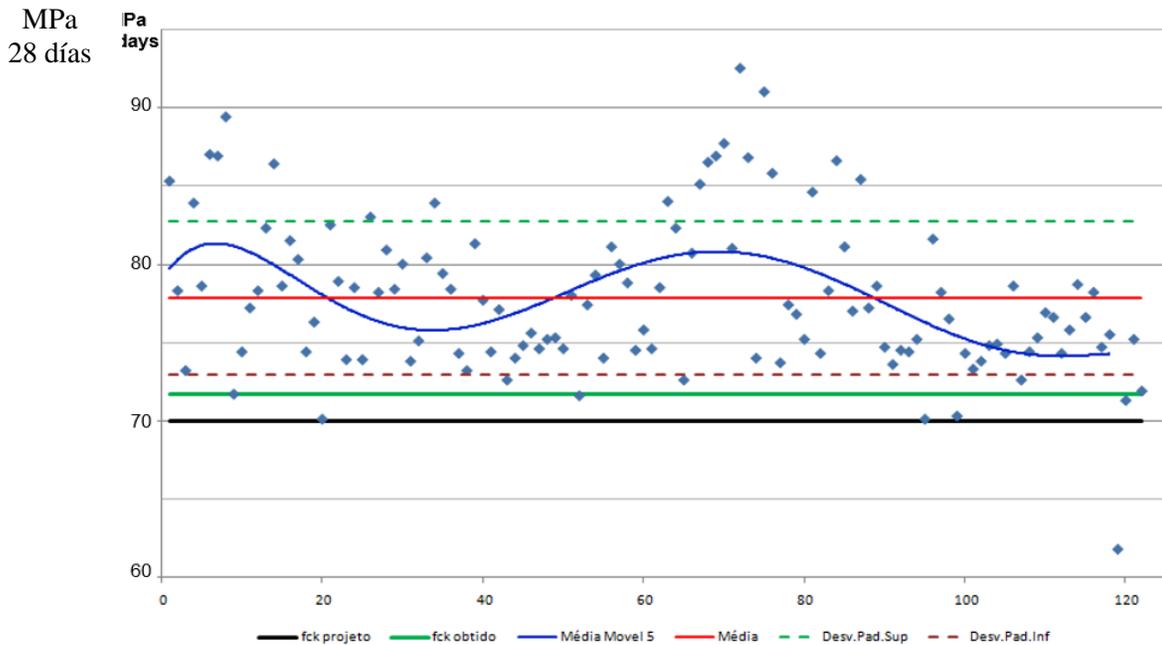


Figura 13. Ejemplo de los resultados de la resistencia a la compresión de una de las capas de hormigón.

Por otro lado, el hormigón autocompactante demostró funcionar muy bien en la obra, acelerando el hormigonado: El tiempo necesario para bombear un camión hormigonera de 6m³ dio un promedio de 15 minutos (incluyendo los tests de aprobación) y prácticamente no hubo necesidad de vibrar.

7.2 Temperaturas medidas dentro de las zapatas

Las temperaturas del hormigón se registraron. El pico de temperatura, 57°C, se alcanzó en la cuarta capa después de 582h. Como se puede ver en el gráfico, el lapso entre capas se cambió en obra para adaptarse mejor al procedimiento constructivo. En vez de lapsos de 3, 3, y 3 días, se adoptaron 3, 10, y 2, lo que lleva a temperaturas que difieren en no más que 10% de las previstas (Figura 15).

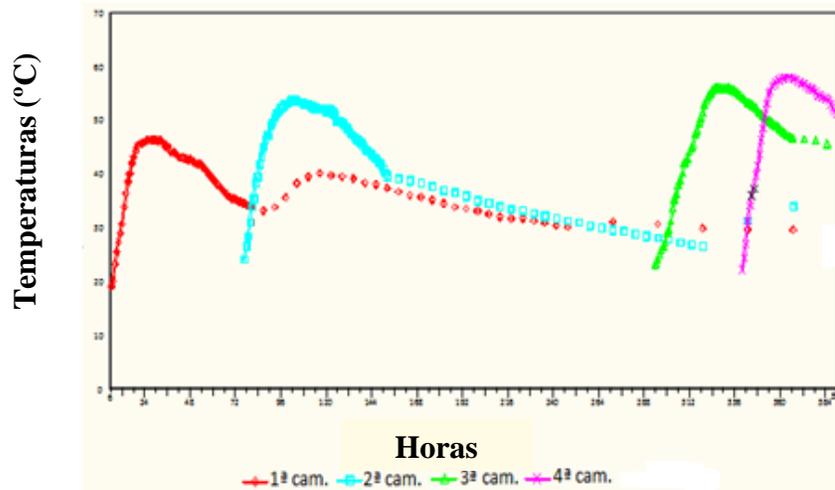


Figura 15. Temperaturas de hidratación del hormigón registradas en obra. Los lapsos fueron 3, 10, y 2 días.

8. CONCLUSIONES

Este artículo tiene por finalidad demostrar que el desarrollo de estudios previos de dosificaciones en laboratorio y simulaciones térmicas, conjuntamente con la adopción de procedimientos ejecutivos rigurosos y, especialmente, el control y la supervisión técnica de los detalles involucrados, son factores determinantes para proporcionar integridad a un elemento estructural y conseguir que quede de acuerdo con las especificaciones de proyecto.

Por último, se puede observar que las hipótesis expuestas en este artículo, tanto teóricas (antes de hormigonar) como prácticas (durante y después de hormigonar), hicieron posible un resultado satisfactorio, revelándose como herramientas poderosas para planificar y ejecutar estructuras de hormigón complejas y desafiantes, como aquellas que involucran hormigón en masa.

9. AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen y aprecian el apoyo y la colaboración de las compañías involucradas en este caso: Brookfield S.A. (Contratista), Polimix Concreto Ltda. (Compañía de Hormigón Premezclado), Pasqua & Graziano Consultoria, Conceção Estrutural e Projetos (Proyecto de Estructuras) y Falcão Bauer (Laboratorio de Control de la Calidad del Hormigón).

10. REFERENCIAS

American Concrete Institute (2005), “*ACI 207.1R-05: Guide to Mass Concrete*”, (Farmington Hills, U.S.: ACI).

American Concrete Institute (2007), “*ACI 237R-07: Self-Consolidating Concrete*”, (Farmington Hills, U.S.: ACI).

- American Concrete Institute (2010), “*ACI 301-10: Specifications for Structural Concrete*”, (Farmington Hills, U.S.: ACI).
- American Society for Testing and Materials (2011), “*ASTM-C 1074: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*”, (West Conshohocken, U.S.: ASTM International).
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006), “*NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento*”, (Rio de Janeiro, Brazil: ABNT).
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004), “*NBR 14931: Execução de estruturas de concreto – Procedimento*”, (Rio de Janeiro, Brazil: ABNT).
- Furnas. Laboratório de Concreto; Andrade, W. P. (Ed.). (1997), “*Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo – ensaios e propriedades*”, (São Paulo, Brazil: PINI). 1v.
- Isaia, G. C. (Ed.). (2011), “*Concreto: Ciência e tecnologia*”, (São Paulo, Brazil: IBRACON). 2v.
- Kennedy, Lindsay K. (Ed.). (2005), “*The Contractor's Guide to Quality Concrete Construction*”, (St. Louis, U.S.: American Society of Concrete Contractors – ASCC). 3ed.
- Kosmatka, Steven H.; Wilson, Michelle L. (2011), “*Design and control of concrete mixtures*”, (Illinois, U. S.: Portland Cement Association – PCA). 15ed.
- Mehta, P. K; Monteiro, J. M. (2014), “*Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*”, (São Paulo, Brazil: IBRACON). 2ed.
- Tutikian, Bernardo; Helene, Paulo (2011), Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. In: Geraldo C. Isaia. (Org.). “*Concreto: Ciência e Tecnologia*”, 1 ed. São Paulo: Ibracon, v. 1, p. 415-451.



Durabilidad de morteros de reparación sustentables expuestos a ambiente industrial

J. M. Mendoza-Rangel¹, J. M. Flores-Jarquín¹, E. U. De Los Santos¹, P. Garcés²

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, FIC, Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66451, México.

²Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, Carretera de San Vicente del Raspeig S/N, San Vicente del Raspeig, España

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i1.114>

Artículo recibido el 22 de septiembre de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 12 de diciembre de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2016.

© 2016 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 6, No. 1, Enero – Abril 2016, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, [Página Web: Revista ALCONPAT](http://www.revistaalconpat.org). Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de última modificación: 30 de marzo de 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMEN

La reparación y mantenimiento de estructuras de concreto se ha incrementado en las actividades de la industria de la construcción. En el presente trabajo, se evalúa la durabilidad de dos morteros elaborados con sustituciones de ceniza volante (CV) en peso con respecto al cementante total, adicionalmente se compara su desempeño con tres morteros de reparación comerciales, expuestos al ataque de CO₂ en ambiente industrial. Para evaluar el desempeño como materiales de reparación se realizaron ensayos de resistencia a la compresión, flexión y adherencia. Se presentan también pruebas de durabilidad como mediciones de potencial, velocidad de corrosión, permeabilidad y profundidad de carbonatación.

Palabras clave: mortero; materiales de reparación; corrosión; carbonatación; durabilidad.

ABSTRACT

The repair and maintenance of concrete structures has increased in the activities of the construction industry. In this work, the durability of two mortars elaborated with fly ash substitutes (FA) is evaluated by weight with respect to the total cement; furthermore, its performance is compared to three commercial repair mortars, exposed to the CO₂ attack in an industrial environment. To evaluate its performance as repair material, tests were carried out to evaluate its resistance to compression, bending, and adherence. Durability tests are also presented as potential measurements, corrosion rate, permeability, and carbonation depth.

Keywords: mortar; repairing materials; corrosion; carbonation; durability.

RESUMO

O reparo e manutenção de estruturas de concreto tem crescido dentre as atividades da indústria da construção. Foi avaliada a durabilidade de duas argamassas obtidas a partir de substituição de cinzas volantes (CV), em massa em relação à quantidade total de produto aglomerante. Foi comparado o desempenho dessa argamassa com o desempenho de três argamassas de reparo comerciais, frente a um ataque de CO₂ num ambiente industrial. Para avaliar o desempenho como materiais de reparo foram realizados ensaios de resistência à compressão, flexão e aderência. São apresentadas também provas de durabilidade com medidas de potencial de corrosão, velocidades de corrosão, permeabilidade e profundidade de carbonatação.

Palavras-chave: argamassa; materiais de reparo; corrosão; carbonatação; durabilidade.

Autor a contactar: José Manuel Mendoza Rangel (jmmr.rangel@gmail.com)

1. INTRODUCCIÓN

El principal problema por el cual una estructura de concreto reforzado requiere reparación, es la corrosión del acero, influyendo negativamente en la durabilidad de las construcciones, poniendo en riesgo su funcionalidad y seguridad (Andrade C., Feliu S., 1989). En ambientes industriales y urbanos, las grandes concentraciones de CO₂ son un problema para las edificaciones de concreto reforzado, debido a la carbonatación del concreto que ocasiona una reducción de alcalinidad y genera la despasivación y corrosión del acero. Para el desarrollo de la carbonatación, la humedad y la temperatura son factores que modifican su velocidad de avance.

Después de haber detectado el daño por corrosión en una estructura, es necesario emprender acciones para realizar una reparación y alargar su vida útil. El trabajo de reparación se puede dividir básicamente en los siguientes pasos: eliminación del concreto, limpieza del acero expuesto y la aplicación de un material de reparación (Fernández Cánovas, 1989).

La selección del material de reparación es el criterio más importante a considerar en el trabajo de reparación, normalmente la resistencia a la compresión es tomada para seleccionar un mortero de reparación, esto es totalmente insuficiente si no se tienen en cuenta otros parámetros más importantes como es la compatibilidad del mortero con el sustrato de concreto. El tema de la compatibilidad conlleva a estudiar la diferencia entre las propiedades del sustrato de concreto y el mortero de reparación, ya que dicha diferencia puede inducir efectos negativos sobre la reparación, generando agrietamiento y por lo tanto disminuyendo su durabilidad (Decter, 1997).

Se han hecho muchos estudios para evaluar diferentes tipos de materiales de reparación disponibles en el mercado. Desafortunadamente, no están especificadas las propiedades que se deben considerar para la evaluación y selección de los materiales de reparación (Cabrera, 1997). Algunos autores (Emmons, 1994), establecen las consideraciones que afectan la compatibilidad para una buena selección de los materiales de reparación. De estas consideraciones, probablemente la más importante es la capacidad de soportar los cambios de volumen, sin pérdida de adherencia ni agrietamientos, esto se conoce como "Compatibilidad dimensional". Además de los cambios de volumen, una reparación también debe tener un efecto protector y para asegurar eso, se deben considerar la compatibilidad química, electroquímica y la permeabilidad del material de reparación.

Los problemas relacionados con las propiedades a evaluar y la selección de los materiales de reparación se atribuyen a la falta de regulación con relación a las actividades de reparación, mantenimiento y renovación (Kay, 1987; Treadaway, 1987), además de la insuficiente información que proporcionan los fabricantes de los materiales de reparación. Por tal motivo, es necesario llevar a cabo investigaciones sobre los materiales de reparación adecuados para el entorno y las condiciones de servicio de cada estructura. A su vez, el empleo de materiales cementantes alternos como la ceniza volante, permitirán tener materiales de reparación de bajo impacto ambiental por la disminución en el uso de cemento portland ordinario (CPO) y que cumplan con las características necesarias de una reparación duradera.

El objetivo de este trabajo es evaluar la durabilidad y el desempeño potencial de tres morteros preparados en el laboratorio, dos con sustitución de CV (20 y 50%) por CPO y tres morteros de reparación comerciales, en particular su comportamiento mecánico, estabilidad dimensional, adherencia y su capacidad para proteger al acero de la corrosión por carbonatación en un ambiente industrial.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La Tabla 1 muestra la proporción de los morteros elaborados en el laboratorio. El mortero MR es usado como referencia, los morteros M1 y M2 fueron elaborados con la misma relación agua/cemento y cemento-arena que la referencia, pero con adiciones de CV de 20 y 50% en sustitución con respecto al peso de cemento de MR. El cemento utilizado es un CPO 40 y la CV de tipo F, fue obtenida de la Carboeléctrica de la ciudad de Nava Coahuila. La composición química del CPO y CV se observa en la Tabla 2.

Tabla 1. Proporciones de los morteros de reparación fabricados en el laboratorio.

Mortero	Componente	Proporción
MR	CPO	1
	Arena	3
	Agua	0,5
M1	CPO	0,8
	CV	0,2
	Arena	3
	Agua	0,5
M2	CPO	0,5
	CV	0,5
	Arena	3
	Agua	0,5

Los morteros de reparación comerciales se identifican como C1, C2 y C3, estos son morteros pre-empacados, base cemento y de un solo componente, C1 es un mortero reforzado con fibras, C2 de fraguado rápido, C1 y C3 son modificados con polímeros y con adiciones de microsilíce en proporciones conocidas por el fabricante. El mezclado y las cantidades de agua que se utilizaron fueron los especificados en la ficha técnica de cada mortero.

Tabla 2. Composición Química en óxidos del Cemento Portland y la Ceniza Volante

Óxidos	CPO (%)	CV (%)
SiO ₂	17,43	56,51
Al ₂ O ₃	4,67	33,11
Fe ₂ O ₃	2,25	1,49
CaO	63,27	0,70
MgO	1,23	1,67
SO ₃	4,98	0,34
Na ₂ O	0,56	3,32
K ₂ O	0,75	0,52

Se fabricaron diferentes tipos de especímenes de acuerdo al ensayo a realizar; después de la fabricación, los especímenes se conservaron en una cámara de curado a 100% de Humedad Relativa (RH) y a 21±2 °C, durante 14 días. Posterior al curado, los especímenes fueron retirados de la cámara hasta cumplir la edad de 28 días.

Para el ensayo de potenciales de corrosión se fabricaron especímenes con dos varillas de acero de 6 mm de diámetro para dejar un recubrimiento de 7 mm, adicionalmente se colocó una barra de grafito del mismo diámetro para ser utilizado como contra electrodo.

Para evaluar la capacidad de resistir el ingreso de agentes agresivos los especímenes fueron expuestos a la carbonatación en un ambiente industrial.

En la industria donde se ubicaron los especímenes se llevan a cabo procesos industriales de producción de carbonato y bicarbonato de sodio, creando así un ambiente agresivo y dañino para el concreto.

2.1 Resistencia a compresión y flexión.

Para determinar la resistencia a la compresión se fabricaron cubos de mortero de 50 mm de lado. El procedimiento de llenado de los cubos y del ensaye, se realizó según lo establecido en la norma (ASTM C 109). La resistencia a la flexión se realizó de acuerdo al procedimiento descrito en la norma, en probetas prismáticas de 40x40x160 mm (ASTM C 348).

2.2 Adherencia.

El ensayo utilizado fue el conocido como de corte inclinado, el cual utiliza un prisma de 100x100x300 mm, hecho de dos mitades idénticas unidas a 30° y probados bajo compresión axial (Momayez, 2005).

2.3 Permeabilidad.

El procedimiento para determinar la permeabilidad al aire de los morteros de reparación se llevó a cabo mediante el ensayo de Permeabilidad de Torrent (TPT), sobre probetas cúbicas de 150 mm (Torrent, 1992; Kucharczykova, 2010).

2.4 Profundidad de Carbonatación.

Para este ensayo, se fabricaron probetas prismáticas de 20x55x280 mm. Las muestras fueron colocadas en el ambiente de la industria antes mencionado y no posee valores uniformes ya que depende de la producción en la planta, datos obtenidos anteriormente se han reportado en un artículo anterior (Durán-Herrera, 2015). El monitoreo se llevó a cabo rociando fenolftaleína como indicador de la profundidad de carbonatación sobre las muestras recién cortadas a diferentes edades.

2.5 Potenciales y Velocidades de Corrosión.

Los potenciales (E_{corr}) y velocidades (i_{corr}) de corrosión se determinaron mediante la prueba de resistencia a la polarización (ASTM G 59) con una velocidad de barrido de 0.06 mV/s y solo en la zona catódica yendo de 0 a -10 mV. Esta metodología es aplicable para el estudio de la protección que ejercen los morteros de reparación sobre el acero de refuerzo.

El acero utilizado se preparó y limpio siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM G1 (ASTM G 1), el cual consiste en remover completamente los productos de corrosión que pudiera tener antes de comenzar el ensayo. Después de la limpieza del acero, se pesó y se encintó cuidadosamente para delimitar el área a estudiar (50 mm).

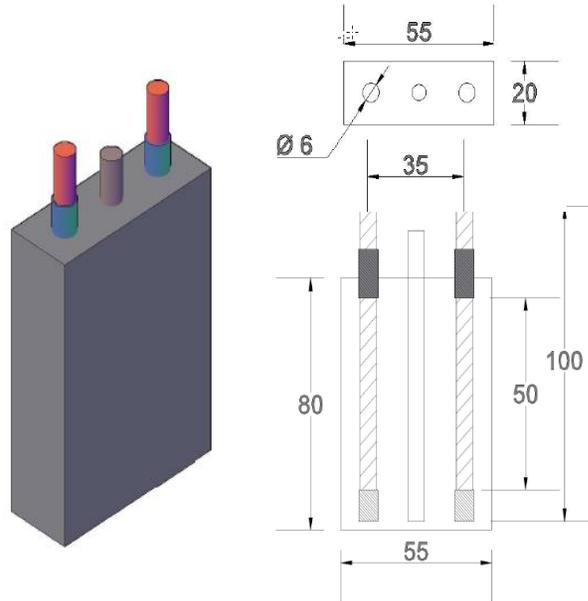


Figura 1. Espécimen para evaluar la durabilidad de los morteros de reparación (unidades en mm)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 3 muestra el comportamiento mecánico de cada mortero de reparación, se presentan los resultados de los ensayos a 28 días. Se puede observar que el mortero de reparación C1 muestra resistencia a la compresión más alta.

Por su parte, el mortero M1 le sigue en orden de resistencia siendo más alta que el mortero MR y los morteros comerciales C2 y C3. En cuanto a la resistencia a la flexión, el mortero C1 muestra las resistencias más altas, debido a la adición de fibras. El mortero comercial C2 es el más bajo en cuanto a su comportamiento mecánico. De acuerdo a diferentes investigaciones (Bjegovic 1990; Jiang, 2009), la menor resistencia de los morteros C2 y C3 es probablemente el resultado de sus adiciones.

Tabla 3. Comportamiento mecánico de los morteros de recuperación.

Mortero	Resistencia a Compresión 28 días (MPa)	Resistencia a Flexión 28 días (MPa)
MR	57,4	12,7
M1	65,8	11,7
M2	32,6	10,6
C1	75,4	16,4
C2	30,0	7,4
C3	49,2	14,3

La adherencia se evaluó por el tipo de falla que presentan los prismas, en la Tabla 4 se muestra la resistencia a la adherencia de cada mortero a los 28 días y su tipo de falla. Si existe buena adherencia, la muestra falla monolíticamente como una sola pieza, en lugar de fallar a lo largo de la unión.

El otro tipo de falla presentado es en la interface donde la falla por adherencia entre el concreto y el mortero se da antes de que falle alguno de los dos materiales. Los resultados de la resistencia a la adherencia muestran que los morteros con mejor comportamiento son el C1 y C3 debido a que la falla se presenta en conjunto con el concreto (monolítica), aunque la falla monolítica es deseable se puede observar que el mortero M1 presentó falla en la interface, pero la mayor resistencia por adherencia (Cabrera, 1997). El mortero C2 por su parte es el mortero menores propiedades mecánicas, en el ensayo por adherencia, la falla se presentaba inmediatamente al inicio de la prueba no permitiendo registro alguno por parte del equipo.

Tabla 4. Adherencia de los morteros de reparación

Mortero	Resistencia a la Adherencia 28 días (MPa)	Tipo de Falla
MR	22,2	Interface
M1	26,1	Interface
M2	13,4	Interface
C1	19,4	Monolítica
C2	0,0	Interface
C3	22,5	Monolítica

La Figura 2 muestra la relación de la permeabilidad al aire en el tiempo para los diferentes morteros. Se observa como la permeabilidad va en aumento en casi todos los morteros, siendo el mortero C3 el que presenta los menores valores de permeabilidad y sin aumentos en relación con el tiempo. El mortero C2 no se observa por los rangos de la escala, debido a que es demasiado permeable. Mientras que el mortero comercial C1 no pudo ensayarse debido a presentar una superficie rugosa y la presencia de agregados con mayor tamaño con respecto al resto de los morteros, pero como se observa en la carbonatación, no es posible medir su avance debido a que no presenta reacción alguna con la fenolftaleína (Figura 3).

Por lo tanto, se puede decir que el mortero M1 presenta buena resistencia al ingreso de CO₂, debido a que esta prueba ha mostrado tener buena correlación con otras pruebas de durabilidad tan buena como el mortero comercial C3. MR y M1 presentaron valores clasificados como permeabilidad baja (0,01-0.1) mientras que M2 presentó coeficientes de permeabilidad moderada (0,1-1,0), el resto de las clasificaciones se muestra en la tabla 5. Los resultados obtenidos mediante el método de permeabilidad rápida han demostrado buena correlación con pruebas de permeabilidad al agua, cloruros y carbonatación (Ebensperger, 2010).

Tabla 5. Clasificación de permeabilidad en función de kT (Ebensperger, 2010).

Clase	kT (10 ⁻¹⁶ m ²)	Permeabilidad
1	<0,01	Muy baja
2	0,01-0,1	Baja
3	0,1-1,0	Moderada
4	1,0-10	Alta
5	>10	Muy alta

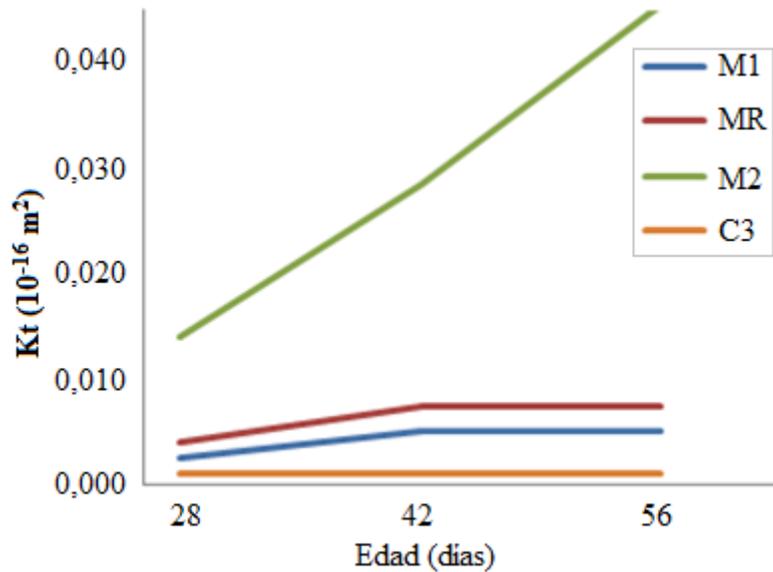


Figura 2. Evolución de la permeabilidad del mortero (Kt) con el transcurso del tiempo.

La profundidad de carbonatación da un indicativo de como el avance del CO₂ llega hasta el acero y logra una disminución importante en el pH del mortero; con el descenso de pH se inicia la despasivación de la capa iniciando la corrosión del acero. El recubrimiento para el acero es de 7 mm, el comportamiento de los morteros de reparación frente al avance de la carbonatación se muestra en la Figura 3, los morteros que presentan mayor avance en la carbonatación son M2 y C2, mientras que los morteros M1, C1 y C3 son los que muestran menor profundidad de carbonatación, estos resultados están relacionados con la permeabilidad de cada mortero, su contenido de CaO y con la presencia de algún polímero cuya práctica es frecuente por parte de los productos comerciales. El contenido de CaO se observa en la tabla 2, dicho contenido es mucho menor para la CV y su contenido en las mezclas en los morteros disminuye con el incremento de la sustitución. Es importante mencionar que para el mortero C1 no fue posible realizar mediciones debido a que no presentaba una reacción con el indicador de fenolftaleína. La carbonatación en M2 fue más alta debido a que el ingreso fue mayor medido con respecto a la cara corta de los especímenes influenciando el promedio final.

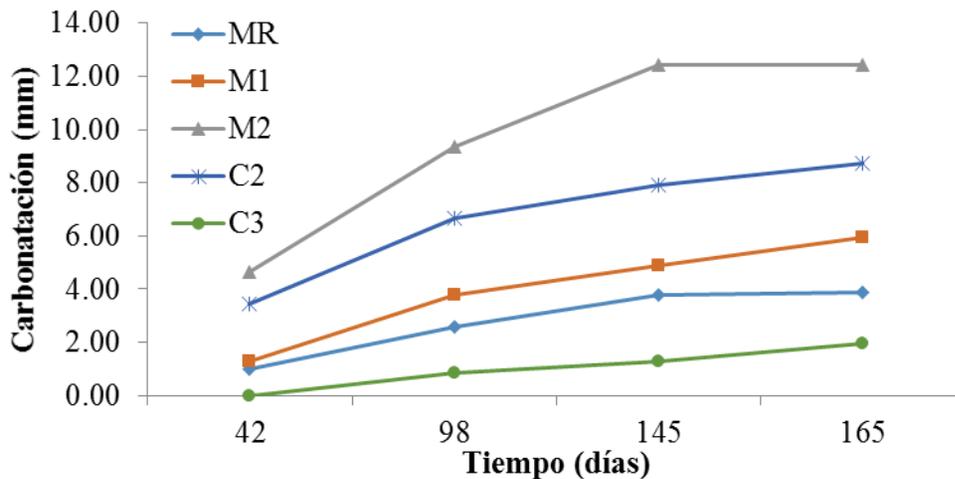


Figura 3. Profundidad de Carbonatación.

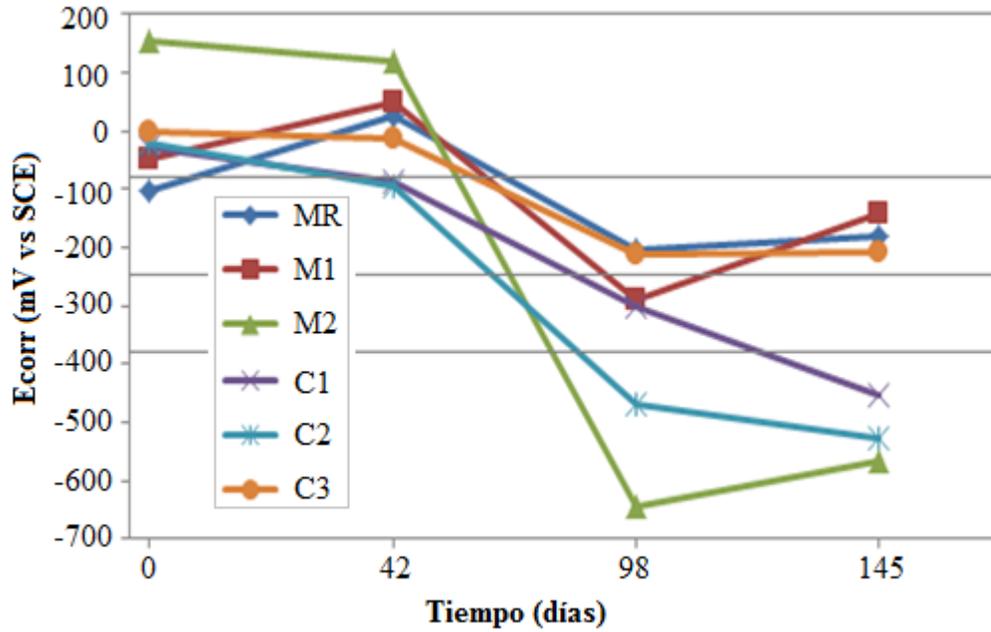


Figura 4. Evolución de Ecorr en el tiempo de exposición.

En la Figura 4 se muestran los potenciales de corrosión (E_{corr}) con referencia al Electrodo de Calomel Saturado (ECS). Los morteros M2, C1 y C2 muestran probabilidad alta de que se presente corrosión en el acero desde los 98 días, según lo especificado por la Tabla 6, de acuerdo con la norma ASTM C 876. Los morteros que presentan menor probabilidad de corrosión son MR, M1 y C3 para los cuales el comportamiento fue muy similar.

Tabla 6. Criterios para evaluar los potenciales de corrosión en el acero (ASTM C 876, 2009)

E_{corr} vs $CuSO_4$ (mV)	E_{corr} vs Calomel (mV)	Probabilidad de corrosión
> - 200	> - 80	10% que se presente
- 200 a - 350	- 80 a - 230	Zona incierta
< - 350	< - 230	90% que se presente
< - 500	< - 380	Corrosión severa

La evolución del i_{corr} durante el proceso de carbonatación se muestra en la Figura 5. De aquí es posible decir que, al inicio, los valores de i_{corr} a la primera edad muestran pasividad en el acero de refuerzo (menores a $0.1 \mu A/cm^2$) en todos los morteros. Sin embargo, como indica el E_{corr} , el acero dentro de los morteros M2, C1 y C2 se despasiva después de los 42 días.

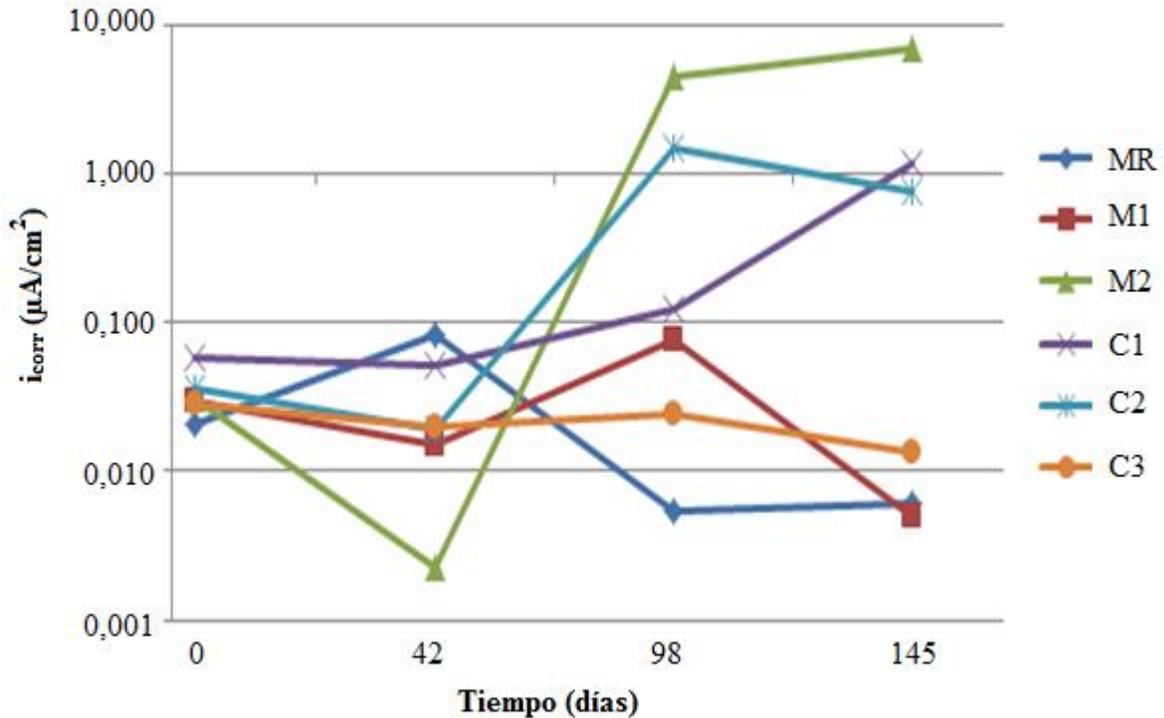


Figura 5. Velocidad de corrosión (i_{corr}) en el acero de refuerzo para cada mortero de reparación.

El comportamiento de los morteros M2 y C2 se comprueba debido a su bajo comportamiento mecánico relacionado con una mayor porosidad y una mayor profundidad de carbonatación. Mientras que el mortero C1 a pesar de tener excelentes propiedades mecánicas por el uso de fibras, resulta ser muy permeable permite el ingreso de CO_2 hasta el acero, lo cual genera valores de corrosión altos.

Como se mencionó anteriormente, el mortero C1 no presentó una reacción con el indicador de fenolftaleína que permitiera obtener una lectura de carbonatación adecuada.

4. CONCLUSIONES

En términos de desempeño y durabilidad los morteros que presentan el mejor comportamiento son M1 y C3. El mortero M1 con sustitución de CV de 20%p/p, mejora el comportamiento de la referencia (MR) frente al ataque de CO_2 , presentando mejor comportamiento incluso los morteros comerciales C1 y C2.

Desde el punto de vista de la corrosión, solo el mortero comercial C3 presenta buenas propiedades de durabilidad. Si se implementa el uso de morteros tradicionales con buenas propiedades de durabilidad, no es necesario el uso de un mortero comercial cuyo costo es alto por las adiciones y modificaciones que para algunas reparaciones se pueden considerar innecesarias.

Las pruebas de durabilidad llevadas a cabo, demuestran con mayor certeza la protección que da una reparación sobre la corrosión del acero de refuerzo. Estas pruebas sumadas a los ensayos de resistencia a compresión, flexión y adherencia nos dan la pauta para pensar que un mortero tradicional (cemento-arena con sustituciones minerales), puede comportarse como una reparación efectiva y duradera.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONACYT por el apoyo económico a lo largo del proyecto, (Proyecto CONACYT Ciencia Básica No 155363). Al personal que nos dio acceso para la exposición de los especímenes en el ambiente Industrial.

6. REFERENCIAS

- Andrade, C., Feliu, S. (1989). *“Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras”*, Publicado ICCT, Madrid, España.
- ASTM C 109 (1999), *“Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars” (Using 50 mm Cube Specimens)*, ASTM International.
- ASTM C 348 (1997), *“Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic Cement Mortars”*.
- ASTM C 876 (2009), *“Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”*.
- ASTM G 1 (2003), *“Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens”*. ASTM International.
- ASTM G 59 (2014), *“Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements”*. ASTM International.
- Bjegovic, D., Ukraincik, V., Beus, Z. (1990). *“Evaluation and Repair of Concrete Structure in Urban Environment: Case Study”*, Special Publication 122: pp. 427-450.
- Cabrera, J. G., Al-Hasan, A. S. (1997). *“Performance properties of concrete repair materials”*, Construction and Building Materials 11, 5: pp 283-290.
- Decter, M. H. (1997). *“Durable concrete repair—Importance of compatibility and low shrinkage”*, Construction and building materials 11, 5: pp. 267-273.
- Duran-Herrera, A., Mendoza-Rangel, J. M., De-Los-Santos, E. U., Vázquez, F., Valdez, P., & Bentz, D. P. (2015). *“Accelerated and natural carbonation of concretes with internal curing and shrinkage/viscosity modifiers”*, Materials and Structures 48, 4: pp 1207-1214.
- Ebensperger, L., & Torrent, R. (2010). *“Medición in situ de la permeabilidad al aire del hormigón: status quo”*, Revista ingeniería de construcción 25,3: pp. 371-382.
- Fernández Cánovas M. (1989). *“Hormigón”*, Servicio de publicaciones del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 3ª edición.
- Emmons, P. H., Vaysburd, A. M., & McDonald, J. E. (1993). *“A rational approach to durable concrete repairs”*, Concrete international Detroit 15: pp. 40-40.
- Jiang, C., Chen, D., Wu, Y., & Zhang, W. (2009). *“Study on the Mechanisms and Properties of Repair Mortar for Hydraulic Concrete Surface”*, Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering: pp. 1619-1624.
- Kay, E. A., & Regan, J. (1987). *“Acceptance and compliance testing of patch repair systems--proceedings of the second international conference on deterioration and repair of reinforced concrete in the arabian gulf”*, Bahrain, Publication of: Bahrain Society of Engineers. 1,2: pp. 11-13.
- Kucharczyková, B., Misák, P., & Vymazal, T. (2010). *“The Air-permeability measurement by torrent permeability tester”*, In Proceedings of the 10th international conference on modern building materials, structures and techniques, Vilnius: pp. 162-166.
- Momayez, A., Ehsani, M. R., Ramezani-pour, A. A., & Rajaie, H. (2005), *“Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials”*. Cement and Concrete Research 35, 4: pp. 748-757.

Torrent, R. J. (1992). "*A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site*", *Materials and Structures* 25.6: pp. 358-365.

Treadaway K. W. J. (1987) "*Testing the properties of materials for concrete repair- A review*". Proceedings of the Second International Conference on Deterioration and Repair of Reinforced Concrete in the Arabian Gulf.



Compuestos cementíceos de alto desempeño para su aplicación como sustrato de transición en vigas

V. J. Ferrari¹, A. P. Arquez², J. B. De Hanai²

¹Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Brasil.

²Escola de Engenharia de Sao Carlos, Universidade de Sao Paulo, Brasil.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i1.115>

Artículo recibido el 22 de septiembre de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 02 de enero de 2016. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2016.

© 2016 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 6, No. 1, Enero – Abril 2016, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat_int@gmail.com, www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de enero de 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMEN

Este estudio muestra el desarrollo y análisis del comportamiento de los materiales compuestos de cemento reforzado con fibras de alto rendimiento. El material descrito se desarrolló específicamente para su aplicación como sustrato de transición, o capa de reparación de la formación de la brida tensada vigas de hormigón reforzado con polímeros de flexión reforzado con fibras de carbono (PRFC). Diecinueve compuestos diferentes fueron producidos por el proceso de hibridación. Se varió la cantidad de fibras cortas y microfibras de acero. Para analizar el comportamiento de los ensayos de flexión en tres puntos materiales prismas se realizaron Jagged. La respuesta del material se analizó teniendo en cuenta parámetros de tenacidad a la flexión y (fractura). Materiales compuestos de alto rendimiento evidencia a través de un comportamiento pseudo- endurecimiento.

Palabras clave: compuestos cementíceos; vigas de concreto; sustrato de transición.

ABSTRACT

This study presents the development and analysis of the behavior of high performance cementitious compounds reinforced with fibers. The material described was specifically developed for its application as a transition substrate, meaning, a repair layer that forms the tensed span of the flexion reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymers (CFRP). Nineteen different compounds were produced by the hybridization process. The volume of the short fibers and of the steel microfibers varied. To analyze the behavior of the flexural material, tests were done in three points in tests tubes with their notches. The response of the material was analyzed considering the tenacity parameters (to flexion and fracture). The high performance of the compounds through the behavior of pseudo-hardening was confirmed.

Keywords: cementitious compounds; concrete beams; transition substrate.

RESUMO

Neste estudo apresenta-se o desenvolvimento e a análise do comportamento de compostos cementíceos de elevado desempenho reforçados com fibras. O material descrito foi especificamente desenvolvido para aplicação como um sustrato de transição, ou seja, camada de reparo que forma o banzo tracionado de vigas de concreto reforçadas à flexão com polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC). Dezenove diferentes compostos foram produzidos pelo processo de hibridização. Variou-se o volume de fibras curtas e de microfibras de aço. Para analisar o comportamento do material à flexão, ensaios em três pontos em prismas entalhados foram realizados. A resposta do material foi analisada considerando-se parâmetros de tenacidade (flexional e ao fraturamento). Ficou evidenciado o elevado desempenho dos compostos através de comportamento de pseudo-encruamento.

Palavras-chave: compostos cementíceos; vigas de concreto; substrato de transição.

Autor de contacto: Vladimir Ferrari (vladimirjf@hotmail.com)

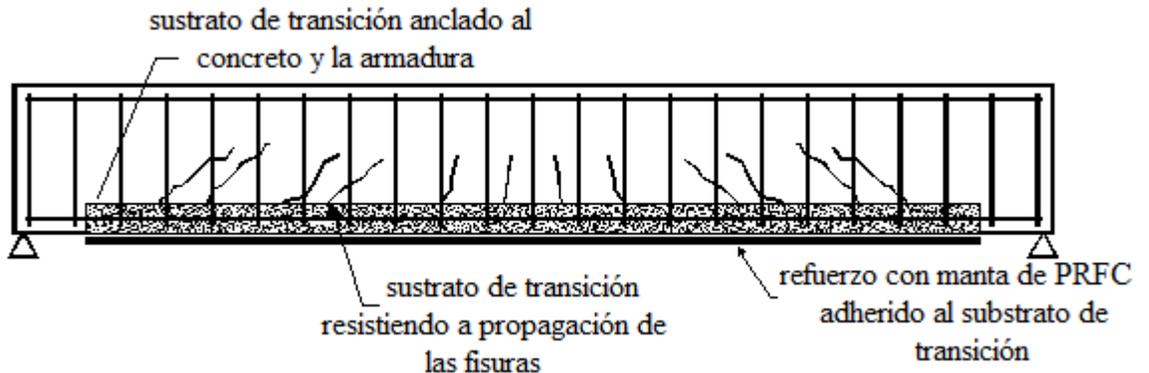
1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Ferreira (2012), las modificaciones resultantes de la adición de fibras de acero al concreto, en porciones relativamente bajas (máximo de 2%), son restringidas a la fase posterior al pico histórico de carga. En esas condiciones, las fibras de acero no son suficientes para inhibir el proceso de fisuración de la matriz que ocurre antes de la aplicación de la carga máxima (crecimiento sub-crítico de la fisura).

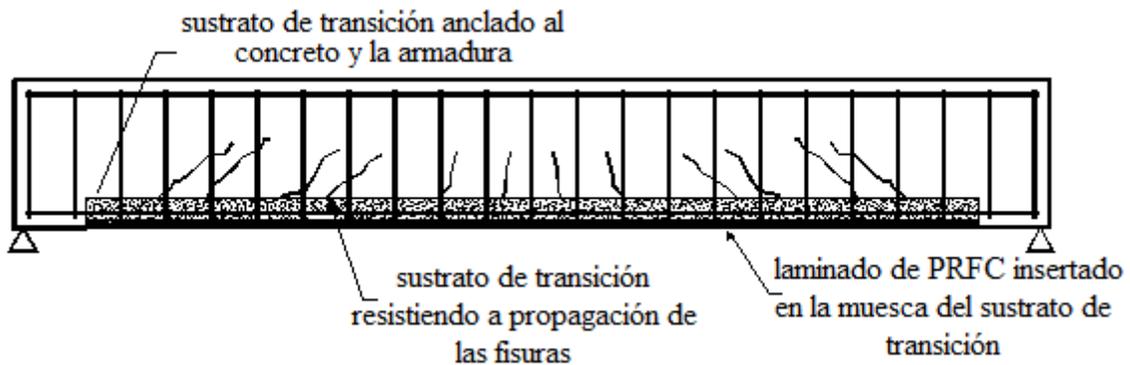
El efecto de la incorporación de microfibras de acero, las fibras cortas aquí estudiadas son un intento por mejorar el comportamiento de los compuestos cementíceos en la fase pre-pico del histórico de carga.

Esos materiales fueron específicamente desarrollados para ser aplicados como un sustrato de transición (Figura 1). Diecinueve diferentes compuestos fueron preparados en dos fases: Fase I (compuestos que fueron desarrollados para aplicación como un sustrato de transición de vigas de concreto armado reforzadas por la colocación externa de mantas de PRFC – Figura 1.a) y Fase II (compuestos desarrollados para su aplicación como sustrato de transición de vigas reforzadas por la inserción de láminas de PRFC en las muescas ejecutadas en ese sustrato – Figura 1.b).

En la práctica de la ingeniería es común encontrar vigas de concreto armado con la cara inferior traccionada deteriorada por acciones mecánicas, efectos de corrosión de la armadura o fisuración. En tales casos, el proceso de refuerzo de la viga debe ser precedido por el de la recuperación de la cara. Para ese fin, Ferrari (2012) propone producir un compuesto de elevado desempeño a base de cemento destinado a formar el sustrato de transición como el indicado en la Figura 1. El concepto del sustrato de transición es crear una nueva cara traccionada formado por el compuesto cementíceo con características más apropiadas a la adherencia del refuerzo polimérico.



a) Refuerzo externo con manta de PRFC adherido al sustrato de transición (Ferrari, 2012)



b) laminado de PRFC insertado en la muesca del sustrato de transición (Arquez, 2010)

Figura 1. Sustrato de transición de viga de concreto armado reforzada con PRFC

En este estudio, nuevos resultados fueron adicionados a los presentados por Ferrari (2012). Los nuevos resultados fueron obtenidos a través del desarrollo y el análisis de compuestos cementíceos para formar el sustrato de transición de vigas reforzadas a través de la inserción de láminas de PRFC en la muesca del nuevo sustrato.

2. COMPUESTOS CEMENTÍCEOS DE ELEVADO DESEMPEÑO

Para evaluar la resistencia a la tracción en la flexión de los compuestos cementíceos, se realizaron ensayos en tres puntos de las probetas prismáticas (150mm x 150mm x 500mm) dotados de una muesca central con pase directo y siguiendo las recomendaciones de la Rilem (2002). La Figura 2 muestra la configuración general del ensayo que fué conducido controlando el desplazamiento de la abertura de la fisura en la entrada de dicha muesca (CMOD – *crack mouth opening displacement*).

En la fase I, trece compuestos fueron analizados como se muestra en la Tabla 1. Los compuestos fueron constituidos por diferentes volúmenes y tipos de fibras de acero y también por diferentes tipos de matriz cementícea (mortero y microconcreto). Los compuestos fueron divididos en grupos, siendo cada uno formado por tres probetas prismáticas con las mismas características. En la fase II, un grupo adicional formado por seis compuestos (todos hechos de micro concreto) fueron estudiados.

La fibra de acero especificada por “A” tiene 25 mm de largo y diámetro de 0,75 mm. La fibra del tipo “C”, producida específicamente para esta investigación, tiene 13 mm de largo y diámetro de 0,75 mm. Esa fibra ha sido designada como microfibras de acero (Figura 3).

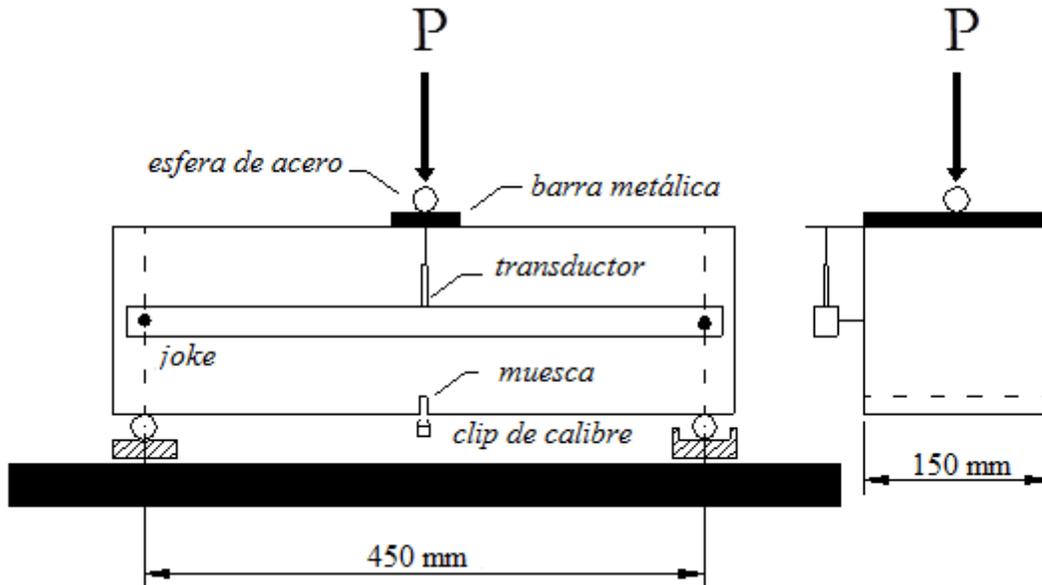


Figura 2. Configuración general del ensayo

Tabla 1. Compuestos analizados

Matriz	Fase	Grupo	Compuestos	Volumen de fibras	Tipo fibras	Material	Edad (días)
Mortero (A)	I	1	CPA	0%	-	Mortero	29
		2	CPA1A	1%	A	Mortero	29
		3	CPA1.5A	1.5%	A	Mortero	29
		4	CPA2A	2%	A	Mortero	29
		5	CPA1.5A0.5C	1.5%+0,5%	A+C	Mortero	28
		6	CPA1.5A1.5C	1.5%+1.5%	A+C	Mortero	28
		7	CPA1.5A2.5C	1,5%+2.5%	A+C	Mortero	28
		8	CPA1.5A3.5C	1.5%+3.5%	A+C	Mortero	28
Microconcreto (M)	I	9	CPM	0%	-	microconcreto	28
		10	CPM1A	1%	A	microconcreto	28
		11	CPM1A1C	1%+1%	A+C	microconcreto	28
		12	CPM1A2C	1%+2%	A+C	microconcreto	28
		13	CPM1A2.5C	1%+2.5%	A+C	microconcreto	28
Microconcreto (M)	II	1	CPM1A1C	1%+1%	A+C	microconcreto	50
		2	CPM1A1.5C	1%+1.5%	A+C	microconcreto	50
		3	CPM1A2C	1%+2%	A+C	microconcreto	50
		4	CPM1.5A1C	1,5%+1%	A+C	microconcreto	50
		5	CPM1.5A1.5C	1.5%+1.5%	A+C	microconcreto	50
		6	CPM1.5A2C	1.5%+2%	A+C	microconcreto	50

CP X Y Y
 corpo-de-prova ——— | ——— | ——— | ——— tipo de fibras
 Argamassa (A) ou ——— | ——— | ——— | ——— volume fibras
 Microconcreto (M)

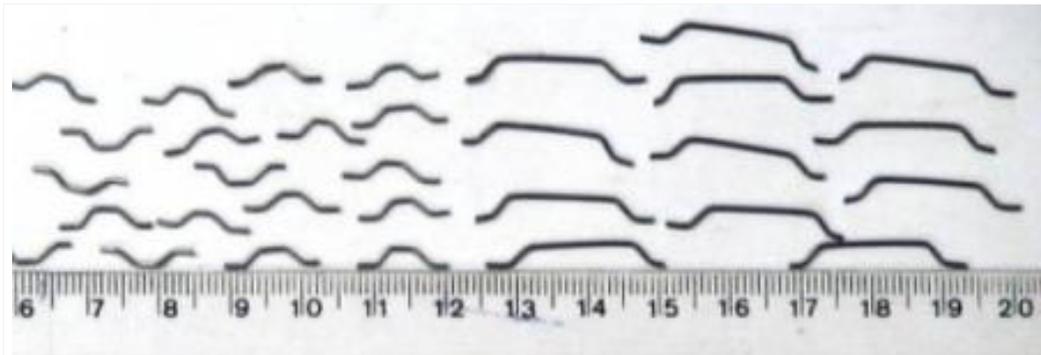


Figura 3. Microfibras de acero (izquierda) y fibras convencionales de acero (derecha)

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Ensayos de compresión en probetas cilíndricas

Los valores de las propiedades mecánicas de los compuestos están en la Tabla 2: resistencia promedio a la compresión (f_{cm}), resistencia promedio a tracción por compresión diametral ($f_{ctm,sp}$) y módulo de elasticidad (E_{cs}).

Tabla 2. Resultados promedios de la caracterización de los compuestos sobre resistencia a la compresión

Matriz	Fase	Grupo	Compuestos	f_{cm} (MPa)	$f_{ctm, sp}$ (MPa)	E_{cs} (GPa)
Mortero (A)	I	1	CPA	52,5	3,1	23,8
		2	CPA1A	43,8	3,7	22,7
		3	CPA1.5A	42,2	3,7	23,1
		4	CPA2A	45,7	4,9	24,0
		5	CPA1.5A0.5C	49,2	4,4	28,2
		6	CPA1.5A1.5C	47,2	4,9	32,3
		7	CPA1.5A2.5C	43,6	4,8	31,0
		8	CPA1.5A3.5C	42,8	4,9	29,1
Microconcreto (M)	I	9	CPM	62,3	3,8	35,2
		10	CPM1A	42,0	3,0	30,6
		11	CPM1A1C	40,6	3,7	26,3
		12	CPM1A2C	42,8	5,1	30,0
		13	CPM1A2.5C	20,8	2,8	19,9
	II	1	CPM1A1C	33,2	2,5	32,3
		2	CPM1A1.5C	30,6	2,2	31,0
		3	CPM1A2C	33,4	3,2	32,4
		4	CPM1.5A1C	28,3	2,6	29,8
		5	CPM1.5A1.5C	30,5	2,9	31,0
		6	CPM1.5A2C	29,2	2,4	30,2

3.2. Ensayos de flexión – cargas y resistencias

La tenacidad a flexión de los compuestos fue determinada siguiendo las recomendaciones de la Rilem (2002) y los resultados son los indicados en la Tabla 3. El criterio para la evaluación de la tenacidad es basado en la capacidad de absorción de energía, entendida como el área sobre la curva de carga (P) *versus* el desplazamiento vertical (δ).

Según la Rilem, la contribución de las fibras para la tenacidad del compuesto es evaluada a través de la sustracción de la tenacidad que viene de la respuesta de la matriz cementícea. En la Figura 4 se observa una respuesta típica del comportamiento a flexión de compuestos con fibras, en conjunto con las expresiones utilizadas para calcular las resistencias equivalentes a tracción en la flexión ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$) y de las resistencias residuales en flexión ($f_{R,1}$ e $f_{R,4}$). Los significados de los parámetros presentados en esa figura son:

- F_L – es la fuerza máxima de *offset* dentro del intervalo de $\delta=0,05$ mm. Ese intervalo es obtenido con el uso de una recta paralela a la tangente inicial, pasando por el punto que caracteriza el desplazamiento δ de *offset*;
- δ_L – es el valor del desplazamiento vertical correspondiente a F_L ;
- $f_{fct,L}$ – es la tensión correspondiente a la fuerza F_L , dado por la expresión:

$$f_{fct,L} = \frac{3.F_L.L}{2.b.h_{sp}^2};$$

- L – es el vano libre de la probeta y b es su longitud;
- h_{sp} – distancia del tope de la muesca hasta la cara superior de la probeta;
- D_{BZ}^b , $D_{BZ,2}^f$ e $D_{BZ,3}^f$ – cuota de absorción de energía por la matriz y por las fibras, respectivamente. Son calculadas a través del área sobre la curva P- δ hasta desplazamientos específicos (ver Figura 4);
- $F_{R,1}$ y $F_{R,4}$ – valores de fuerza correspondientes a los desplazamientos $\delta_{R1}=0,46$ mm y $\delta_{R4}=3,00$ mm. Son valores utilizados para el cálculo de las resistencias residuales de los compuestos.

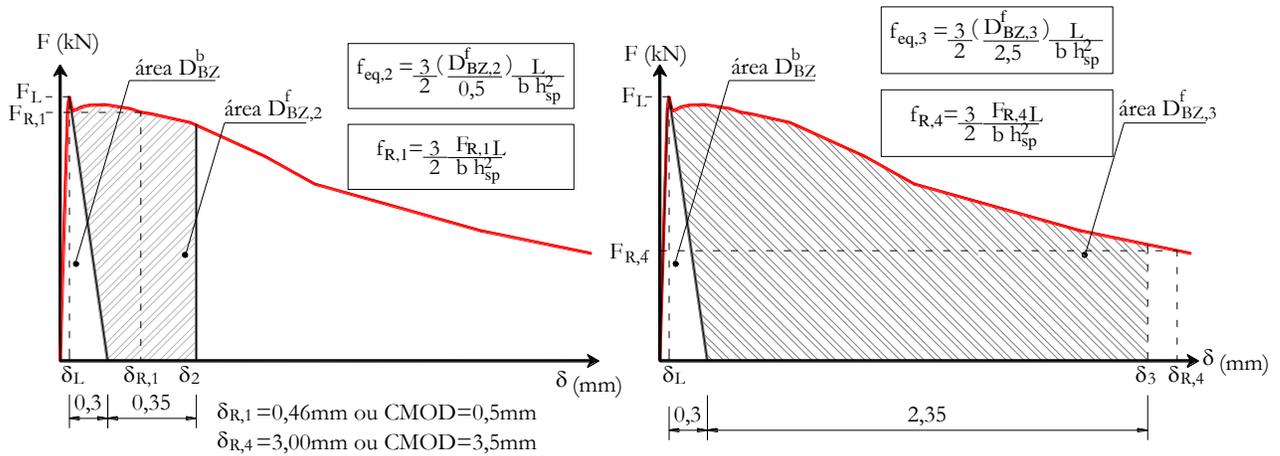


Figura 4 – Criterios de la Rilem (2002) para la evaluación del comportamiento de materiales con

Aún de acuerdo con la Rilem (2002), las cuotas o parcelas de tenacidad ($D_{BZ,2}^f$ e $D_{BZ,3}^f$) son transformadas en resistencias flexionales equivalentes ($f_{eq,2}$ y $f_{eq,3}$) para los diferentes niveles de desplazamientos δ_2 y δ_3 . La capacidad de carga del material en relación a un valor pre-definido de flecha es evaluada a través del concepto de resistencias flexionales residuales ($f_{R,1}$ y $f_{R,4}$).

En la Tabla 3 es presentado el valor de la fuerza (F_M), que corresponde a la fuerza máxima alcanzada por el compuesto a lo largo del histórico de carga.

Tabla 3. Cargas y resistencias

Matriz	Fase	Compuestos	Cargas (kN)				Resistencias (MPa)				
			F _L	F _M	F _{R,1}	F _{R,4}	f _{ct,L}	f _{eq,2}	f _{eq,3}	f _{R,1}	f _{R,4}
Mortero (M)	I	CPA	8,0	8,0	1,3	-	2,3	-	-	0,4	-
		CPA1A	13,	13,4	12,5	5,2	3,9	3,3	2,6	3,6	1,5
		CPA1.5A	13,	16,1	16,0	6,1	3,7	4,6	3,2	4,5	1,7
		CPA2A	14,	17,6	17,4	7,6	4,6	5,5	4,2	5,5	2,4
		CPA1.5A0.5	16,	17,8	17,2	9,3	4,6	4,9	4,0	4,8	2,6
		CPA1.5A1.5	16,	21,0	20,9	9,4	4,8	6,5	4,8	6,3	2,8
		CPA1.5A2.5	22,	23,7	23,5	12,8	6,1	6,5	5,0	6,5	3,6
		CPA1.5A3.5	20,	21,4	20,8	6,1	5,5	5,7	3,8	5,7	1,7
Microconcreto (M)	I	CPM	14,	14,2	1,3	-	4,0	-	-	0,4	-
		CPM1A	12,	12,1	7,5	3,7	3,3	2,0	1,6	2,1	1,0
		CPM1A1C	17,	18,5	16,9	7,5	5,2	5,1	3,7	5,0	2,2
		CPM1A2C	19,	21,9	19,7	8,0	5,5	5,7	4,1	5,7	2,3
		CPM1A2.5C	10,	10,0	6,3	2,3	2,9	1,5	1,1	1,9	0,7
	II	CPM1A1C	12,	14,3	11,4	1,0	3,6	3,5	2,4	3,4	0,3
		CPM1A1.5C	12,	15,2	12,1	2,7	3,5	3,8	2,5	3,6	0,8
		CPM1A2C	14,	18,9	15,9	1,8	4,1	4,9	3,0	4,5	0,5
		CPM1.5A1C	12,	18,5	16,0	2,4	3,7	5,0	2,4	4,6	0,7
		CPM1.5A1.5	15,	19,8	17,5	1,3	4,3	5,3	3,6	5,0	0,4
		CPM1.5A2C	11,	15,6	13,4	3,2	3,2	4,4	2,9	4,0	1,0

Queda evidenciado que la adición de fibras de acero contribuye significativamente para el aumento de la resistencia definida por el parámetro ($f_{ct,L}$) que representa la cuota de resistencia del compuesto proveniente de la contribución de la matriz cementicia.

Aún es posible afirmar que la adición de microfibras a las fibras de acero resulto en mejoras aún más significativas en esa propiedad para los compuestos de mortero en relación a los de micro concreto.

El desempeño de los compuestos de mortero proveniente de la cuota de contribución de las fibras ($f_{eq,2}$ y $f_{eq,3}$) fue mejorado con el aumento del volumen de la fibra A y potencializado con la adición de las microfibras de acero.

Para los compuestos de micro concreto es evidente el incremento de los niveles de las resistencias flexionales equivalentes ($f_{eq,2}$ y $f_{eq,3}$) por medio de la adición de las microfibras de acero a la fibra A. En gran parte de esos compuestos, la resistencia ($f_{eq,2}$) supera el valor de la resistencia ($f_{ct,L}$), mostrando ganancias significativas de resistencia posterior a la fisuración de la matriz.

3.3. Curvas P-CMOD

Las curvas P-CMOD de los compuestos de mortero son presentados en la Figura 5. La presencia de fibras y microfibras de acero en la matriz cementicia de mortero mejoro su comportamiento, traducido en términos de aumento de la capacidad de absorción de energía e incremento de los niveles de resistencia, antes y después de la fisuración de la matriz.

El aumento en el volumen de fibras de tipo “A”, proporcionó una mejora gradual en la ductilidad de los compuestos de mortero. Así mismo, la incorporación de las microfibras de acero a las fibras “A” contribuyó aún más en ese sentido.

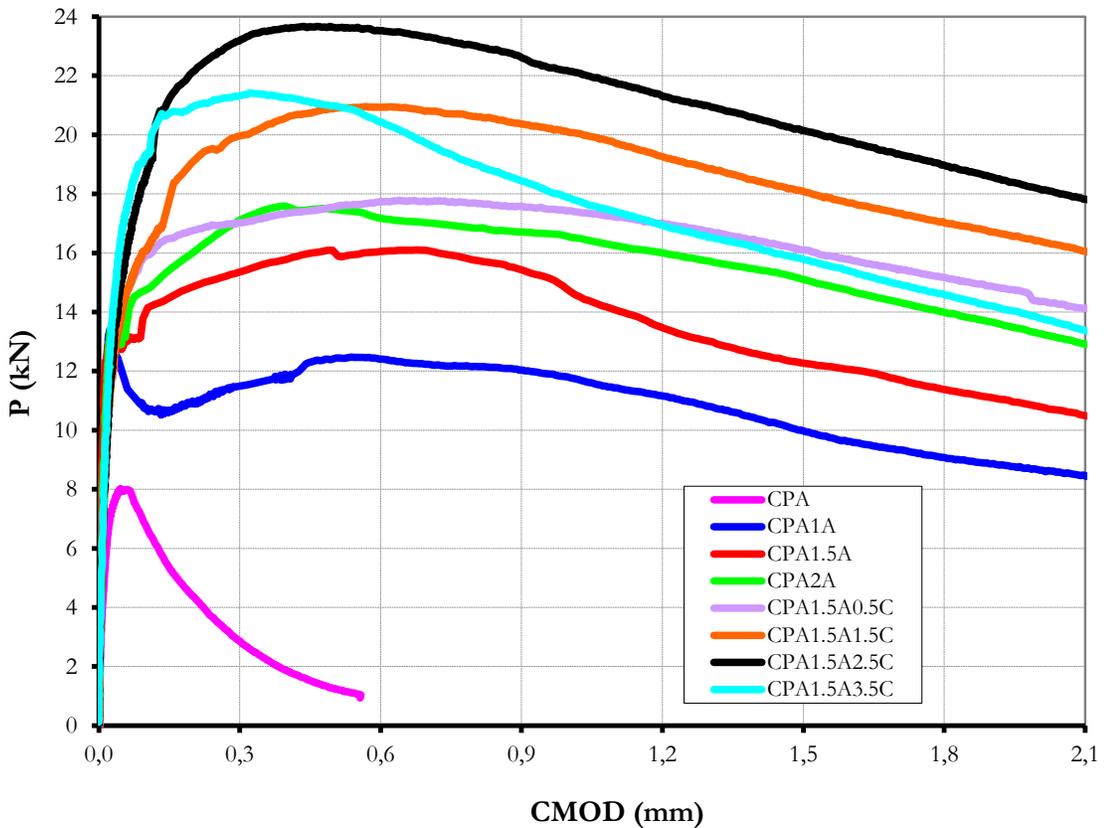


Figura 5. Curvas P-CMOD de los compuestos de mortero

Las curvas de los compuestos de micro concreto son presentadas en la Figura 6. La presencia de fibras y microfibras mejoraron principalmente la capacidad de absorción de energía de esos compuestos. La capacidad resistente fue disminuida con la presencia aislada de la fibra “A” (compuesto CPM1A).

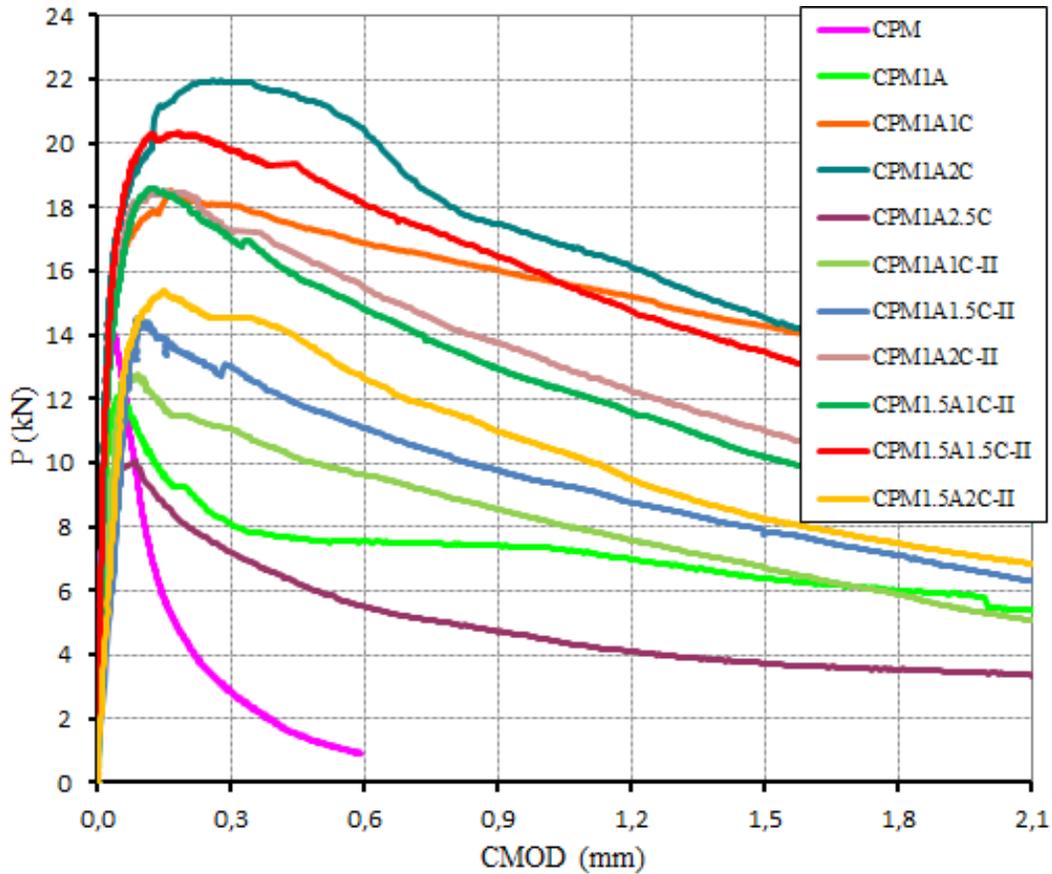


Figura 6. Curvas P-CMOD de los compuestos de micro concreto

3.4. Curvas de resistencia a la fractura

En la Figura 7 se muestran las curvas de resistencia a la fractura de los compuestos de mortero. En las Figuras 8 y 9 se presentan las curvas de resistencia de los compuestos de micro concreto producidos en las fases I y II, respectivamente. Donde “ K_R ” representa la resistencia al avance de la fisura (resistencia a la fractura del compuesto) y “ α ” es la profundidad de la fisura (a) normalizada relativamente a la altura (W) de la probeta, es decir, $\alpha = a/W$.

La ganancia de resistencia a la fractura quedó evidenciada principalmente en el régimen de ruptura post-pico (fuerza máxima), aumentando entre los diferentes compuestos con el aumento del rango de fibras metálicas incorporadas a cada uno de ellos. Exceptuando para los compuestos CPA1.5A3.5C y CPM1A2.5C en los que sus resistencias a la fractura a lo largo del histórico de carga fueron inferiores a la de los compuestos CPA1.5A2.5C y CPM1A2C, respectivamente.

También es posible notar que, en la fase de post-pico de carga, los tramos finales de las curvas de resistencia para los compuestos de mortero (CPA1.5A1.5C e CPA1.5A2.5C) y de micro concreto (CPM1A1C y CPM1A2C) son ascendentes, lo que representa la elevada ganancia de resistencia a la propagación de la fisura dado por la presencia de las fibras y microfibras de acero. Tal hecho está asociado a la disipación de energía del proceso de arrancamiento de las fibras y microfibras de la matriz cementicia.

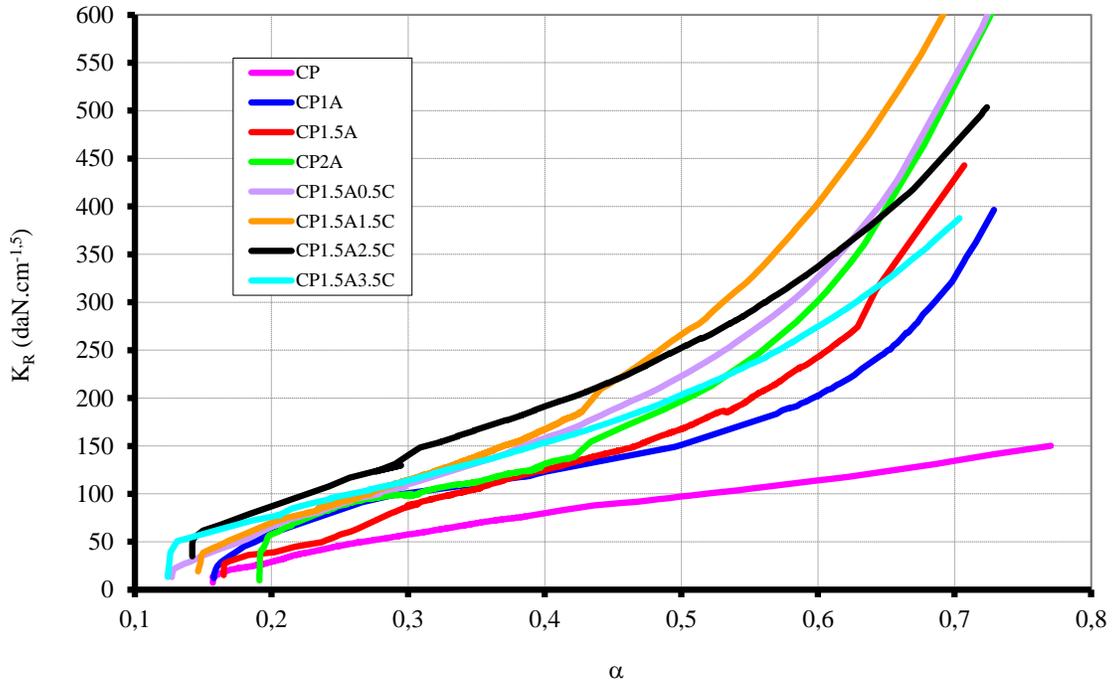


Figura 7. Curvas de resistencia a la fractura de los compuestos de mortero

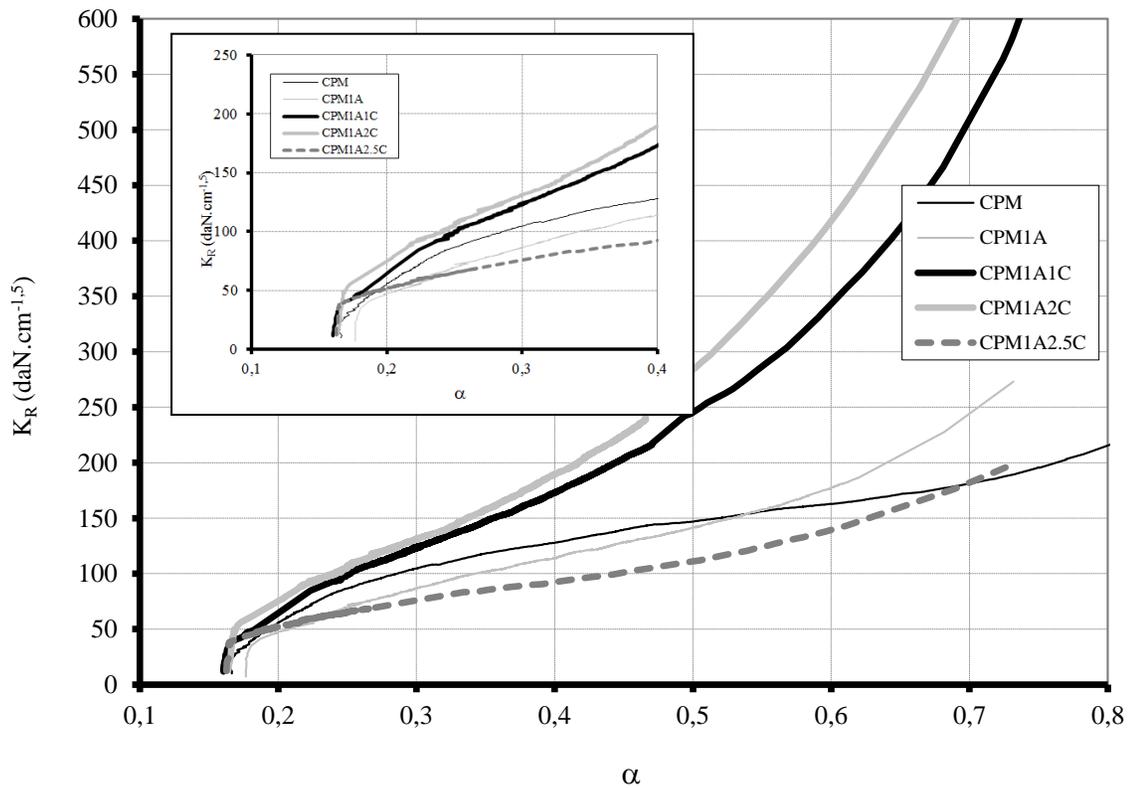


Figura 8. Curvas de resistencia a la fractura de los compuestos de micro concreto – Fase I

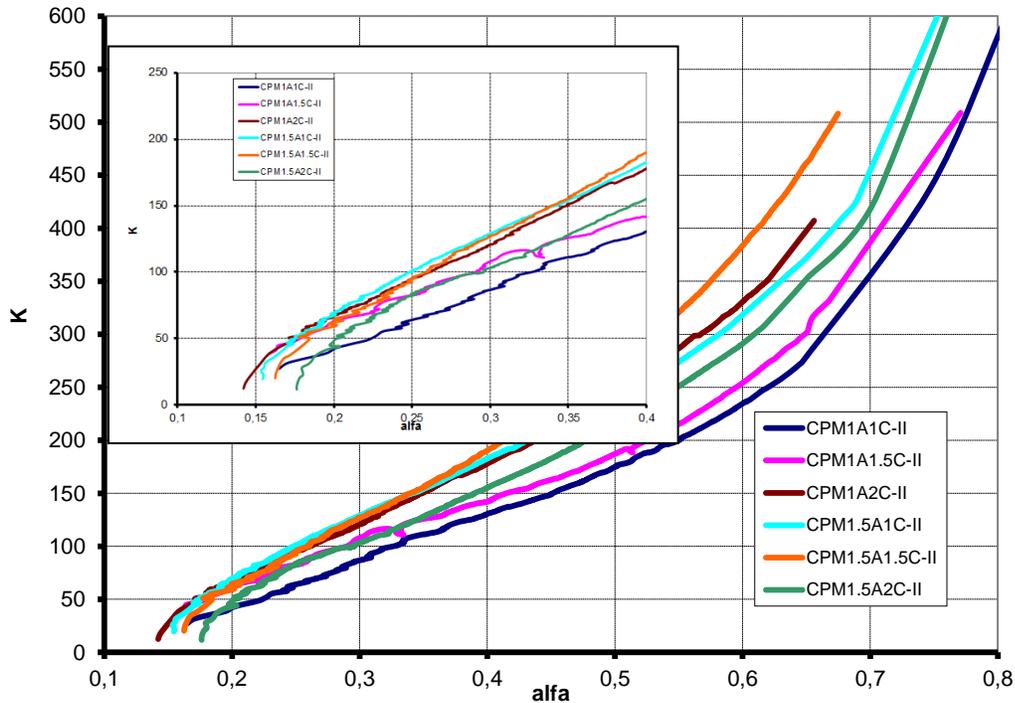


Figura 9. Curvas de resistencia a la fractura de los compuestos de micro concreto – Fase II

4. CONCLUSIONES

De la investigación que fue elaborada, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

1. El proceso de hibridización es una alternativa interesante para la aplicación en la recuperación del vano traccionado de vigas de concreto, una vez que, la adición de microfibras de acero a las fibras cortas de acero aumenta la resistencia a la tracción en la flexión y aumentan la tenacidad flexional de los compuestos de mortero y de micro concreto;
2. Con la fisuración de la matriz, la transferencia de tensiones fue facilitada por las microfibras que, una vez dispersas en la matriz, condicionaron la propagación de la fisura a un aumento del nivel de carga del compuesto;
3. Considerándose las características de pseudo-endurecimiento y su aplicación específica, el compuesto CPM1A2C fue el que presentó las mejores propiedades entre los producidos en la fase I;
4. Entre los compuestos producidos en fase II, se destaca el CPM1.5A1.5C-II que, a través de la hibridización resultó en aumentos considerables de la carga máxima como también en la resistencia a la fractura y flexión.

5. REFERENCIAS

Ferreira, L. E. T., Bittencourt, T. N., Souza, J. L. A. O., Gettu, R. (2012), “*R-Curve behavior in notched beam tests of rocks*”, Engineering Fracture Mechanics, N. 32, pp 27-40.

Ferrari, V. J., Hanai, J. B. (2012), “*Flexural strengthening of reinforced concrete beams with carbon fibers reinforced polymer (CFRP) sheet bonded to a transition layer of high performance cement-based composite*”, Ibracon Structures and Materials Journal, Vol. 5, N. 5, pp 596-626.

Arquez, A. P. (2010), Dissertação mestrado, “*Aplicación de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de acero para reforço à flexión de vigas de concreto armado*”, Escola de Engenharia de Sao Carlos, Universidade de Sao Paulo.

Rilem TC 162-TDF (2002). *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Bending test*, Materials and Structures, Vol. 35, pp 579-582.



Resistencia a la compresión de concretos con escoria de alto horno. Estado del arte revisado

J. A. Cabrera-Madrid¹, J. I. Escalante-García², P. Castro-Borges³

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, Blvd. Belisario Domínguez Km 1081, s/n, Terán, 29050 Tuxtla Gutiérrez; Tel: (961) 6178000, 6150322, 6150527.

² Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Saltillo, Carretera Saltillo - Monterrey km 13, PO box 663, Saltillo, Coahuila CP 25 000, México.

³ Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Mérida, Antigua Carretera a Progreso Km. 6, 97310 Mérida, Yucatán, México; Tels. (999) 942-94-00. Fax: (999) 981-29-23.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i1.116>

Artículo recibido el 25 de noviembre de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 15 de enero de 2016. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2016.

© 2016 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 6, No. 1, Enero – Abril 2016, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat_int@gmail.com, Página Web: www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de última modificación: 30 de enero de 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMEN

Se realizó una revisión del estado del arte del sistema cementante CP-EAH, enfatizando su efecto en la resistencia mecánica de compresión del concreto. El aprovechamiento de las características cementantes de la EAH con altos niveles de reemplazo resulta viable, pudiendo mejorar la resistencia a compresión y en algunos casos la resistencia a la corrosión del acero, dicho mejoramiento dependerá de la cantidad de EAH y del ambiente de exposición del concreto. En éste trabajo se confirmaron como benéficos los reemplazos de EAH hasta de un 70% en microclimas húmedos o ambientes marinos, y hasta 50% en ambientes propensos a carbonatación. En estos rangos se puede lograr una eficiencia del reemplazo mayor con respecto a la resistencia a la compresión.

Palabras claves: escoria; carbonatación; subproductos industriales; corrosión.

ABSTRACT

A state-of-the-art revision of the BFS-PC cementing system was done, emphasizing its effect on the mechanical compressive strength of the concrete. The use of the cementing characteristics of the BFS with high levels of replacements is viable, making it possible to improve the compressive strength, and in some cases, the resistance to the corrosion of the steel; said improvement will depend on the amount of BFS and on the exposure environment of the concrete. In this work, the replacements of BFS were confirmed as beneficial, up to 70% in humid microclimates or marine environments, and up to 50% in environments susceptible to carbonation. In these ranges, higher replacement efficiency with regard to resistance to compression can be achieved.

Keywords: slag; carbonation; industrial byproduct; and corrosion.

RESUMO

Foi realizada uma revisão do estado da arte do sistema aglomerante CP-EAH, enfatizando seu efeito na resistência mecânica de compressão do concreto. O aproveitamento das características aglomerantes da EAH com altos níveis de substituição resultou viável, podendo melhorar a resistência à compressão e em alguns casos a resistência contra a corrosão das armaduras. As melhoras observadas dependeram da quantidade de EAH e do ambiente de exposição do concreto. Foram confirmados como positivos as substituições de até um 70% de EAH, em microclimas húmidos ou ambientes marinhos, e até 50% em ambientes propensos a carbonatação. Nestes intervalos é possível obter uma eficiência maior da substituição com respeito à resistência à compressão.

Palavras-chave: escória; carbonatação; subprodutos industriais; corrosão.

Autor a contactar: Pedro Castro Borges (pcastro@cinvestav.mx)

1. INTRODUCCION

Desde las primeras civilizaciones, los materiales con cierta capacidad de adherencia (material cementante) han sido fundamentales para el desarrollo y evolución de las construcciones. Es así que durante el transcurso de la historia el hombre ha tratado de buscar otros materiales cementantes para obtener mejores propiedades mecánicas y durabilidad. Esta evolución ha llevado a que el cemento portland y el concreto reforzado sean los materiales más utilizados en la industria de la construcción (Gamgbir, 2009).

Por otra parte, la industria del cemento es una de las principales fuentes generadoras de dióxido de carbono (CO_2). Se estima que las emisiones de CO_2 a la atmósfera alcanzan un valor de 1.0 ton por tonelada de Clinker (Cassgnabere, 2009), que es de donde se obtiene el cemento portland después de la molienda. Ante este inconveniente se han buscado alternativas de aprovechamiento de materiales con capacidad cementante que no sean dañinos para el medio ambiente debido a su procedencia y que además, cuidadosamente empleados, puedan aportar beneficios. Lo anterior ha dado pie a la utilización de sub-productos industriales cuya categorización es amplia y variada (Malhotra, 1996; Day, 2006). Aunque actualmente la cantidad de residuos/sub-productos que se utiliza es poca, comparada con la que se produce, cada día alrededor del mundo se llevan a cabo investigaciones para buscar nuevas aplicaciones de éstos como materiales cementantes en la industria de la construcción con el objetivo de lograr un mayor empleo de ellos y de esta manera disminuir la huella de carbono de la industria de la construcción.

Existen algunos desechos industriales que pueden ser viablemente utilizados como materiales cementantes y que, además, requieren poco o ningún tipo de tratamiento previo para su utilización en la mezcla para concreto y/o mortero. Por otro lado, también existen otros materiales cementantes de origen natural (por ejemplo la ceniza volcánica) que se encuentran disponibles para su uso en la mezcla de concreto (Malhotra, 1996).

Algunos materiales cementantes provenientes de desechos industriales que pueden utilizarse como materiales alternativos son: la ceniza volante, el humo de sílice, la escoria de alto horno, la metacaolinita y el esquisto (Day, 2006), los cuales se pueden emplear como adiciones minerales en la preparación del cemento portland fabricado en planta (Cemento Portland Modificado, CPM); como adición en la molienda; o por la mezcla de dos o más tipos de materiales finos que sustituyen parcialmente al cemento portland (Cemento Hidráulico Adicionado o Cemento con sustituto cementante) empleados en la mezcla de concreto o mortero (Kosmatka, 2004).

La primera propiedad en el concreto que se ha visto afectada por el uso de materiales cementantes de origen natural o industrial es la resistencia a la compresión, asignando para este trabajo la resistencia real (f_c) obtenida de los ensayos por compresión, y por ello existe una gran cantidad de trabajos (Cassgnabere, 2009; Bagheri, 2013; Atis, 2003; Ashtiani, 2013) que bajo diferentes mezclas, condiciones, procedencia o atmósfera permiten utilizar una cierta cantidad de éstos materiales sin afectar en forma notable sus propiedades mecánicas del concreto. Es complicado pensar en un atlas de uso de estos materiales, pero se vislumbra como una necesidad la de conocer si la tendencia a disminuir la f_c es constante ó cual es su límite en función de los parámetros de investigación que han sido utilizados en diversas investigaciones. De igual manera, aunque ya existen excelentes combinaciones de materiales cementantes que dan lugar a cementos binarios, ternarios e incluso cuaternarios (Nedi, 2001), la disponibilidad de los materiales en una sola zona o región puede constituir un impedimento económico para su uso generalizado, en especial en países en desarrollo. Por ello el uso de cemento binario producido en planta puede ser de momento la alternativa más práctica en términos económicos y de disponibilidad. El objetivo de este trabajo es re-visitar el estado del arte sobre las tendencias de la resistencia a la compresión de concretos y estructuras que utilizan Escoria de Alto Horno (EAH) como material cementante, así como revisar

los niveles de reemplazo de cemento portland que se consideran en las normativas de diferentes países del mundo para la clasificación de los cementos con escoria de alto horno, ya sea mezclado durante la molienda o por la mezcla separada a partir de cada material molido.

2. CARACTERÍSTICAS DE LA ESCORIA DE ALTO HORNO

Un subproducto cementante es el material secundario o incidental que se deriva del proceso de fabricación industrial a través de una reacción química, el cual posee la característica conglomerante después de cierto tratamiento (Malhotra, 1996). Un subproducto industrial considerado como de desecho, puede poseer cierta capacidad puzolánica, y puede ser útil y comercializable al hallarle alguna aplicación en otro sector industrial, por ejemplo como sustituto parcial del cemento portland en las construcción con concreto, o también como agregado pétreo como es el caso de la escoria granulada.

La escoria de alto horno es un subproducto (no metálico) de la manufactura del hierro fundido en alto horno, consistiendo esencialmente de silicatos y aluminosilicatos de calcio y otras fases (Siddique, 2008). Ciertos autores (Malhotra, 1996; Lea, 1971) describen a la escoria de alto horno como un material puzolánico, ya que no presenta propiedades cementosas por sí misma a menos que esté combinada con otros materiales cementantes para su activación química. Pero otros autores señalan que debería ser clasificada como un cemento hidráulico latente, ya que sus componentes son similares a los óxidos del cemento portland (cal, sílice y alúmina) en diferentes proporciones (Lea, 1971).

La escoria generada en la industria siderúrgica es de cuatro tipos según el método empleado para su enfriamiento: la escoria de alto horno enfriada al aire; la escoria expandida o espumada; la escoria paletizada y la escoria de alto horno granulada.

La escoria enfriada al aire no presenta las mismas propiedades hidráulicas que la escoria enfriada por agua, ya que al enfriarse lentamente en el aire, sus compuestos tienen la posibilidad de alcanzar mayor grado de cristalización, lo que generaría un material de poca actividad reactiva. La escoria expandida por su parte es empleada como agregado grueso de peso ligero en la fabricación de concreto con bajo peso específico (Malhotra, 1996). Estos materiales son empleados en la construcción de carreteras y en edificaciones. El tipo de escoria empleada como cementante es el material granulado de alto horno, este subproducto se obtiene por el enfriamiento acelerado de la escoria fundida, a través de la aplicación de agua sobre su superficie con la intención de formar un material vítreo el cual tendrá cierto grado de activación.

El enfriamiento rápido con agua de la escoria fundida previene la formación de cristales más grandes, dando como resultando un material granular que comprende casi 95% del compuesto de alumino-silicato de calcio no cristalino. La escoria granulada es procesada por medio de un secado previo y posteriormente sometida a molienda con molino rotatorio de bolas, hasta obtener un polvo muy fino, el cual es conocido como cemento de escoria de alto horno de grano molido (GGBS por sus siglas en inglés). La escoria granular posee tamaños de partícula entre 4 a 15 mm, y después de la molienda menor de 45 μm y área superficial de 400 a 600 m^2/kg , la cual puede ser empleada como un cemento hidráulico latente (Lea, 1971). El material molido es un polvo de color más claro que el cemento portland, la coloración que brinda al concreto es más clara y le da un acabado de superficie suave comparado con el concreto con cemento portland. La gravedad específica que presenta es de 3.15.

En la figura 1 se muestra una imagen de MEB (SEM) extraída de la literatura, con la morfología de una pasta hidratada, compuesta por un sistema cementante con 30% de escoria de alto horno y 70% de cemento portland ordinario (Li, 2011). En la figura 1 se observan partículas angulares que corresponden a la escoria y que no han alcanzado a hidratarse después de 7 días. Este

comportamiento es normal en los cementos con escoria, ya que la escoria presenta una menor actividad de reacción comparada con el cemento portland ordinario.

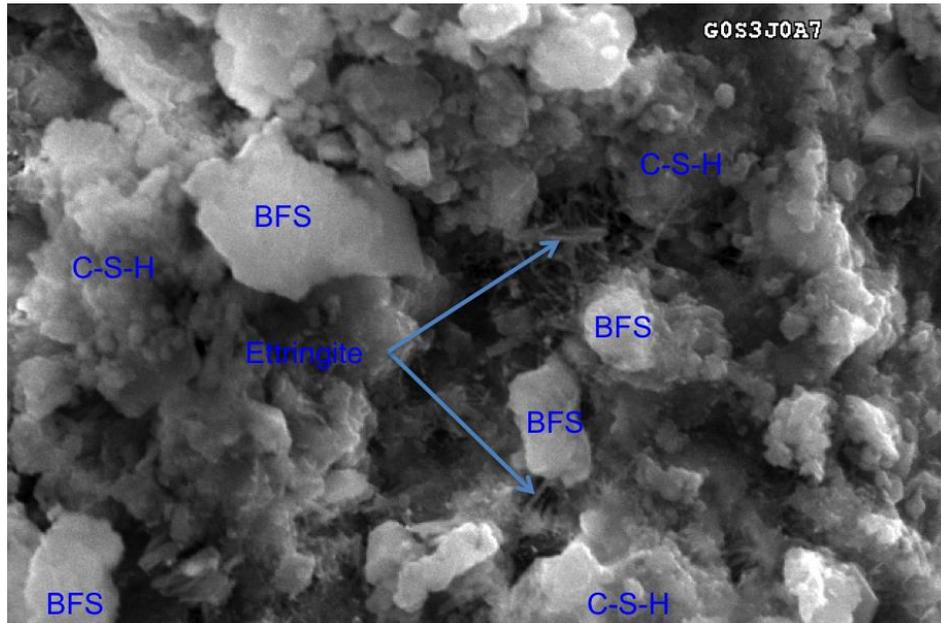


Figura 1. Microfotografías de MEB de pastas hidratadas después de 7 días, pasta con 30% de escoria de alto horno y 70% de cemento portland ordinario (BFS escoria de alto horno, C-S-H silicato de calcio hidratado) (Li, 2011).

Las especificaciones para la escoria granulada de alto horno como material cementante se encuentran en la ASTM C 989 (ASTM-C-989, 1999), donde se clasifica la escoria en tres grados de resistencia. Los grados están basados en un índice de actividad de la escoria: grado 80 (con bajo índice de actividad); grado 100 (con índice moderado de actividad) y grado 120 (con alto índice de actividad); también se encuentran otras especificaciones para la escoria en la AASHTO M 302 (ASSTHO-M302, 2000). El número en las designaciones de calidad corresponde a la resistencia a compresión a los 28 días, aproximadamente, realizados en cubos estándares de mortero preparadas con EGAH (mezcla con una cantidad igual en masa de cemento portland). El grado de actividad influye en el comportamiento reactivo en la mezcla fresca de concreto y del fraguado posterior. Por otro lado, la actividad hidráulica de la escoria estará determinada por su composición química, el área superficial y el tamaño de partícula de la escoria molida (Puertas, 1993; Pal, 2003).

La composición química de la escoria de alto horno puede ser muy variada según su origen, pero para ser considerada como un material cementante se requiere que la composición química se encuentre entre los rangos: CaO (30-45%), SiO₂ (30-48%), Al₂O₃ (15-25%), Fe₂O₃ (0.5-2%), y otros óxidos de menor cantidad (Shetty, 2013). Entre los requerimientos químicos dados por la ASTM 989 (ASTM-C-989), se establece 2.5% y 4.0% como las cantidades máximas de sulfuros (S) y de sulfatos respectivamente, bajo estas cantidades la presencia de escoria en el concreto armado no representa un riesgo de corrosión para el acero de refuerzo (Wang, 2010). La escoria de alto horno pulverizada es ligeramente alcalina y exhibe un pH en solución en un rango de 8 a 10, sin embargo el lixiviado de escoria puede exceder un valor de 11, un nivel que puede ser corrosivo para aluminio o tuberías de acero galvanizado colocadas en contacto directo con la escoria (Wang, 2010).

Las proporciones de los compuestos de óxidos mencionados anteriormente, determinará la basicidad de la escoria y su capacidad hidráulica. Pero para que la escoria pueda desarrollar realmente su potencial hidráulico se necesita que su fase vítrea sea mayoritariamente superior a 70%. Esta característica vítrea condicionará la capacidad de la escoria para recrear la estructura cristalina que le proporcionará al concreto sus cualidades de resistencia y durabilidad.

Como material cementante, la escoria granulada tiene las siguientes características: es un cemento hidráulico latente fuerte cuando es molido, posee bajo contenido de Na_2O y K_2O , peso ligero, alta permeabilidad al agua, no contiene cloruros y no produce reacciones álcali-agregado.

El reemplazo del cemento por escoria granulada molida (EGAH) generalmente reducirá la cantidad de agua necesaria para obtener un mismo revenimiento como el obtenido en un concreto con CPO. La reducción de la cantidad de agua estará influenciada con el incremento del nivel de reemplazo y la finura de la escoria (Shetty, 2013). La demanda de agua típica de la mezcla de concreto con EGAH es del orden de 3-5% menor que el concreto con cemento Portland (Wang, 2004; Walker, 2011). Esto representa una reducción de 5 a 10 litros de agua por metro cúbico de concreto. Para reemplazos del CPO por EGAH en el orden de 70% y 80%, la reducción en la demanda de agua puede ser menor, debido a la concentración mucho más alta de las partículas más finas EGAH (Siddique, 2012; Oner, 2007). Este comportamiento es debido a que las superficies de las partículas de EGAH son más suaves y de mayor cristalinidad que las de cemento portland, resultando en menor adsorción de agua sobre la superficie de las partículas de EGAH.

Entre las ventajas que puede ofrecer el empleo de escoria granulada molida en el concreto fresco y endurecido se tienen: reducción del calor de hidratación, refinamiento de la estructura de poro, reducción de la permeabilidad de agentes externos, incremento de la resistencia al ataque químico, resistencia al ataque por sulfatos, mejoramiento de la trabajabilidad de la mezcla, y en ciertos casos puede mejorar la resistencia a la corrosión del acero de refuerzo, recordando aquí que esto dependerá de la composición química de la escoria. El concreto con escoria puede alcanzar mayor resistencia de compresión para determinados niveles de reemplazo del cemento portland. Además que se tiene un ahorro de cemento portland común en la mezcla de concreto (Shetty, 2013).

La incorporación de la escoria de alto horno en la mezcla cementante, modifica la naturaleza y características de los hidratados formados, afectando a la red capilar del concreto, reduciendo el tamaño y el número de poros. Este efecto de la escoria se refleja en el concreto en estado endurecido y su durabilidad. Sin embargo, los efectos benéficos de la escoria en las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto estarán en función de diferentes factores, entre los cuales se pueden destacar aquí la calidad de la escoria, el diseño adecuado de la mezcla, la colocación y transporte del concreto fresco y el cuidado en el tiempo y tipo de curado.

Otra característica considerable de las escorias es el proceso de hidratación, que es más lento que el del Clinker debido a que su disolución es más difícil por su carácter vítreo y también por la necesidad de una fuente de activación sulfática (yeso, anhidrita) o alcalina (por presencia de álcalis o portlandita). La activación de la escoria se genera por la presencia de portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberada de la hidratación del Clinker, por los álcalis contenidos en la escoria y por la acción del regulador de fraguado (yeso y/o anhidrita).

Ante esto, se pueden mencionar otras características de los cementos de escoria granulada de alto horno, relacionadas con su proceso de hidratación.

- No hay liberación de portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y se puede pensar en un consumo de la cantidad liberada por el clinker.
- No hay formación de aluminato tricálcico (C_3A).
- Los álcalis (K_2O y Na_2O), que participa como catalizadores en la hidratación de las escorias, quedan atrapados en la red cristaliza y no en estado libre.

Por otro lado, como un beneficio medioambiental, la escoria granulada molida es también considerada un material sustentable (Gjørsv, 2000), al ser un subproducto de desecho industrial y su uso en el concreto es reconocido por la certificación LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) (Council U.S.G.B. 2014; Slag Cement Association). Ante esto, la escoria puede ser utilizada en concreto para superestructuras, y con una debida evaluación, también es empleada en concreto armado expuesto en ambientes con cloruros y sulfatos, con la desventaja de su característica lenta de fraguado, lo que implicaría un mayor tiempo de ejecución de determinado proyecto.

Debido a que la escoria adicionada en la mezcla de concreto tiene menos reactividad en los primeros días, se presenta una considerable disminución en la resistencia a compresión a edades tempranas comparadas con mezclas de concreto con CP. Sin embargo, a edades posteriores se ha detectado lo contrario, es decir, alcanzando en varios casos resistencias mayores que las de un concreto homólogo (Oner, 2007; Berndt, 2009).

3. ESCORIA DE ALTO HORNO COMO MATERIAL CEMENTANTE EN LA NORMATIVA

La EAH puede ser empleada para la misma finalidad que el cemento portland, ya que fragua y endurece por la reacción química con el agua, por lo que es considerada como un cemento hidráulico latente por tener los mismos compuestos que aquel. Sin embargo, en algunos casos se requiere que la escoria sea mezclada también con cal hidratada para ganar funcionalidad (Gambhir, 2009; Lea, 1971).

Las especificaciones para el cemento de escoria se encuentran en las normas ASTM C595 (ASTM-C595, 200) donde se clasifican en tipo IS y S (Cemento portland de escoria de alto horno y Cemento de escoria o siderúrgico) respectivamente.

El cemento tipo IS está constituido básicamente por escoria granulada de alto horno (EGAH), el cual se puede moler conjuntamente con el Clinker del cemento portland o bien con molienda separada para incorporarlo posteriormente a la mezcla cementante. La cantidad de EAH en este tipo de cemento se encuentra entre 25% y 70% de la masa cementante. Se considera que el contenido de escoria de 70% de la masa cementante trae cierto beneficio en la resistencia y la durabilidad pero hasta cierto grado y de acuerdo al ambiente donde se exponga el concreto. Por otro lado, si se pretende emplear dosis más elevadas que la anterior, se deben hacer ensayos del concreto para la verificación de la resistencia, durabilidad y otras especificaciones requeridas para el proyecto.

En la tabla 1 se muestran las cantidades de contenido de escoria en el cemento consideradas en las normas de diferentes países. De acuerdo a las normas presentadas en la tabla 1, la norma europea (UNE-EN-197, 2013) considera un nivel de escoria en la mezcla cementante del 95%, siendo el mayor nivel comparado con las de otros países mostrados en la tabla 1. Mientras que para los países americanos, Colombia es quien tiene considerado en su norma hasta 85% de escoria y México con 80%. Por otro lado, es imprescindible mencionar que el uso de altos niveles de escoria debería quedar sujeto a determinado control de verificación del concreto, debido a la compatibilidad con otras adiciones en la mezcla, o bien por los agregados y las condiciones ambientales.

El empleo de otros materiales cementantes, distintos a los tradicionales, implicarán ciertos efectos y cambios en el concreto fresco y endurecido. Para la mezcla de concreto se necesita determinada cantidad de agua para que se lleve a cabo la reacción de hidratación. La escoria tiene entre sus peculiaridades la capacidad de disminuir la cantidad de agua de mezclado de 1% a 10%, dependiendo de la cantidad de sustitución. Así también, puede tener mayor cantidad de sangrado

sin que éste tenga efectos adversos en el concreto, pero también tiende a disminuir el calor de hidratación en comparación con el cemento portland. Sin embargo, el empleo combinado de escoria de alto horno molida y ceniza volante puede disminuir el tiempo de fraguado (Lee, 2013). Para el concreto endurecido el empleo de escoria puede contribuir al mejoramiento de la resistencia a compresión. Pero también se corre el riesgo de que la resistencia del concreto tienda a sufrir una disminución con la adición cuando no se aplica un adecuado método de curado y el cuidado respectivo para el sistema cementante empleado. Así se tiene que el desarrollo de la resistencia en concreto con EGAH puede ser similar al concreto normal si es curado a temperatura de 23 °C aproximadamente.

Tabla 1. Contenido de escoria en los cementos de acuerdo a las normas de diferentes países.

País y norma	Tipo de cemento	Contenido de escoria
Comité Europeo de Normalización UNE-EN 197-1, 2013.	Cemento portland con adiciones de escoria Cemento portland con escoria de alto horno	6 a 35% 36 a 95% %
Argentina IRAM 50000, 2000; IRAM 50001, 2000.	CP normal CP con escoria Cemento portland compuesto Cemento de alto horno	Máximo 10% de EAH 11% – 35% de EAH 35% EAH 35-75%
Chile NCH148	Cemento portland siderúrgico Cemento siderúrgico	Máximo 30% EAH 30% - 70%
Colombia NTC 30	Cemento siderúrgico Cemento Portland de EAH	>70 de EAH 15 – 85 EGAH
México NMX-C414-ONNCCE	CPO Cemento portland con escoria de alto horno Cemento portland compuesto Cemento con escoria de alto horno	5 6 – 60 6 – 35 61 – 80
Estados Unidos (ASTM C595, 2000; AASHTO M240)	Cemento Portland de alto horno Cemento de escoria de alto horno o siderúrgico Cemento Portland modificado con escoria	25 – 70 de EGAH Mínimo 70% EGAH < 25%
Canadá CSA A362, CSA A23.5 CAN/CSA-A3001-03	Cemento portland de escoria de alto horno Cemento portland modificado con escoria	25 a 40% de escoria 25 – 70%
Australia AS/NZS 2350.1; AS 3582.2; AS 3972,	Cemento binario mezclado con escoria Cemento ternario con escoria y otro material cementante suplementario	30 – 70% 30% - 50%

4. RESULTADOS DEL EFECTO DE LA EAH EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Para esta sección se realizó una recopilación de datos de investigaciones reportadas en la literatura, poniendo atención en los niveles de reemplazo del cemento portland por escoria de alto horno y el efecto causado en la resistencia a compresión real (f_c) del concreto endurecido a las edades de 28 y 90 días. Cabe mencionar que las mezclas de material cementante que se han investigado están compuestas por el sistema: cemento portland y escoria.

Regularmente la cantidad de agua empleada para preparar la mezcla de concreto está especificada de manera implícita en la relación agua/cemento (a/c), Pero para sistemas cementantes la cantidad de agua está especificada por la relación agua/material cementante expresado por a/mc . Sin embargo existen casos particulares donde no se usa únicamente agua para la preparación de la mezcla sino que se requiere de alguna solución activadora de algún subproducto, entonces el término empleado es s/mc que representa la solución acuosa con el agente químico (solución alcalina) y material cementante.

Las técnicas de curado del concreto después de 24 h de colado pueden ser muy variadas, entre éstas están: el curado húmedo o curado en inmersión de agua; curado a temperatura ambiente; curado con temperatura (T) y humedad relativa (HR) controlada. El periodo de curado dependerá del sistema cementante utilizado para la mezcla del concreto con dosis de escoria como reemplazo del cemento.

En la tabla 2, se muestran algunos resultados reportados en la literatura sobre resistencia a compresión real f_c del concreto a edades de 28 y 90 días, conteniendo reemplazos del cemento portland ordinario tipo I por el subproducto de EAH. En la tabla se mencionan el nivel de reemplazo, la relación a/mc y la resistencia a compresión a 28 y 90 días.

Como se puede observar en la tabla 2, la cantidad de reemplazo del cemento por escoria tiene un máximo del 80% para la investigación reportada en el 2007 (Atis, 2007), estando esta cantidad dentro del rango que se reportan en las normas estándar de los diferentes países como México y Colombia. Así también se puede mencionar que se han investigado concretos con diferentes relaciones de a/mc , comprendiendo dicho rango entre 0.28 a 0.55, mencionando además que en bajas relaciones de a/mc se hace indispensable la utilización de algún aditivo reductor de agua o superplastificante para conferirle las propiedades adecuadas en el estado fresco del concreto.

De acuerdo a la tabla 2, existe una amplia gama de posibilidades para emplear la EAH como sustitución parcial del cemento para fabricar mezclas de concreto, pero en algunos casos el resultado no tiene un buen efecto en lo que concierne a la resistencia mecánica. Por esto es importante proporcionar ciertos detalles en cuanto a la resistencia a compresión del concreto en función de la cantidad de escoria empleada en el sistema cementante CPO + EAH.

Tabla 2. Resistencias a compresión (f_c) del concreto con sistema cementantes CPO tipo I + EAH con diferentes niveles de reemplazo según diversos autores.

Autores	Reemplazo con sub producto (%)	a/mc	f_c (MPa) 28 días	f_c (MPa) 90 días	Autores	Reemplazo con sub producto (%)	a/mc	f_c (MPa) 28 días	f_c (MPa) 90 días
Kriker, 1992	0	0.50	30	35	Atis, 2007	60	0.40	53	
	15	0.50	26	39		80	0.40	43	
	30	0.50	30	33		0	0.50	52	
	40	0.50	28	36		20	0.50	51	
	45	0.50	26	38		40	0.50	46	
	50	0.50	21	29		60	0.50	40	
Kriker, 1992	0	0.60	29	31		80	0.50	27	
	15	0.60	34	37		0	0.30	73	
	30	0.60	32	39		20	0.30	70	
	45	0.60	25	33		40	0.30	66	
Amrane, 1994	0	0.55	24	27		60	0.30	68	
	15	0.55	26	31		80	0.30	54	
	30	0.55	27	33		0	0.40	66	
	50	0.55	21	29		20	0.40	63	
Ramezani pour, 1995	0	0.50	41			40	0.40	62	
	25	0.50	40			60	0.40	59	
	50	0.50	35			80	0.40	47	
Polder, 1996	0	0.43	50			0	0.50	37	
	70	0.43	51			20	0.50	37	
Yeau, 2005	0	0.42	46	49		40	0.50	35	
	25	0.42	48	52		60	0.50	30	
	40	0.42	44	60		80	0.50	20	
	55	0.42	47	57		0	0.30	75	
Atis, 2007	0	0.40	68			20	0.30	73	
	20	0.40	69		40	0.30	76		
	40	0.40	62		60	0.30	58		
	60	0.40	54		80	0.30	56		
	80	0.40	43		0	0.31	61		
	0	0.50	42		25	0.31	64		
	20	0.50	36		40	0.31	70		
	40	0.50	35		50	0.31	64		
	60	0.50	28		60	0.31	64		
	80	0.50	18						
				Chidiac, 2008					

Tabla 2. Continuación.

Autores	Reemplazo con sub producto (%)	a/mc	f_c (MPa) 28 días	f_c (MPa) 90 días	Autores	Reemplazo con sub producto (%)	a/mc	f_c (MPa) 28 días	f_c (MPa) 90 días
Chidiac, 2008	0	0.38	76		Bilim, 2009	0	0.30	80	86
	20	0.38	86			20	0.30	82	90
	25	0.38	76			40	0.30	84	91
	33	0.38	70			60	0.30	81	92
	40	0.38	71			80	0.30	66	77
	50	0.38	79			0	0.40	64	71
	60	0.38	70			20	0.40	73	82
Bilim, 2009	0	0.30	81	85		40	0.40	66	81
	20	0.30	81	90		60	0.40	62	73
	40	0.30	82	88		80	0.40	47	55
	60	0.30	78	79		0	0.50	49	50
	80	0.30	68	76		20	0.50	50	56
	0	0.40	64	68		40	0.50	49	53
	20	0.40	66	72		60	0.50	39	49
	40	0.40	67	78	80	0.50	28	35	
	60	0.40	61	75	Bouikni, 2009	0	0.43	55	
	80	0.40	53	57		50	0.43	57	
	0	0.50	51	57		65	0.43	55	
	20	0.50	53	61	Shariq, 2010	0	0.45	36	41
	40	0.50	52	58		20	0.45	31	37
	60	0.50	40	50		40	0.45	28	40
	80	0.50	25	34		60	0.45	24	29
	0	0.30	76	84		0	0.50	31	34
	20	0.30	81	87		20	0.50	27	31
	40	0.30	81	88		40	0.50	25	32
	60	0.30	73	81		60	0.50	22	26
	80	0.30	63	71		0	0.55	22	25
	0	0.40	64	71		20	0.55	20	23
	20	0.40	66	74		40	0.55	19	24
	40	0.40	67	76		60	0.55	15	19
	60	0.40	61	74	Topçu, 2010	0	0.50	34	36
	80	0.40	50	59		25	0.50	48	54
	0	0.50	54	61		50	0.50	44	45
	20	0.50	57	65	Abdelkader, 2010	0	0.50	30	34
	40	0.50	56	66		30	0.50	36	43
	60	0.50	45	58		50	0.50	30	39
	80	0.50	30	38					

Tabla 2. Continuación.

Autores	Reemplazo con sub producto (%)	a/mc	f_c (MPa) 28 días	f_c (MPa) 90 días	Autores	Reemplazo con sub producto (%)	a/mc	f_c (MPa) 28 días	f_c (MPa) 90 días	
Johari, 2011	0	0.28	87	96	Hadjasad ok, 2012.	0	0.65	36	42	
	20	0.28	95	104		15	0.65	33	36	
	40	0.28	88	99		30	0.65	28	40	
	60	0.28	87	98		50	0.65	16	33	
Lübeck, 2012	0	0.30	60	72		0	0.42	62	65	
	50	0.30	59	68		15	0.42	61	63	
	70	0.30	40	42		30	0.42	60	65	
	0	0.42	48	59		50	0.42	53	62	
	50	0.42	42	55		Li, 2012	0	0.41	48	
	70	0.42	30	38			10	0.41	48	
	0	0.55	39	48	30		0.41	47		
	50	0.55	30	40	50		0.41	46		
	70	0.55	20	31						

En las figuras 2 y 3 se muestran en forma gráfica los datos mostrados en la tabla 2, correspondientes a la resistencia a compresión real del concreto a edades de 28 días (figura 2) y 90 días (figura 3) en función de la cantidad del nivel de reemplazo del cemento. También en las figuras 2 y 3 se muestran las líneas de correlación promedio con la clasificación en tres rangos de la relación a/mc ; los valores menores a 0.4, el rango entre 0.4 y 0.6, y los valores mayores a 0.6. Se puede observar en la figura 2, que hay una ligera tendencia generalizada a la disminución de la resistencia cuando se incrementa la cantidad de escoria en la mezcla cementante, aunque se puede observar que hay un rango donde puede mejorarse la resistencia. El nivel de reemplazo que se ha empleado en las investigaciones alcanza un valor del 80%, pero se puede observar que en el rango de 20% a 60% es donde se observan valores ligeramente mayores de f_c comparados con el concreto de referencia, es decir sin escoria. Un comportamiento similar al de la resistencia a los 28 días se puede observar también en la resistencia a los 90 días mostrado en la figura 3. En dicha gráfica se puede apreciar además que para un período más largo de tiempo (mayor edad del concreto), la resistencia f_c de los concretos con reemplazos en el rango de 20% a 60% tiende a incrementar con la edad.

Para ambas edades de los concretos (figuras 2 y 3), se observa que con los niveles de reemplazo del cemento mayor a 60% de escoria, la resistencia del concreto es inferior que el concreto sin reemplazo.

Para determinar el efecto generado en la resistencia f_c de los concretos para las edades de 28 y 90 días, se determinó un parámetro que llamamos tasa de cambio, este parámetro es un valor unidimensional obtenido de la fracción entre la resistencia f_c del concreto con escoria y la f_c del concreto de referencia. En las gráficas de la figura 3, se muestra la tasa de cambio (eficiencia) de la resistencia f_c del concreto con escoria con respecto al concreto homólogo de referencia y en función de los diferentes niveles de reemplazo. La línea horizontal marca la tasa de f_c para el concreto de referencia. Un valor inferior a dicha línea indica que el concreto con escoria no alcanzó el valor de la resistencia de su homólogo sin escoria, mientras que valores por encima de la línea horizontal significan que el concreto superó o mejoró la resistencia del concreto sin escoria.

De manera similar a lo observado en las figuras 2 y 3, se puede observar en la figura 4 que existe una tendencia conocida y esperada a la disminución de la resistencia del concreto f_c con el incremento del nivel de reemplazo de cemento por escoria en el sistema cementante siendo congruente con lo reportado en la literatura (Abdelkader, 2010).

De nueva cuenta, el rango donde se aprecia un mejor efecto en la resistencia está entre los niveles de 20% y 60% donde se alcanzan valores similares o ligeramente superiores de f_c con respecto al concreto de referencia, este efecto se ve más marcado en la gráfica de la figura 5 para concreto de 90 días de edad. Además, se observa en la gráfica de la figura 4, que reemplazos mayores a 60% tienen disminución en el mejoramiento de la resistencia f_c . De la misma manera, este efecto también se puede apreciar a la edad de 90 días, resultando congruente con lo observado en las figuras 2 y 3.

De acuerdo a los resultados reportados por Ahmend Hadjasadok et al. (Hadjasadok, 2012), se observa que para la misma relación de a/mc se reduce la resistencia f_c cuando se incrementa el nivel de reemplazo del CPO, pero para una misma cantidad de escoria la resistencia f_c se incrementa al reducir la relación a/mc .

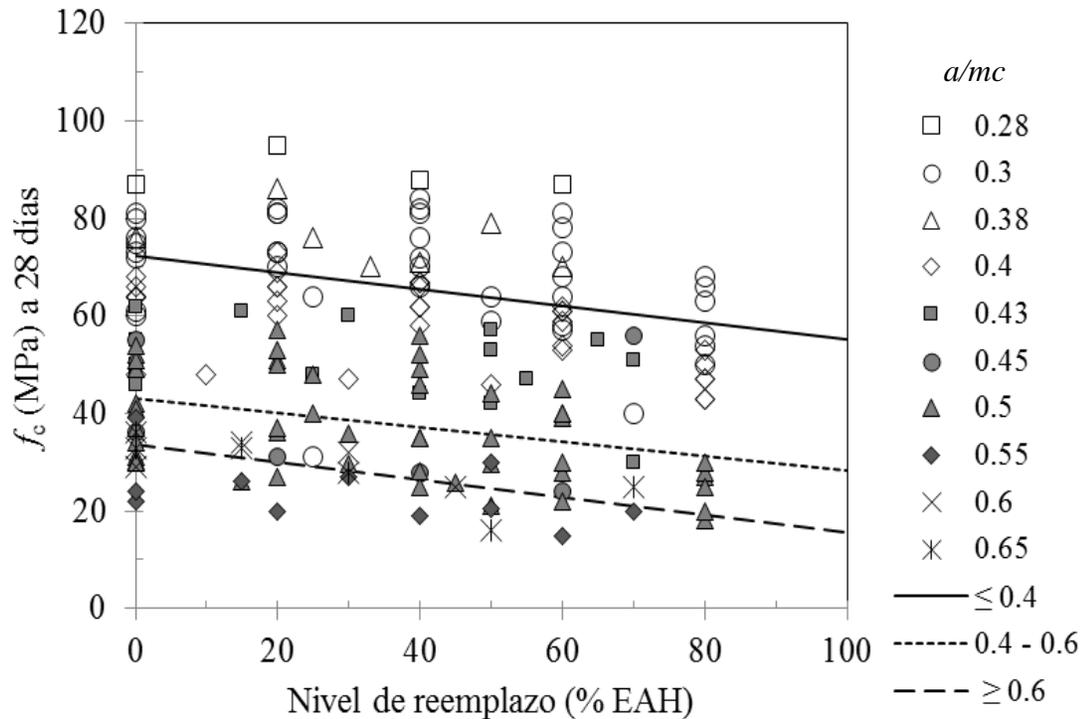


Figura 2. Datos reportados en la literatura (tabla 2) de resistencia a compresión real (f_c) de los concretos con escoria y ensayados a 28 días.

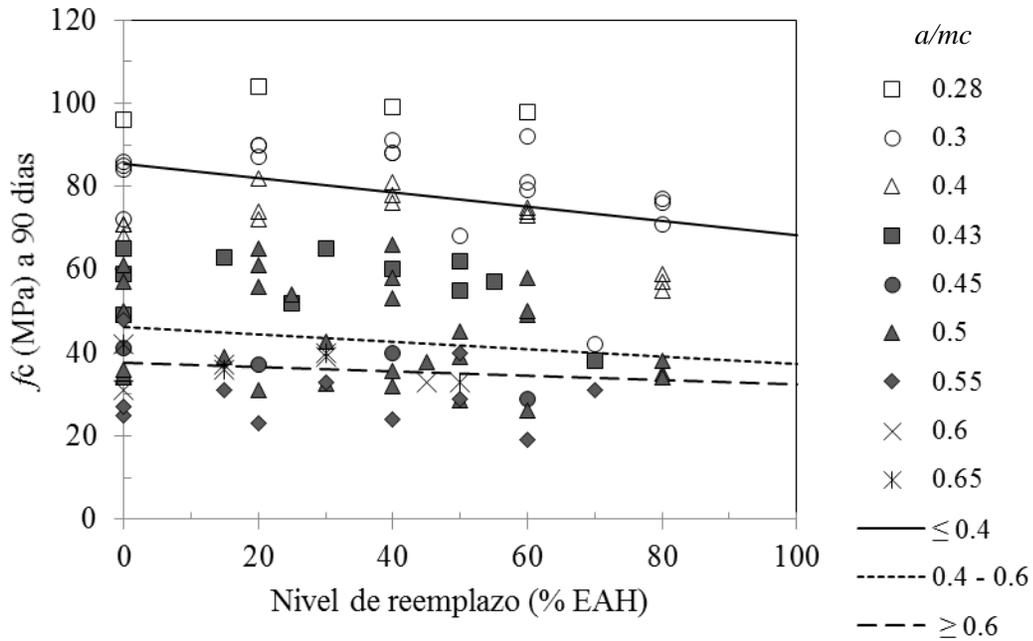


Figura 3. Datos reportados en la literatura (tabla 2) de resistencia a compresión real (f_c) de los concretos con escoria y ensayados a 90 días.

Por otra parte, en la figura 5 se puede observar que a edades de 90 días el concreto adquiere una mayor resistencia comparada con la edad de 28 días (figura 4). Esta observación también fue realizada en los trabajos realizados por Ilker Bekir Topcu y Raif Boga (Topç, 2010) donde además concluyen que con reemplazos de 25% de EGAAH al sistema cementante, resulta en una mayor resistencia compresión del concreto con curado bajo agua y durante 28 días, así como a 90 días. Debe mencionarse también que el concreto con 90 días de edad alcanzó 10.5% más de resistencia que a los 28 días. Sin embargo, para un reemplazo de 50% la resistencia disminuye en tiempos similares de curado, dicho efecto con el nivel de reemplazo similar fue observado por Bougara (Abdelkader, 2010). Por su parte Chidiac y Panesar (Chidiac, 2008), concluyen que la resistencia f_c del concreto con escoria es disminuida con el incremento del nivel de reemplazo de cemento.

El comportamiento que se observa en la tardanza del mejoramiento de la resistencia mecánica en los concretos con escoria se infiere que es debido a que el subproducto cementante siderúrgico tiene un proceso de activación más tardado que el del cemento convencional.

Estas características también han sido mencionadas en otras investigaciones realizadas en pastas (Sanchez, 2011), otras en mortero (Hwang, 1991) y también en concreto (Lee, 2013), teniendo un resultado similar en la disminución de la resistencia a edades tempranas por una consecuencia del retraso del tiempo de hidratación del material cementante suplementario. Este comportamiento genera una disminución de la tasa de precipitación de los productos de reacción más estables, los cuales contribuyen en la resistencia mecánica.

Debido que la resistencia estará relacionada con las fases formadas en las pastas, se menciona uno de los resultados de las investigaciones realizadas por Chao-Lung Hwang y Der-Hsien Shen (Hwang, 1991) en pastas con sistemas de CPO – EAH con reemplazos de 10% a 40% y tres relaciones agua-material cementante 0.35, 0.47 y 0.59, concluyendo que para una determinada relación a/mc , un contenido alto de EAH requerirá mayor tiempo de fraguado de la pasta.

Sin embargo, según la investigación realizada por Martínez Aguilar et al, (Aguilar, 2010) reportan que la f_c en pastas con EAH podría ser mejorada con la activación de la escoria mediante un tipo de sulfato alcalino (Na_2SO_4 o K_2SO_4 mezclado con Al_2SO_4), o bien por medio de alguna fuente

sulfática como el fluoryeso (Fy , $CaSO_4$) que también es otro subproducto industrial, aunque también mencionan que la f_c a los 90 días en algunos casos fue menor que a los 28 días. Los autores relacionan dicho efecto, con la formación de fases poco estables (etringita y yeso) en la estructura interna de la pasta cementante y que por lo tanto resulta en una inestabilidad (expansión) a edades posteriores.

De acuerdo a lo anterior se puede decir que para un contenido constante de escoria, el tiempo de fraguado cambiará proporcionalmente con la relación a/mc . Esto conllevará a obtener un mejor resultado de la resistencia a compresión a edades posteriores que para un concreto convencional, por lo que se tendría una mayor tasa de hidratación de los compuestos químicos del material cementante.

Para lograr apreciar el efecto causado por la escoria en el concreto endurecido al transcurrir el tiempo, se determinó la frecuencia del cambio en la resistencia del concreto de acuerdo con tres rangos de la tasa de cambio: aquellos concretos con EAH que presentaban un cambio < 1 con respecto al concreto de referencia; los que no presentaban ningún cambio o tasa de cambio, que fueron considerados igual a 1; y aquellos que presentaban cambios > 1 , realizando esto para ambas edades de los concretos. Lo anterior se muestra en la figura 6 a través de una gráfica de frecuencias de una muestra representativa de los datos de resistencia de los concretos con escoria analizados en este trabajo y que logran tasas de cambio de f_c menores, iguales y mayores a 1. En dicha figura 6 se observa claramente que para la tasa de cambio < 1 hay una disminución en la frecuencia de la tasa de cambio para los concretos con EAH al pasar de 28 a 90 días de edad, mientras que para la tasa de cambio > 1 hay un incremento de la frecuencia. Esto quiere decir que la incidencia en la tasa de cambio con valores < 1 para el concreto con EAH a los 28 días, es mayor que para el concreto de referencia. Mientras que los valores de tasa de cambio > 1 , que representan los concretos con EAH y superan la resistencia del concreto de referencia, tienen mayor incidencia en la tasa de cambio aquellos concretos con 90 días de edad. Esto tiene relación con lo dicho anteriormente, ya que la escoria tiene un proceso de hidratación más lento que el CPO, por lo que requiere de un mayor tiempo para alcanzar una óptima hidratación y de esta forma desarrollar compuestos y fases químicamente más estables que interfieren en una mejoría de la resistencia a compresión del concreto. Ante esto, se cree que estas características de hidratación son un factor condicionante para el desarrollo de la resistencia y la que interfiera en la disminución de la resistencia, además del tipo de actividad de la escoria y de la implementación del curado del concreto.

Como se ha mencionado en párrafos anteriores, para el sistema cementante CPO + Escoria aplicados al concreto endurecido, éste puede producir un efecto en la resistencia que supera la del diseño a la edad de 28 días de curado de acuerdo a lo reportado en la literatura (Topç, 2010; Yeau, 2005). Previo a dicha edad, los concretos con EGAH presentaron f_c más bajas comparadas con las del concreto de referencia, pero que puede ser superado a edades posteriores, siendo este mismo comportamiento para todos los niveles de reemplazo. Este resultado se debe a las reacciones químicas secundarias y de la reacción hidráulica lenta de la escoria que contribuyen a densificar la microestructura del concreto. Los resultados presentados por Chidiac y Panesar (Chidiac, 2008) confirman lo anterior, y además que la tasa de hidratación inicial es más lenta en concreto con EGAH que con CPO. Por lo que en el transcurso del tiempo, de 7 a 28 días, el concreto con EGAH (60%) comienza a ganar resistencia, logrando ser superior o similar que el concreto con CPO.

Ante estos resultados, se puede decir ahora que las posibilidades de utilizar un subproducto van a estar determinadas por los requerimientos de calidad del concreto, entendiéndose como las propiedades de resistencias mecánicas y de durabilidad. Cabe señalar aquí que la resistencia a compresión no es un parámetro absoluto para la elección de un determinado concreto en

determinada construcción. Entonces, de lo anterior se puede prever que con el incremento en la dosificación de la EAH en el sistema cementante se pueden lograr obtener resistencias a compresión similares a un concreto con CP convencional pero con la noción de que será a edades posteriores como un concreto normal.

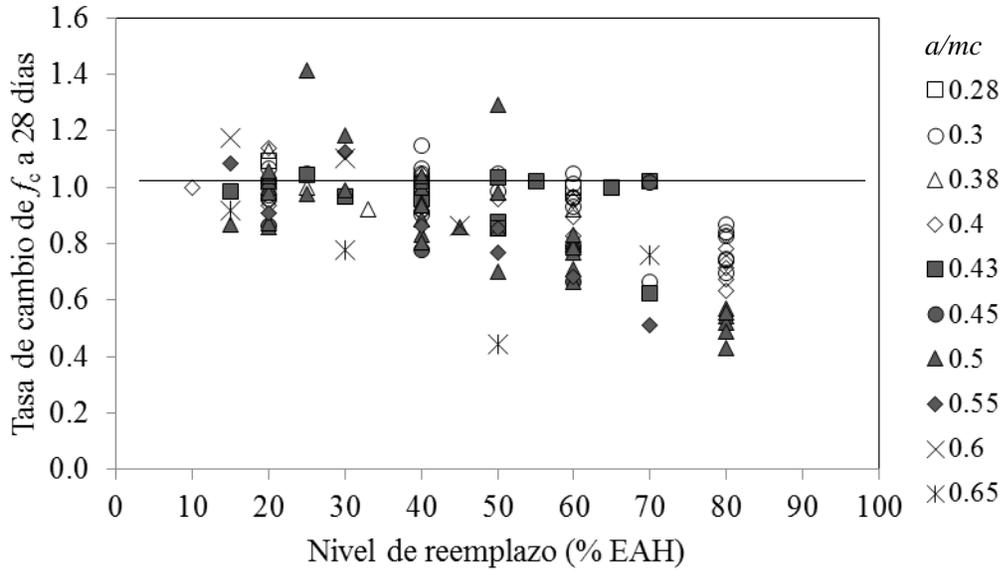


Figura 4. Tasa de cambio (eficiencia) de la resistencia a compresión real f_c de los concretos con escoria, a 28 días.

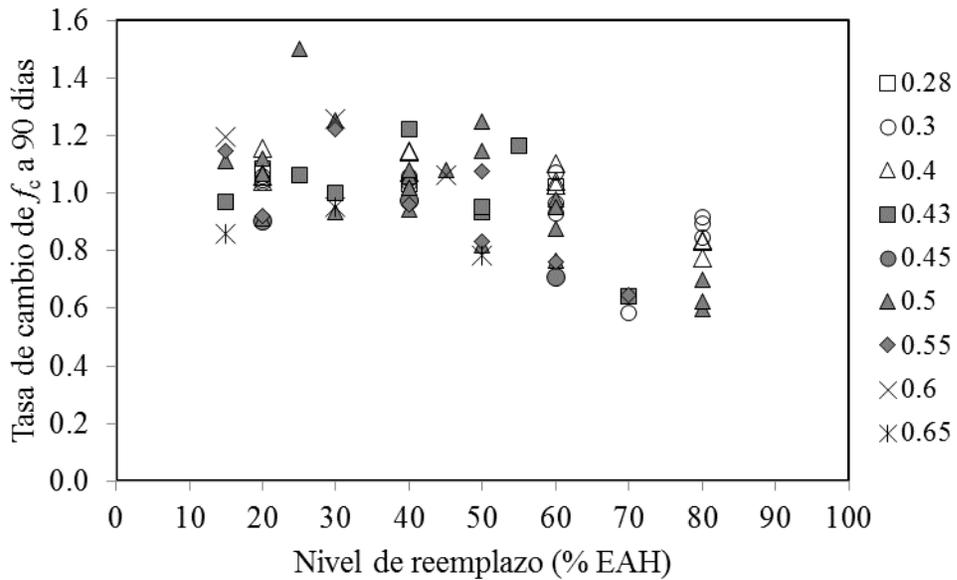


Figura 5. Tasa de cambio (eficiencia) de la resistencia a compresión real f_c de los concretos con escoria, a 90 días.

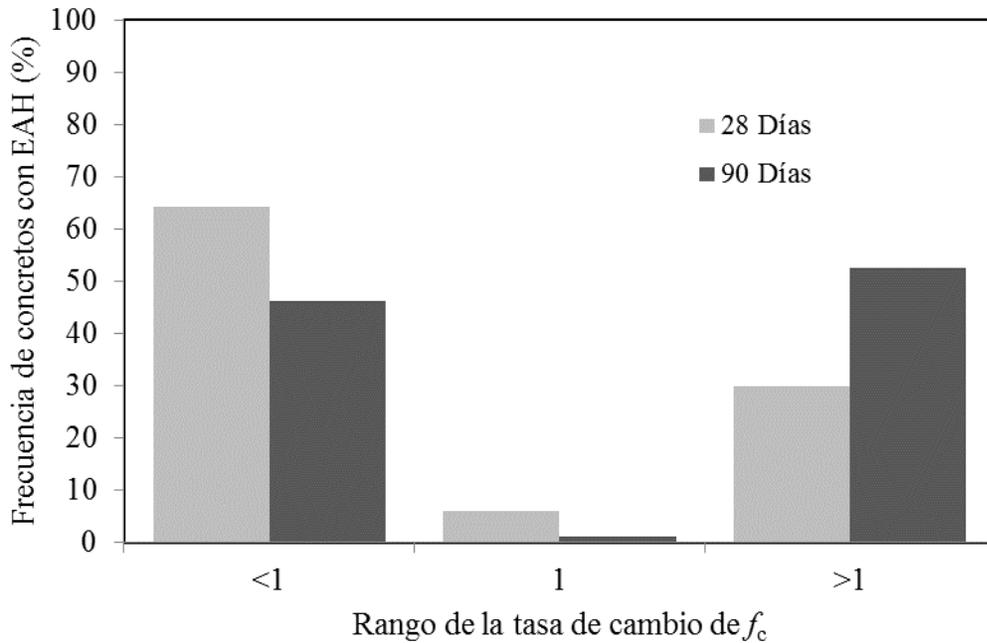


Figura 6. Frecuencias de la número de muestras de concreto con EAH relacionadas con la tasa de cambio (eficiencia) de f_c con respecto al concreto de referencia.

Se ha visto anteriormente que la incorporación y el incremento del nivel de escoria en la mezcla de concreto puede tener un carácter benéfico en la propiedades mecánicas del concreto endurecido, pero condicionado a cierto grado de reemplazo y a una determinada edad. Como contrapartida se puede decir que el concreto elaborado con un porcentaje elevado de escoria es muy sensible a las condiciones de curado, generando un secado prematuro en la superficie del concreto lo que conduciría a un aumento de la permeabilidad, además que la hidratación del material cementante se reduce con lo cual generará una disminución de las propiedades mecánicas de resistencia del concreto endurecido.

De manera similar como para un concreto convencional, el curado durante las primeras horas posteriores al endurecimiento de los concreto con un sistema cementante de CPO+EAH, es sumamente esencial, ya que con esta práctica se influye para el desarrollo de la resistencia a compresión, disminución de la porosidad y alta resistencia a la penetración de cloruros. Bajo esta primicia Ramezaniapour y Malhotra (Ramezaniapour, 1995), proporcionan los resultados de sus investigaciones en concreto con los niveles de reemplazo mostrados en la tabla 2 y con curado estándar de humedad continua, corroborando que los concretos que no recibieron un curado, mostraron pobre rendimiento del desarrollo de la resistencia mecánica, así como mayor porosidad y una débil resistencia a la penetración de iones cloruro. Cabe señalar que aún cuando los concretos fueron curados durante 2 días, se vio una mejoría significativa en su resistencia comparadas con el concreto sin ningún tratamiento de curado. Por lo tanto, se reafirma la importancia del curado del concreto con el sistema cementante CPO + EAH, ya que como se ha dicho la reacción de hidratación de la escoria es más lenta que la del cemento.

Un parámetro importante en la predicción de la resistencia del concreto con escoria a través del modelo de Feret (Feret, 1982) es el coeficiente de eficiencia de la escoria. En el tiempo de hidratación de la mezcla cementante, la escoria tiende a mejorar su coeficiente hasta alcanzar un valor óptimo comparado con el cemento portland, pero posteriormente también se ha visto que puede disminuir (Abdelkader, 2010) Por ello la eficiencia va a depender del nivel de reemplazo, ya que se ha observado que con 15% de escoria, la activación es completa y se tiene 67% más de

eficiencia que con un cemento común. Mientras que para altos niveles de reemplazo (50%) la eficiencia de la escoria disminuye o bien en el mejor de los casos alcanza a ser similar al cemento (Abdelkader, 2010).

En estudios realizados en elementos estructurales con mezclas cementantes de 30%, 50% y 70% de escoria, se han logrado buenos resultados de las resistencias a compresión real f_c y expuestos en un ambiente de agresividad leve y cuyos resultados se muestran en la tabla 2, en la investigación de Osborne (Osborne, 1999). Por otro lado, el autor señala que la velocidad de carbonatación y la permeabilidad de especies gaseosas son similares como el concreto con un cemento común, sin embargo considera altamente susceptible el concreto con alto nivel de escoria y expuesto al aire libre, siendo sumamente agresivo en lugares con un ambiente seco. Sin embargo, puntualiza que dar atención en el recubrimiento para el acero de refuerzo, y acotando las cantidades de escoria para situaciones medioambientales de riesgo excesivo de carbonatación puede disminuir tal efecto, siendo así que el nivel de reemplazo de escoria debe quedar limitado hasta un 50%. Para ambientes considerablemente húmedos y en presencia de cloruros puede emplearse hasta un nivel del 70% (Osborne, 1999).

Ante lo dicho anteriormente se puede decir que el debido curado de los concretos con escoria de alto horno debe ser considerado un factor imprescindible para la hidratación y de esa manera poder garantizar un buen desempeño en la resistencias mecánicas y de durabilidad.

Por lo consiguiente, se puede decir que el uso y el nivel de reemplazo de la escoria de alto horno en los sistemas cementantes para concreto, quedará definido de acuerdo a las características de diseño de la mezcla de concreto, tanto fresco como endurecido, y del medio en donde serán expuestos los elementos estructurales.

5. CONCLUSIONES

Después de re-visitarse el estado del arte sobre la f_c en concretos con escoria de alto horno se pudo confirmar, a través de la experiencia de diversos autores que evaluaron diversas condiciones y tipos de escoria, que el nivel de reemplazo puede ser significativamente alto, pero al rebasar el 50% será necesario un esquema estricto de control de calidad en la preparación y la combinación de otros aditivos que coadyuven al mejoramiento de la resistencia mecánica, ya que de lo contrario se provocarán efectos adversos a los deseados.

El nivel de reemplazo máximo recomendado por varios autores y de acuerdo a los resultados obtenidos por otros es de 70 % para escoria en ambientes de poca agresividad de carbonatación, de lo contrario se debe limitar hasta 50%.

El concreto donde se sustituya parcialmente el cemento por EAH requerirá de un mayor tiempo de hidratación para garantizar la f_c deseada, siendo de crucial importancia el curado del concreto.

6. AGRADECIMIENTOS

Al CINVESTAV unidad Mérida y al CONACYT por el apoyo en el financiamiento del estudio de doctorado de J. A. Cabrera-Madrid

7. REFERENCIAS

- AASHTO-M240-00. (2000), *Blended hydraulic cements*.
AASHTO-M302-00. (2000), *Ground granulated blast-furnace slag for use in concrete and mortars*.

- Abdelkader, B., El-Hadj, K., and Karim, E. (2010), “*Efficiency of granulated blast furnace slag replacement of cement according to the equivalent binder concept*”, *Cement and Concrete Composites*, 32: pp. 226-231.
- Aguilar, O. A. M., Castro-Borges, P., and Escalante-García, J. I. (2010), “*Hydraulic binders of Fluorgypsum–Portland cement and blast furnace slag, stability and mechanical properties*”, *Construction and Building Materials*, 24: pp. 631-639.
- Amrane, A. and Kenai, S. (1994). “*Propriétés mécaniques et durabilité du béton au laitier en climat chaud*”, in Proceedings of the international seminar on the quality of concrete in hot climate. (Ghardaia, Algeria).
- Arezoumandi, M. and Volz, J. S. (2013), “*Effect of fly ash replacement level on the shear strength of high-volume fly ash concrete beams*”, *Journal of Cleaner Production*, 59: pp. 120-130.
- AS-3972. (2010), *General purpose and blended cements*, (Australia).
- Ashtiani, M. S., Scott, A. N., and Dhakal, R. P. (2013), “*Mechanical and fresh properties of high-strength self-compacting concrete containing class C fly ash*”, *Construction and Building Materials*, 47: pp. 1217–1224.
- ASTM-C-989-99. (1999), *Standard specification for ground granulated blast-furnace slag for use in concrete and mortars*.
- ASTM-C595-00. (2000), *Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*. (USA)
- Atis, C. D. and Bilim, C. (2007), “*Wet and dry cured compressive strength of concrete containing ground granulated blast-furnace slag*”, *Building and Environment*, 42: pp. 3060–3065.
- Atis, C. D. (2003), “*Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash*”, *Construction and Building Materials*, 17: pp. 147–152.
- Bagheri, A. (2013), “*Comparing the performance of fine fly ash and silica fume in enhancing the properties of concretes containing fly ash*”, *Construction and Building Materials*, 47: pp. 1402–1408.
- Berndt, M. L. (2009), “*Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate*”, *Construction and Building Materials*, 23: pp. 2606-2613.
- Bilim, C., et al. (2009), “*Predicting the compressive strength of ground granulated blast furnace slag concrete using artificial neural network*”, *Advances in Engineering Software*. 40: pp. 334–340.
- Bouikni, A., Swamy, R. N. and Bali, A. (2009), “*Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag*”, *Construction and Building Materials*, 23: pp. 2836–2845.
- Cassgnabere, F., Mouret, M. and Escadeillas, G. (2009), “*Early hydration of clinker-slag-metakaolin combination in steam curing conditions, relation with mechanical properties*”, *Cement and Concrete Research*, 39,1: pp. 1164-1173.
- Chidiac, S. E. and Panesar D. K. (2008), “*Evolution of mechanical properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28 days*”, *Cement and Concrete Composites*, 30: pp. 63-71.
- Council, U. S. G. B. (2014), *LEED For New Construction Fact Sheet*. <http://www.usgbc.org>].
- Day, K. W. (2006), *Concrete Mix Design, Quality Control and Specification*. (NY, EE. UU). p. 7.
- Feret, R. (1982), “*Sur la Compacité des mortiers hydrauliques*”, *Annales des ponts et Chaussées*, 4,7: pp. 155-164.
- Gambhir, M. L. (2009), *Concrete Technology, Theory and Practice*. (U.K): p. 3.
- Gjørv, O. E. and Sakai, K. (2000), *Concrete technology for a sustainable development in the 21st century*. (London: E & FN Spon). P. 281.
- Hadjasadok, A. et al. (2012), “*Durability of mortar and concretes containing slag with low hydraulic activity*”, *Cement and Concrete Composites*, 34: pp. 671-677.

- Hooton, R. D. (2000), “*Canadian use of ground granulated blast-furnace slag as a supplementary cementing material for enhanced performance of concrete*”, Canadian Journal of Civil Engineering, 27: pp. 754 - 760.
- Hwang, C. L. and Shen, D. H. (1991), “*The effects of blast furnace slag and fly ash on the hydration of Portland cement*”, Cement and Concrete Research, 21: pp. 410-425.
- IRAM-5000-0. (2000), *Cemento. Cemento para uso general. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción*, (Argentina).
- IRAM-5000-1. (2000), *Cemento. Cemento con propiedades especiales*, (Argentina).
- Johari, M. A. M., et al. (2011), “*Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete*”, Construction and Building Materials. 25: pp. 2639–2648.
- Kosmatka, S. H. (2004), “*Diseño y control de mezclas de concreto*”, Portland Cement Association (PCA), (México). P. 25.
- Kriker, A. (1992), “*Durabilité du béton à base de laitier*”, (Francia: ENP Alger): p.
- Lea, F. M. (1971), “*The Chemistry of Cement and Concrete*”. (N.Y. USA): p 414.
- Lee, N. K. and Lee, H. K. (2013), “*Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperatura*”, Construction and Building Materials, 47: pp. 1201-1209.
- Li, Q., Li, Z., and Yuan, G. (2012), “*Effects of elevated temperatures on properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag as cementitious material*”, Construction and Building Materials, 35: pp. 687–692.
- Li, Y. (2011), “*Microstructure and properties of high performance concrete with steel slag powder*”, Materials Science Forum, 675-677: pp. 503-506.
- Lübeck, A., et al. (2012), “*Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag*”, Cement and Concrete Composites, 34: pp. 392–399.
- Malhotra, V. M. and Mehta, P. K. (1996), “*Pozzolanic and cementitious materials*”. Advances in Concrete Technology. (UK): p. 102.
- Mostafa, N. Y., et al. (2001), “*Characterization and evaluation of the hydraulic activity of water-cooled slag and air-cooled slag*”, Cement and Concrete Research, 31: pp. 899 - 904.
- NCh148.Of68. (1968), *Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales*, (Chile).
- Nedi, M. (2001), “*Ternary and quaternary cements for sustainable development*”. American Concrete Institute, 23,4: pp. 34-42.
- NMX-C414-ONNCCE. (1999), *Industria de la construcción. Cementos hidráulicos – Especificaciones y métodos de prueba*, (México).
- NTC-30. (1996), *Cemento portland. Clasificación y nomenclatura*, (Colombia).
- Oner, A. and Akyuz, S. (2007), “*An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete*”, Cement and Concrete Composites, 29: pp. 505 - 514.
- Osborne, G. J. (1999), “*Durability of Portland blast furnace slag cement concrete*”, Cement and Concrete Composites, 21: pp. 11-21.
- Pal, S. C., Mukherjee, A. and Pathak, S. R. (2003), “*Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete*”, Cement and Concrete Research, 33: pp. 1481 - 1486.
- Polder, R. B. (1996), “*The influence of blast furnace slag, fly ash and silica fume on corrosion of reinforced concrete in marine environment*”, Heron, 41,4: pp. 287-300.
- Puertas, F. (1993), “*Escoria de alto horno: composición y comportamiento hidráulico*”, Materiales de Construcción, 43,229: pp. 37 - 48.
- Ramezani-pour, A. A. and Malhotra, V. M. (1995), “*Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume*”, Cement and Concrete Composites, 17: pp. 125-133.

- Sánchez, R., Palacios, M. and Puertas, F. (2011), “*Cementos petroleros con adición de escoria de horno alto, características y propiedades*”, *Materiales de Construcción*, 61, 302: pp. 185-211.
- Shariq, M., Prasad, J. and Masood, A. “*Effect of GGBFS on time dependent compressive strength of concrete*”, *Construction and Building Materials*, 24: pp. 1469–1478.
- Shetty, M. S. (2013), *Concrete technology - Theory and practice*. (India: S. Chand): p. 201.
- Siddique, R. (1971), *Waste Materials and Byproducts in concrete*, (Berlin, Alemania): p 36.
- Siddique, R. and Bennacer, R. (2012), “*Use of iron and steel industry by-product (GGBS) in cement paste and mortar*”, *Resources, Conservation and Recycling*, 69: pp. 29– 34.
- Slag Cement Association. LEED-NC 2.1, (2005). Guide: Using slag cement in sustainable construction. Available from: www.slagcement.org.
- SP43. Australian Technical Infrastructure Committee. (2012), *Cementitious materials for concrete*, (Australia).
- Topç, I. B. and Boga, A. R. (2010), “*Effect of ground granulate blast furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete*”, *Materials and Desing*, 31: pp. 3358-3365.
- UNE-EN-197-1. (2013), *Cemento. Parte I: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes*. (España)
- Walker, R. and Pavia, S. (2011), “*Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime-pozzolan pastes*”, *Materiales and Structures*, 4,6: pp. 1139-1150.
- Wan, H., Shui, Z. and Lin, Z. (2004), “*Analysis of geometric characteristics of GGBS particles and their influences on cement properties*”, *Cement and Concrete Research*, 34: p. 133-137.
- Wang, L. K., Hung, Y. T. and Shamma, N. K. (2010), *Handbook of Advanced Industrial and Hazardous Wastes Treatment*, (E. U.: CRC Press Taylor & Francis Group): p. 170.
- Yeau, K. Y. and Kim, E. K. (2005), “*An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast furnace slag*”, *Cement and Concrete Research*, 35: pp. 1391-1399.