

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**

REVISTA LATINOAMERICANA DE CONTROLE DA QUALIDADE, PATOLOGIA E RECUPERAÇÃO DA CONSTRUÇÃO

<http://www.revistaalconpat.org>

É motivo de muita satisfação e alegria para a equipe da Revista ALCONPAT ver publicada a primeira edição do nosso oitavo ano de divulgação.

O objetivo da Revista ALCONPAT (RA) é publicar estudos de casos relacionados com os temas da nossa associação, ou seja, controle de qualidade, patologia e reabilitação das construções, motivando desde já a apresentação de pesquisas básicas ou aplicadas, revisões ou pesquisa documental.

Esta edição apresenta nossa quarta edição especial, desta vez dedicada às **Aplicações Especiais de Concreto**.

Esta edição V6N1 começa com um trabalho da **Espanha** e do **México**, onde José Bernal e seus colegas obtêm concretos auto-compactáveis com nano-sílica, sílica ativa e misturas binárias de ambas as adições que satisfazem a demanda por altas resistências mecânicas e duráveis, determinando que a dosagem com melhor desempenho é aquela que contém 2,5% de nano e 2,5% de sílica ativa.

No segundo trabalho, do **México**, Marisol Gallardo e seus colegas nos falam sobre a síntese de um clínquer de sulfoaluminato de cálcio calcinando uma mistura de cinza volante, fluoro, escória de alumínio e carbonato de cálcio a 1250 ° C. O clínquer foi misturado com 15, 20 ou 25% e.p. de $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$. Eles avaliaram a resistência à compressão dos cimentos curados obtidos em água potável e em meios corrosivos a 40 ° C. Cimentos curados em água potável desenvolveram resistências à compressão de 38-39 MPa, enquanto aqueles imersos em meios corrosivos mostraram uma diminuição neste. A degradação dos cimentos por ataque químico deveu-se a uma descalcificação e alteração das pastas.

No terceiro artigo do **Brasil**, Carlos Brites e colegas falam sobre o Edifício Comercial Brookfield Century Plaza, localizado em Alphaville, São Paulo, Brasil, que foi projetado apoiado em duas grandes plataformas de concreto. Um concreto de alta resistência (70 MPa) e concreto autoadensável (SCC) foi desenvolvido para essas bases grandes (cada uma medindo 28,4m x 18,6m x 4,5m). Um modelo numérico utilizando software FEM foi desenvolvido para prever o ganho térmico de hidratação de diferentes camadas de concreto, a fim de estabelecer o procedimento mais adequado para atender as exigências de tempo e construção, sem que apareçam rachaduras. Os procedimentos foram estabelecidos e supervisionados para controlar a produção do concreto na empresa que o produz e durante a concretagem. Finalmente, a temperatura interna do concreto foi

registrada para permitir uma melhor calibração do modelo.

O quarto artigo, de José Manuel Mendoza Rangel e colegas, vem do **México** e da **Espanha**; avaliam a durabilidade de duas argamassas feitas com substituições de cinzas volantes (CV) em peso em relação ao cimento total, comparando seu desempenho com três argamassas de reparo comerciais, expostas ao ataque de CO₂ em ambiente industrial.

O quinto trabalho nesta edição é escrito por Vladimir Ferrari e colegas do **Brasil**, que fazem o desenvolvimento e análise do comportamento de compostos de cimento de alto desempenho reforçados com fibras. É particularmente interessante ler como eles desenvolvem seus compostos híbridos e seu desenvolvimento experimental. Um artigo que vale a pena ler.

O artigo que encerra a edição especial é de Alejandro Cabrera Madrid e colegas do **México**, que apresentam um trabalho de revisão do estado da arte do sistema de cimentação CP-EAH, enfatizando seu efeito sobre a resistência mecânica do concreto. A utilização das características de cimentação do EAH com altos níveis de reposição é viável, sendo capaz de melhorar a resistência à compressão e em alguns casos a resistência à corrosão do aço, esta melhoria dependerá da quantidade de HEA e do ambiente de exposição do concreto. Nesta revisão, as substituições de EAH de até 70% em microclimas úmidos ou ambientes marinhos, e até 50% em ambientes propensos à carbonatação, foram confirmadas como benéficas. Nessas faixas, uma maior eficiência de substituição pode ser alcançada com relação à resistência à compressão.

Esta primeira edição especial do ano abre com uma boa notícia, já que todos os artigos da RA desde o seu primeiro número têm um número DOI. Da mesma forma, estreou a plataforma OJS, onde você pode desfrutar e ver com uma plataforma nova e mais eficiente o conteúdo da revista.

Estamos confiantes de que os artigos desta edição serão uma referência importante para os leitores envolvidos em questões de aplicações especiais de concreto. Agradecemos aos autores que participaram desta edição por sua disposição e esforço em apresentar artigos de qualidade e cumprir os prazos estabelecidos.

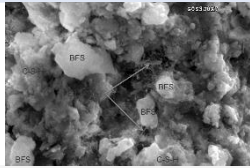
Por el Consejo Editorial



Pedro Castro Borges
Editor chefe



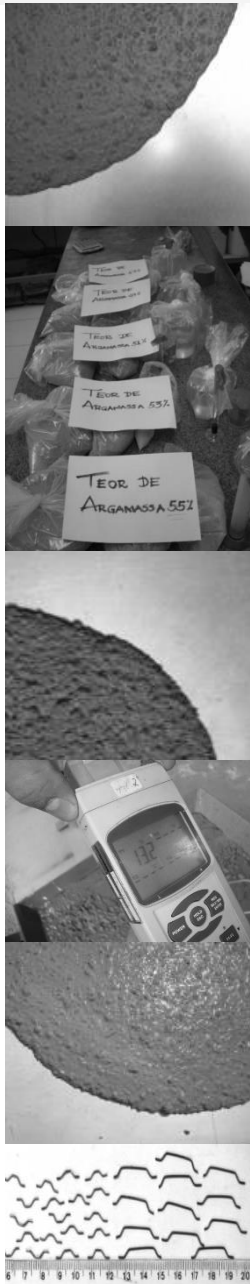
Bernardo Tutikian
Editor Convidado



SUMÁRIO

Página

- N. León, J. Bernal, A. Moragues, E. Sanchez-Espinosa:** Propriedades reológicas e mecânicas de um concreto auto adensável, com a adição de nano sílica e de micro sílica (sílica ativa). 1
- M. Gallardo Heredia, J. M. Almanza R., D. A. Cortés H., J. C. Escobedo B.:** Comportamento químico e mecânico de cimentos de sulfoaluminato de cálcio obtidos a partir de resíduos industriais. 15
- C. Britez, J. Gadea, M. Carvalho, P. Helene:** Hormigón y Concreto e Concretagem de Blocos de Fundação em Concreto Autoadensável e de Alta Resistência (70 MPa). 28
- J. M. Mendoza-Rangel, J. M. Flores-Jarquín, E. U. de Los Santos, P. Garcés:** Durabilidade de argamassas de reparo sustentáveis expostas a ambiente industrial. 41
- V. J. Ferrari, A. P. Arquez, J. B. De Hanai:** Compósitos cimentícios de alto desempenho para aplicação como substrato de transição em vigas. 52
- Artículo de Revisión:**
- J. A. Cabrera-Madrid, J. I. Escalante-García, P. Castro-Borges:** Resistência à compressão de concreto com escória de alto forno. Revisão do estado da arte. 64





Propiedades reológicas e mecânicas de um concreto auto adensável, com a adição de nano sílica e de micro sílica (sílica ativa)

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.

RESUMO

O concreto auto adensável é um concreto dosado para assegurar a sua correta colocação em estruturas fortemente armados em que o processo de vibração é muito complicado e haja risco de alterar a posição da armadura. Juntamente com as vantagens deste concreto e devido ao aumento da procura de concretos de alto desempenho, a micro sílica ou sílica ativa e, mais recentemente, os nano-materiais são usados como adições aos concretos. Principalmente a nano sílica. O objetivo deste trabalho é a obtenção de concreto auto adensável com uso de nano sílica, sílica ativa e misturas binárias das duas adições para atender a demanda de alta resistência mecânica e durabilidade. A mistura com melhor desempenho foi aquela com 2,5 % de nano sílica e 2,5% de sílica ativa.

Palavras-chave: concreto auto adensável; nano sílica; sílica ativa; reologia do concreto; propriedades mecânicas do concreto.

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, fumed silica 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, fumed silica 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 fumed silica.

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

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.

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

1. INTRODUÇÃO

O concreto auto adensável é aquele capaz de preencher os espaços da forma e das armaduras sem necessidade de uso de vibrador mecânico, ao mesmo tempo que se mostra adequado para os casos de excesso de armadura e haja risco de alterar a posição da armadura.

O Prof. Okamura e Ozawa (1996) iniciam o desenvolvimento desse concreto na Universidade de Tóquio, em meados dos anos 90, atualizando os critérios de dosagem e controle nos anos seguintes. (Okamura, 1997, Okamura e Ouchi, 1999, Okamura, Ozawa, e Ouchi, 2000, Okamura, Maekawa, e Mishima, 2005).

Esse concreto é caracterizado por uma relação água / cimento reduzida, alto teor de finos, que podem ser cimento mais filler calcário, um reduzido teor de agregado graúdo e a inclusão de aditivos superplastificantes.

Tudo isso permite a obtenção de um concreto de alta fluidez, que, por ação do seu próprio peso, tem um bom auto adensamento, aparentemente com pouquíssima exsudação ou segregação (De la Peña 2001, EHE-08, 2010). Na indústria de pré-moldado as vantagens da utilização deste concreto são ainda maiores, uma vez que aumenta a vida útil dos moldes porque reduz os danos ocasionados pelos vibradores aos moldes e reduz o ruído.

Juntamente com as vantagens do concreto auto adensável e, como resultado do aumento da procura de concreto de alta resistência, passou a ser conveniente utilizar os nano materiais como adições. Estes destinam-se a conferir características especiais, para o concreto, quer na sua capacidade resistente quanto na durabilidade.

Por conseguinte, o concreto a ser obtido é considerado como um concreto de alto desempenho, uma vez que não só tem de satisfazer a exigência de alta resistência mecânica, mas também deve atender a requisitos rigorosos relativos à durabilidade.

De todas as nano partículas pesquisadas, as mais utilizadas são a sílica, titânio, alumina e ferro (Sanchez e Sobolev, 2010). A natureza que deverá ser escolhida do tipo da nano partícula, depende das propriedades que se deseja melhorar ou se deseje conferir ao concreto destinado a uma certa função.

A maior concentração de estudos sobre a incorporação de nano partículas na área de engenharia civil são os relativos ao uso da nano-SiO₂ (Kawashima, Hou, Corr, Shah, 2013). A maioria dos estudos concorda que a incorporação de tais nano partículas produz mudanças micro estruturais porque é um ativador das reações pozolânicas (Bjornstrom, Martinelli, Matic, Börjesson, Panas, 2004).

De modo semelhante ao resultado já conhecido pelo uso de sílica ativa, a nano-SiO₂ reage com o hidróxido de cálcio Ca (OH)₂, produzindo uma maior quantidade de gel de CSH para densificar o material, com a consequente redução de sua permeabilidade (Said, Zeidan, Bassuoni, Tian, 2012) e lixiviação de Ca²⁺ (Nazari e Riahi, 2010).

O tamanho da sílica adicionada produz alterações no número e tamanho médio dos cristais de portlandita. Estas mudanças microestruturais estão associadas a mudanças nas propriedades macroestruturais das argamassas e concretos, tais como resistência à compressão, módulo de elasticidade (Yu, Spiesz, Brouwers, 2014; Zyganitidis, Stefanidou, Kalfagiannis, Logothetidis, 2011, e Leão, Massana, Alonso, Moragues, Sanchez-Espinosa, 2014), entre outras.

Existem vários estudos sobre a influência de nano sílica e de sílica ativa em concreto, comparando diferentes parâmetros (Mondal, Shah, Marks, Gaitero, 2010; Borralleras, 2012; Craeye, Van Itterbeeck, Desnerck, Boel, De Schutter, 2014; Rong, Sun, Xiao Jiang, 2015), mas há poucos trabalhos onde misturas binárias dessas duas adições tenham sido estudadas na dosagem de concreto auto adensáveis e de alto desempenho.

Portanto, o objetivo deste trabalho de pesquisa é o de estudar a influência da nano sílica e do micro sílica ou sílica ativa combinadas como adições em misturas binárias ao concreto auto adensáveis e de alta resistência, comparando propriedades reológicas e mecânicas com vistas a encontrar o teor ótimo da mistura dessas adições para as propriedades tanto no concreto fresco como no endurecido.

2. PROCEDIMENTO

Para os concretos estudados foi utilizado o cimento Portland CEM I 52,5 R (CP) de acordo com a norma EN 197-1, cujas propriedades são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades físico-químicas do cimento Portland (CP), nanoSi (nSI) e microSi ou sílica ativa (mSI)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Pérda ao fogo (%)	Massa específica (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	-	-	-	-	-	-	-			

A nano sílica (nSI) utilizada foi a Levasil 200/40% sob a forma de dispersão aquosa com uma riqueza de 40%, uma área superficial específica de 200m² / g e um tamanho médio de partícula de 15 nm. A sílica ativa (mSI) utilizada foi a Elkem Microsílica MS 940 U, composta de esferas amorfas não porosas, aglomeradas de SiO₂, com uma superfície específica de 15 a 30m² / g e um tamanho médio de partícula das esferas de cerca de 150 nm.

Embora algumas das esferas encontram-se isoladas, a maioria delas ficam aglomeradas com um tamanho típico de 100 a 1000nm. Os aditivos utilizados foram: SIKA superplastificante ViscoCrete® 5720 (SP) (polycarboxylato) e aditivo modificador de viscosidade (MV) SIKA Estabilizador 4R. Os agregados utilizados nas misturas foram areia de rio com diâmetro inferior a 4 mm, pedregulho de 6mm a 12mm e filler calcário com granulometria conforme com a norma UNE 12620:2003+A1:2009, com um diâmetro máximo de 63.000 nm.

Foram dosadas dez misturas diferentes (ver Tabela 2). Todas as misturas mantiveram uma relação água / materiais cimentícios de 0,36. As dosagens foram: três com 2,5%, 5% e 7,5% de nano-SiO₂ ([nSi]-2,5; [nSi]-5; [nSi]-7,5), três com 2,5%, 5% e 7,5% de micro-SiO₂ ([mSi]-2,5; [mSi]-5; [mSi]-7,5), e três com as duas adições, com as percentagens de cada adição de 2,5% / 2,5%, 5% / 2,5% e 2,5% / 5% nano-SiO₂ e SiO₂, respectivamente ([nmSi]-2,5/2,5; [nmSi]-5/2,5; [nmSi]-2,5/5) em relação ao peso de cimento. Foi dosada uma décima mistura, sem qualquer adição, que será considerada como referência.

Para avaliar as características de auto adensamento dos concretos foram realizados ensaios no concreto fresco, padronizados de acordo com a norma EHE-08(2010). Tais ensaios foram o de espalhamento (UNE-EN 12350-8), o teste V funil (EN 12350-9), o ensaio da caixa L (UNE-EN 12350-10) e o ensaio de escoamento com anel japonês (UNE-EN 12350-12).

Comprovados o auto adensamento das misturas, procedeu-se à moldagem de 12 corpos de prova cilíndricos de 100mm por 200mm e dois corpos de prova normalizados de 150mm de diâmetro e altura de 300mm. Essas amostras foram mantidas no laboratório durante 24 h. Após esse tempo, foram desmoldados e submetido a cura por 28 dias numa câmara a uma temperatura de 20 ± 2 ° C com humidade superior a 95%, de acordo com a norma UNE-EN 12390-2.

Tabela 2. Estudo de dosagem dos concretos

Componentes (kg/m ³)	HAC	[mSi]-2,5	[mSi]-5	[mSi]-7,5	[mSi]-2,5	[mSi]-5	[mSi]-7,5	[mSi]-2,5/2,5	[mSi]-5/2,5	[mSi]-2,5/5
Cimento	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Nano sílica	-	11,25	22,5	33,75	-	-	-	11,25	22,5	11,25
		2,5%	5%	7,50%				2,5%	5%	2,5%
Sílica ativa	-	-	-	-	11,25	22,5	33,75	11,25	11,25	22,5
					2,5%	5%	7,50%	2,5%	2,5%	5%
Água	162	166,0	170,1	174,1	166,0	170,1	174,1	170,1	174,1	174,1
Filler calcário	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Areia	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160
pedregulho 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 os concretos de acordo com as suas propriedades mecânicas foram ensaiados 3 corpos de prova a resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias de idade de acordo com a norma UNE-EN 12390-3. O tamanho máximo do agregado inferior a 12mm, viabilizou o uso deste ensaio (Fernandez, 2013).

Além disso, aos 28 dias de cura, procedeu-se a determinar a resistência à tração, testando 2 amostras de 100x200 mm de acordo com a UNE EN 12390-6: 2001. Os 2 corpos de prova de 150x300 mm foram ensaiados com a mesma idade para determinar o módulo de elasticidade de acordo com a norma UNE-EN 83316: 1996.

Estes testes foram realizados em uma prensa IBERTEST, com uma capacidade máxima de 1.500 kN. Para determinar as deformações foi utilizado sistema LVDT marca IBERTEST com um computador de aquisição de dados.

As cargas foram uniformemente aumentadas a uma velocidade de 0,2 MPa/s, durante três ciclos sucessivos de carga e descarga para 40% da resistência à compressão.

O corpo de prova restante foi utilizada para a caracterização micro estrutural das misturas. Para isso foi feito, para todas as idades e misturas concebidas, uma análise termo gravimétrica (TGA) aos 7, 28 e 91 dias, de acordo com a norma ASTM E1131: (2008).

Para este teste, uma amostra do pó, foi utilizado com um tamanho de partícula inferior a 0,5mm. Para se conseguir essas características se utilizou uma amostra de 20mm depois de eliminado os 20mm mais externos. A amostra obtida foi submetida a um moinho de mandíbulas para obter partículas de tamanhos inferiores a 8 mm.

Estas partículas foram colocadas num dessecador ligado a uma bomba de vácuo, que assegurou uma pressão de vácuo entre 1 e 5 kPa. Manteve-se as amostras no dessecador durante 45 minutos. Posteriormente, foram imersas por 24 horas em isopropanol a 95% a fim de deter os processos de hidratação no concreto. Finalmente as amostras foram secas em estufa a 40° C durante um tempo mínimo de 72h para assegurar a secagem completa da amostra.

Antes de realizar o ensaio, as partículas foram trituradas num almofariz de aço manualmente, dando acabamento de refinação do grão no moinho de ágata, Retsch RM 200. O processo termina por peneiramento do pó através de um crivo/peneira de 0,5 mm. A massa moída, pesando aproximadamente 300 g, foi agitada em saco fechado para homogeneizar.

Foi realizado o quarteamento da amostra, dividindo-a em 8 partes até completar 2g, que então foram colocadas em estufa a 40° C durante 7 dias até estabilizar. O equipamento utilizado foi um analisador térmico simultâneo, marca SETARAM, modelo LABSYS EVO, com uma balança de precisão de 0,1 g. Para o ensaio foi empregada uma amostra de aproximadamente 55 mg, a qual foi sujeita a uma rampa de aquecimento dinâmica de 40° C a 1.100° C com velocidade de 10°C/minuto.

Cadinhos de alumina foram usadas como materiais de referência α -alumina (α -Al₂O₃), previamente calcinada a 1200 ° C, a uma atmosfera de ensaio de nitrogênio (N₂).

Esta análise permitiu determinar a quantidade de CSH e portlandita (Ca (OH)₂, presente em cada concreto. Para este efeito, foram determinados os valores das perdas de água de gel submetendo a amostra a temperaturas entre 105 ° C e 400° C. As perdas de água de Portlandita livre foram obtidos numa gama de temperatura entre 400° C e 600 ° C aproximadamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Propriedades reológicas

Na inspeção visual das 10 misturas não foi observado segregação nem exsudação. Este resultado é contrário ao obtido por Dubey e Kumar (2012) que dizem que mais de 2% de um aditivo super plastificante tipo carboxalato, semelhante ao utilizado no presente estudo, induz a mistura à segregação.

No entanto, as avaliações visuais das misturas mostraram uma grande quantidade de borbulhamento nas misturas com nSi. Este fenómeno pode ser atribuído à quantidade elevada de super plastificante, necessária para obter a trabalhabilidade desejada conforme explica Borrelleras Mas (2012).

No caso desta pesquisa não foi determinado o teor de ar incorporado nem ar aprisionado. No entanto, Yu et al. (2014) realizaram ensaios em concreto de alto desempenho com um teor de nano sílica entre 1% a 5% e quantidade fixa de super plastificante, verificando que o teor de ar do concreto fresco aumentou exponencialmente com o aumento do teor de nSi. Essa constatação coincide com a desta pesquisa e permite concluir que tanto a quantidade de SP como de nSi, podem acarretar aumento dos teores finais de ar aprisionado/incorporado.

Além disso, para avaliar se essa quantidade de ar pode ser removida, as misturas foram repetidas e energeticamente vibradas em mesa vibratória, mas o ar não saiu da mistura que permaneceu homogênea e coesa.

Observou-se também que a camada de superfície tinha uma aparência de plástico, que não permitia a expulsão das referidas bolhas. Posteriormente foram realizados ensaios de resistência à compressão e PIM e não foram observadas diferenças significativas entre as misturas, razão pela qual esses resultados não estão aqui publicados.

A proposta dos autores deste estudo para mitigar a quantidade de bolhas é dar maior energia ao concreto misturado, e aumentar o tempo de mistura, conseguindo assim que as bolhas sejam expulsas através dos movimentos mecânicos, obtendo inclusive boa trabalhabilidade da mistura fresca. Também é recomendável utilizar mais um aditivo de natureza condensado de polietileno para atuar como agente anti-espumante.

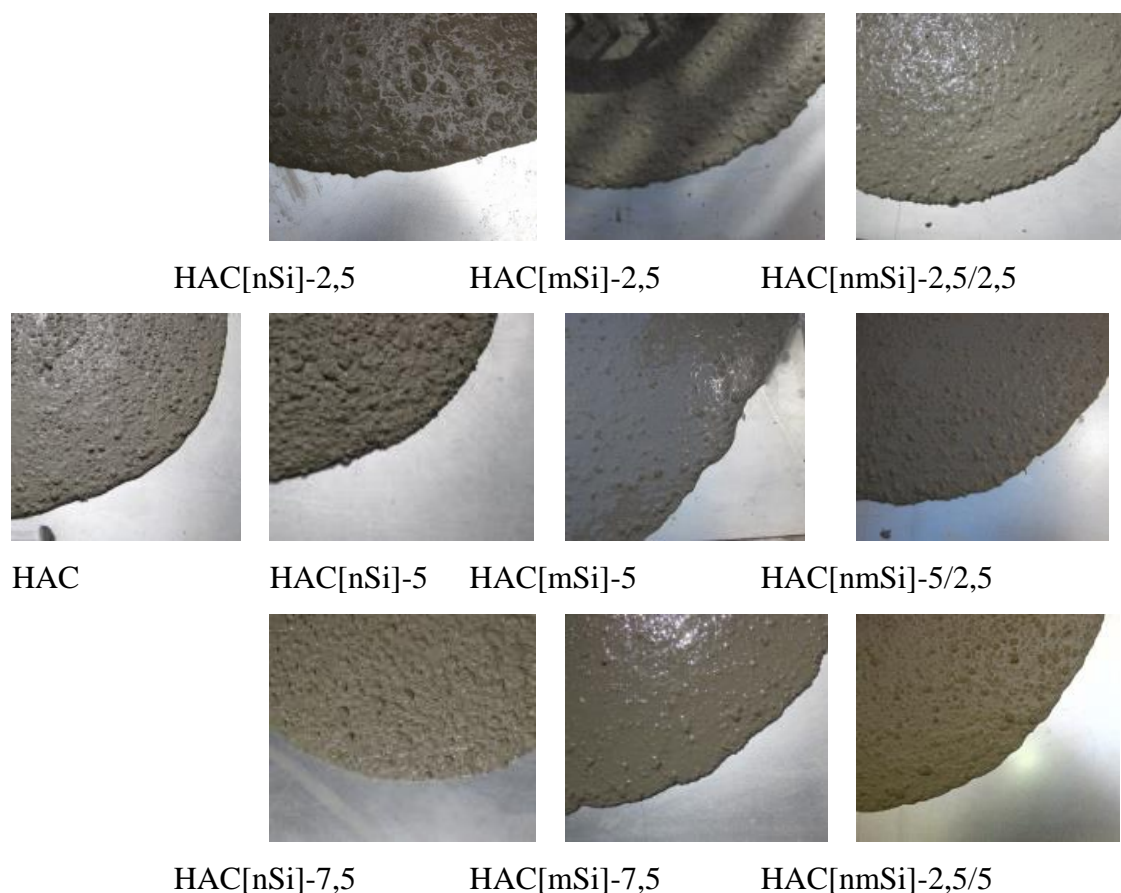


Figura 1. Aspecto da borda das diferentes misturas, em estado fresco, depois do ensaio de escoamento.

Os valores obtidos nos vários ensaios para verificar o auto adensamento do concreto, de acordo com a EHE-08 (2010), são mostrados nas Figuras 2, 3, 4 e 5. Estas apresentam o diâmetro de escoamento (d_f) (Figura 2), o tempo de T_v que passa através do funil em V (Figura 3), a taxa de escoamento da caixa L (C_{bl}) (Figura 4) e o diâmetro de escoamento com anel japonês (d_{if}) (Figura 5).

Na Figura 2, em geral, observa-se que o diâmetro de escoamento varia de 550 mm a 850 mm. Além disso, não mostram segregação ou exsudação, apesar de ter grandes quantidades de superplastificante e até mesmo, no caso da mistura [nSi]-7,5, teor superior ao permitido pela (EHE-08), que é de 5%.

Estes resultados contradizem Dubey e Kumar (2012) que dizem que com mais de 2% de superplastificante, semelhante ao utilizado no presente estudo, sempre haverá risco de segregação. Inclusive alguns autores, (Borralleras, 2012), que argumentam que existe um teor ótimo máximo de superplastificante, teor esse não observado nesta pesquisa experimental.

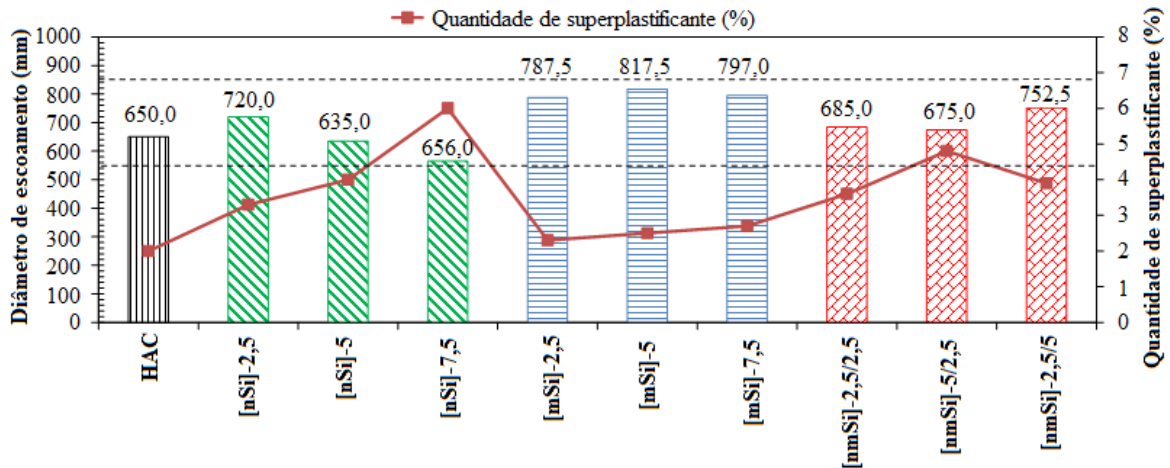


Figura 2. Diâmetro de escoamento (D_f) (mm) e quantidade de superplastificante.

Também é possível observar a existência de uma clara influência do tipo de adição. Assim, misturas com adição de nSi mostram uma diminuição do diâmetro de escoamento à medida do aumento do teor de nano sílica. Isso resulta em uma fluidez menor com aumento brutal da coesão, mesmo quando há um aumento de 6% no teor de aditivo super plastificante, muito acima do limite recomendado pela EHE-80.

Este fenômeno não ocorre quando sílica ativa mSi é usada como uma adição. Neste caso, há pouca variabilidade de diâmetro, que é cerca de 800 mm, ou seja, máxima fluidez. Finalmente, nas misturas binárias, observa-se como a nano sílica nSi compromete a fluidez sendo sempre necessário aumentar o teor de super plastificante.

Jalal et al. (2012), afirmam que tanto a nSi quanto a mSi melhoram a fluidez do concreto auto adensável, mas não avaliaram o quanto interfere na trabalhabilidade um aumento de teores dessas adições. No entanto, observam que teores de 2% de nSi não alteram substancialmente a trabalhabilidade do concreto fresco e por essa razão estudaram misturas com 2% de nSi e 10% de mSi. Por outro lado, esta quantidade elevada de adições e aditivos pode induzir bolhas e isto é diretamente proporcional aos teores adicionados (Nazari e Riahi, 2010).

Estas bolhas podem resultar em poros não interligados no material endurecido, o que pode comprometer as características de resistência do concreto de modo que é recomendável utilizar junto com o superplastificante um outro aditivo antiespumante à base de condensado de polietileno (Jalal et al., 2012).

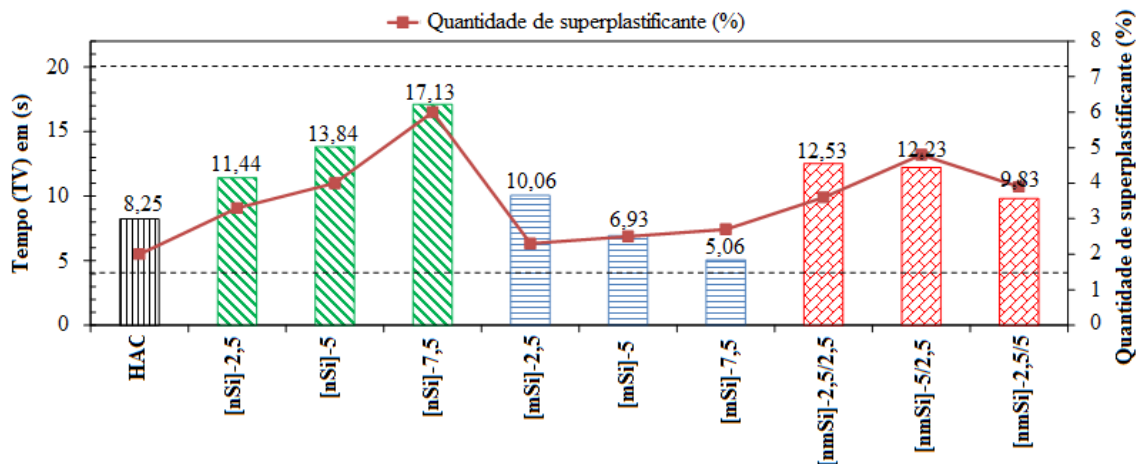


Figura 3. Tempo (TV) em (s) de escoamento no funil e quantidade de superplastificante

A Fig. 3 mostra o tempo de escoamento do concreto auto adensável através do ensaio do funil V. Os concretos atendem aos requisitos da EHA-08 para concreto auto adensáveis pois os tempos medidos estão entre 4s e 20s.

Observa-se que o comportamento das misturas é claramente diferente. Aqueles contendo apenas nSi acarretam aumentos do tempo de escoamento diretamente proporcional ao aumento do teor de nSi. As misturas com mSi, ao contrário, reduzem o tempo de escoamento com o aumento do teor de mSi na mistura.

Em ambos os casos foi necessário aumentar o teor de super plastificante, sendo bem elevado no caso das misturas com nSi. Portanto pode-se afirmar que para uma quantidade fixa de super plastificante, as misturas com nSi irão perder trabalhabilidade e fluidez, pois exigem cada vez teores mais altos de super plastificante.

Misturas binárias apresentam um comportamento coerente com as observações parciais. Aumentar nSi implica aumentar teor de super plastificante ou reduz fluidez. Aumentar mSi aumenta fluidez e reduz demanda de super plastificante. Estes resultados diferem dos obtidos por Jalal et al. (2012), que obteve um tempo, através do funil V, mínimo de 4s para misturas com 500kg / m³ e 2% nSi e máximo (12 s) para a mistura binária 10% mSi + 2% nSi e 400 kg / m³. As diferenças no consumo de cimento poderiam ser responsáveis por estas diferenças notáveis nos resultados já que um aumento na quantidade de cimento melhora as propriedades reológicas devido a um aumento no volume da pasta (Jalal et al., 2012)

Na Fig. 4, apresenta-se a medida da taxa de escoamento na caixa L, C_{b1} observando-se todos os valores dentro do intervalo de 0.75 e 1. No entanto, observou novamente um comportamento diferente dependendo do tipo de adição utilizada. Assim, a taxa de escoamento na caixa L, ficou menor no caso de aumento do teor de nSi.

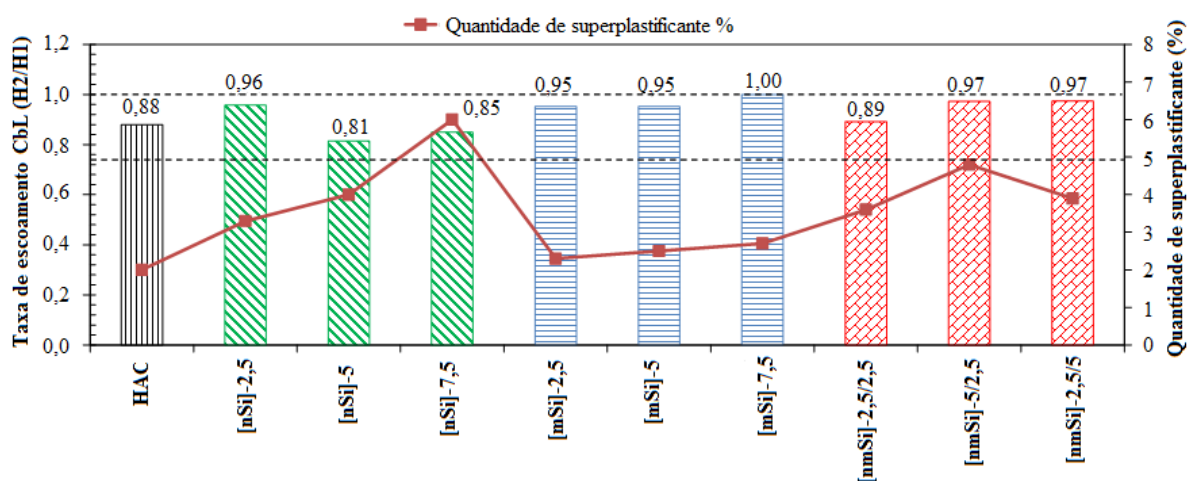


Figura 4. Taxa de escoamento na caixa L e quantidade de superplastificante.

Além disso, este parâmetro fornece informações sobre a capacidade de concreto auto adensável (EHE-08, 2010) se auto nivelar. Observou-se que os menos autonivelantes foram os concretos com altos teores de nSi. No entanto, os valores permanecem substancialmente constantes para ambas as dosagens de mSi, e para as misturas binárias com adições. Cabe destacar a elevada taxa de escoamento obtida com as misturas de 7,5% de mSi, que apresentou resultado igual a 1, máximo possível.

Esse bom desempenho pode explicar-se porque essa mistura é a mistura mais líquido de todas as estudadas. Na Fig. 5, é mostrado o valor de escoamento do anel japonês (d_{if}). A EHE-08 limita o valor deste parâmetro, dependendo do diâmetro do escoamento (d_f) obtido da mesma mistura,

devendo cumprir que a sua diferença seja inferior a 50mm, o que, efetivamente, ocorreu para todas as misturas estudadas.

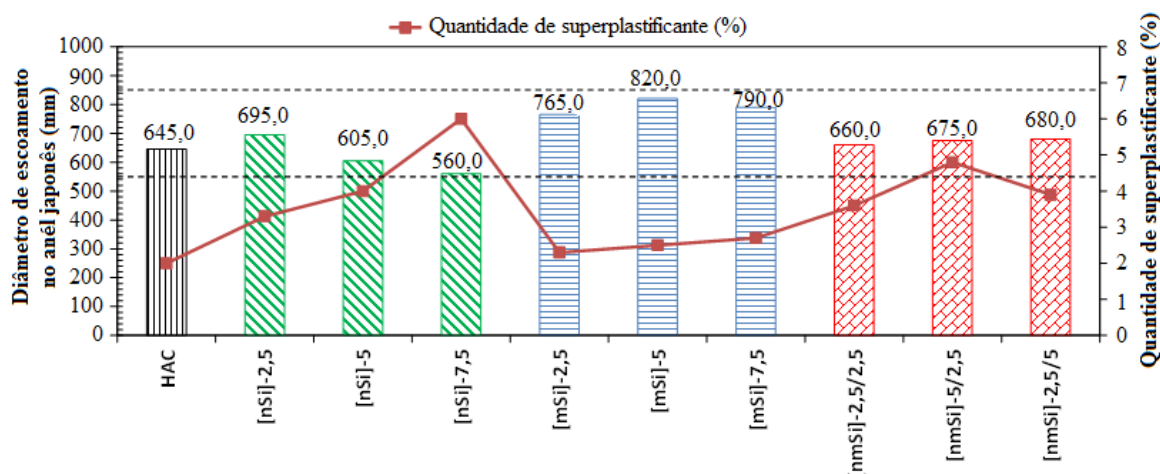


Figura 5. Diâmetro de escoamento no anel japonês (cm) e quantidade de superplastificante.

Ao observar a Fig. 5 nota-se que o concreto com adição de nSi têm um comportamento similar ao do ensaio de escoamento (d_f), ainda que com valores inferiores, uma vez que com esse ensaio se avalia a capacidade do concreto auto adensável superar obstáculos. Assim quanto maior o teor de nSi, menos capaz o concreto de superar obstáculos.

Em concretos com adição de mSi, ocorrem os valores mais altos. Nas misturas com adições binárias não se observam grandes variações, mas claramente as propriedades dos concretos são governadas pelo teor de nSi.

Uma observação importante no fabrico das misturas foi que o concreto com adição de nSi teve um aumento notável no tempo de pega. Não importou o teor de aditivos super plastificante pois a pega sempre ocorreu rapidamente, em poucos minutos. Isso fez com que a manipulação desses concretos fosse prejudicada.

No entanto, este fenômeno pode ser uma vantagem na indústria de pré-moldado, em que pega rápida pode ser benéfico, devido à possibilidade de desmoldagem em tempos mais curtos. Isto coincide com o que tem sido estudada por Bjornstrom et al. (2004) que indica que a nSi é um ativador das reações pozolânicas.

3.2 Propriedades mecânicas

3.2.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão das diferentes dosagens é apresentada na Fig. 6. Nesta, observa-se que os concretos com nSi têm resistência maior do que aquelas obtidas no concreto de referência. Além disso, esta resistência aumenta com o aumento da quantidade de adição nSi.

Para concretos com mSi, as resistências à compressão são um pouco maiores do que observadas no concreto de referência, com incrementos notáveis aos 7 dias e moderados nas demais idades. Por último, e no caso de misturas binárias, com as duas adições, não foi notado uma diferença de comportamento do concreto fresco que justifique a preponderância de uma adição sobre a outra. No entanto, as resistências mais elevadas são conseguidas com a mistura de [nmSi]-2,5/2,5, de modo que os autores acreditam que a resistência à compressão depende não apenas do tamanho da partícula e a quantidade adicionada, mas também a distribuição de tamanho de partícula de todos os componentes da mistura.

Assim que quanto mais compacta a granulometria da mistura, maior será sua resistência.

Nestas misturas, os valores de resistência à compressão alcançaram 82,17 MPa aos 28 dias de idade e 86,87 MPa em 91 dias. Isto representa um aumento de 36% em comparação com os valores obtidos do concreto de referência nas mesmas idades.

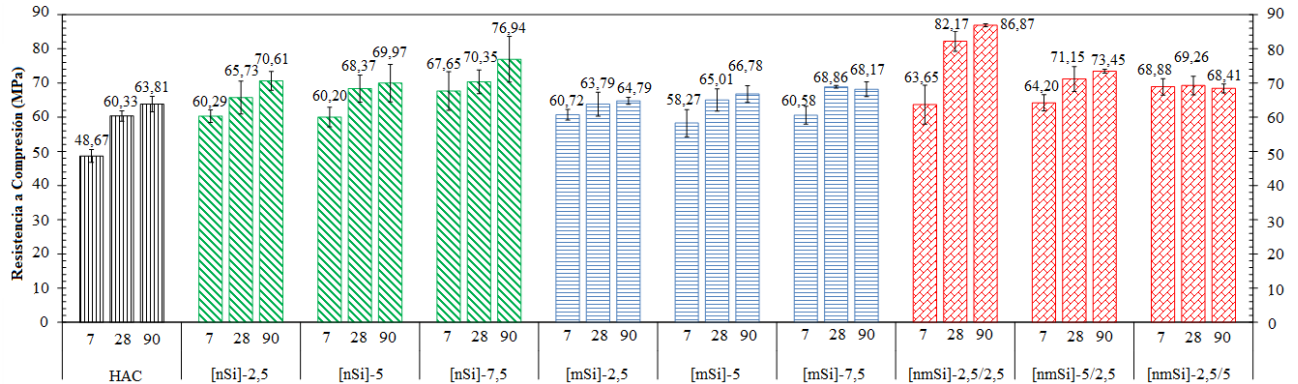


Figura 6. Resistência a Compressão (MPa)

3.2.2. Resistência à tração e módulo de elasticidade

Nas Fig. 7 e 8 são apresentados os resultados de resistência a tração indireta e do módulo de elasticidade. Os valores de resistência à tração indireta dos concretos com adições são significativamente maiores que os do concreto de referência.

No entanto não há diferenças significativas entre as misturas com adições. Ou seja, o tamanho e conteúdo das várias adições contidas nas diferentes misturas não alteraram significativamente a tração indireta.

Por outro lado, para o módulo de elasticidade, observou-se valores significativamente menores, para as misturas que contêm nSi. No restante dos concretos, os valores obtidos são similares entre eles e não diferem muito do módulo do concreto de referência.

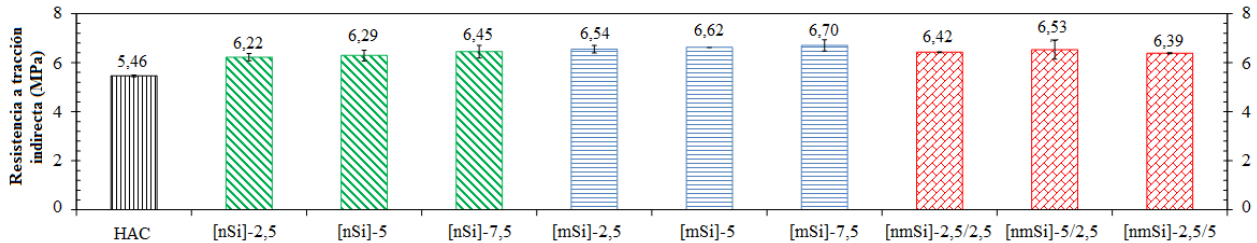


Figura 7. Resistência a tracción indirecta (MPa)

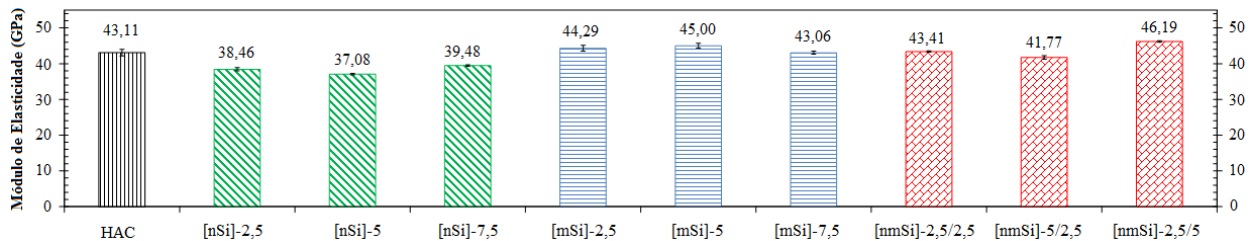


Figura 8. Módulo de Elasticidade (GPa)

3.3 Caracterização microestrutural, Análises termogravimétricas

Os resultados da análise termogravimétrica das dez dosagens são mostrados nas Figuras 9, 10 e 11, em que se apresentam a relação entre a perda de água do gel e de água da Portlandita livre aos 7, 28 e 91 dias de idade.

Em geral, os valores obtidos são tais que, para todas as idades, os maiores valores dessa razão são obtidos em concretos com nSi. Isto mostra que a formação de gel secundário ou tobermorita é maior o que justifica a redução da Portlandita.

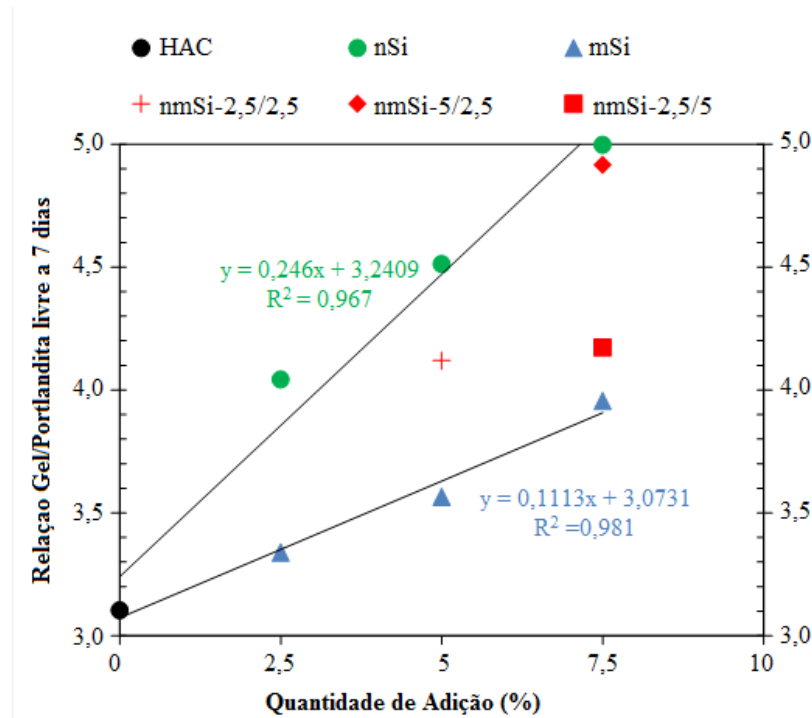


Figura 9. Relação Gel/Portlandita livre a 7 dias

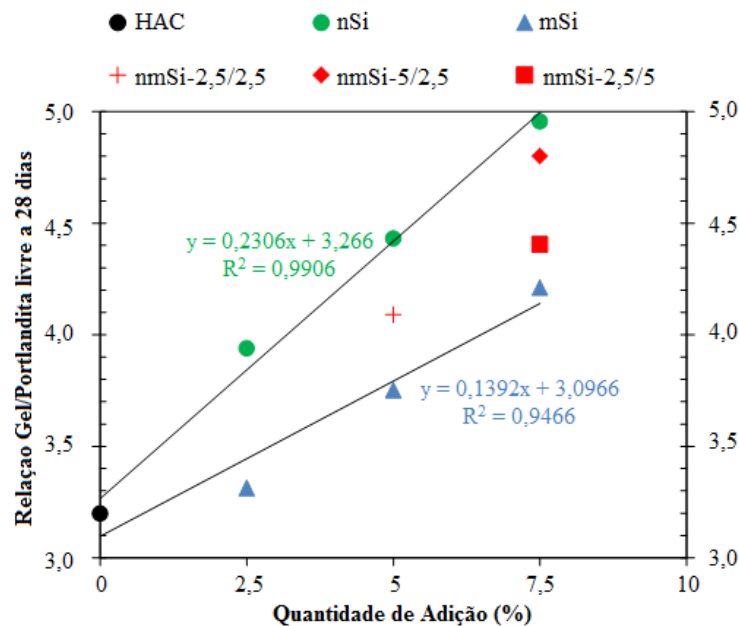


Figura 10. Relação Gel/Portlandita livre a 28 dias

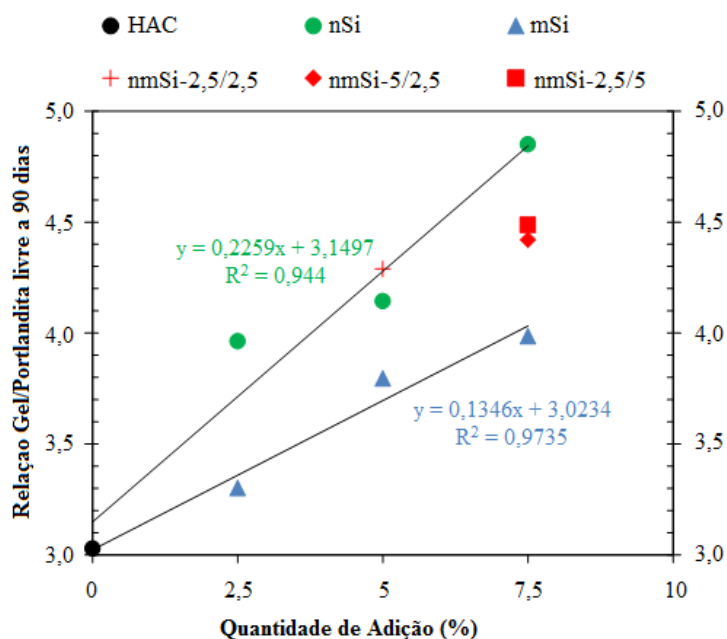


Figura 11. Relação Gel/Portlandita livre a 90 dias

Além disso, no caso dos concretos com a MSI, as relações têm valores inferiores que coincidem com os resultados de Mondal et. al. (2010), Zyganitidis et al. (2011), Jalal et al. (2012) e Leon et al. (2014). Em ambos os casos, a proporção aumenta quando o conteúdo da adição mSi também aumenta. O comportamento das misturas binárias parece definido pelo maior conteúdo de cada uma das adições.

Além disso, é importante notar que com o aumento da idade as misturas com nSi mostram uma diminuição nos valores da relação gel / portlandita livre. Este fenômeno pode ser observado, progressivamente, nas Figuras 9, 10 e 11. Isto sugere que a formação do gel diminui com a idade, ou seja, a atividade pozolânica se manifesta mais intensamente nas primeiras idades (Jalal et al., 2012).

Isto é consistente com os valores de resistência à compressão aos 7 dias. No entanto, nos concretos com mSi, os valores da relação gel / portlandita livre aumentam com o aumento da idade. Um tamanho de partícula menor acelera ativação da reação pozolânica

Sendo evolução diferente no tempo da MSI e da nSi, as misturas contendo ambos vão igualando seu comportamento, resultando em 91 dias um comportamento intermediário ao obtido para o mesmo percentual de cada adição. A mistura com 2,5% de nSi, e mSi, tem um comportamento diferenciado nas maiores idades. Neste caso, a proporção de gel / portlandita livre é superior ao obtido usando 5% de nSi. Este resultado é consistente com o desempenho mecânico e durável da mistura. Este comportamento pode indicar que nesta dosagem a relação entre a superfície da adição e a água livre resultou ser ótima.

4. CONCLUSÕES

A incorporação de nSi gera uma perda de trabalhabilidade e um aumento nas reações iniciais de pega e endurecimento, fenômeno que dificulta o manuseio em campo. A viscosidade e adaptação ao molde ficam prejudicadas com a incorporação de nSi. Os concretos contendo 7,5% mSi ou misturas binárias [nmSi]-5 / 2,5; [nmSi]-2,5 / 5 conduzem a concreto auto adensáveis e autonivelantes.

No entanto, a adição de nSi como adição única, acarretam a perda desta propriedade. As misturas com mSi são as que mostraram melhores comportamentos.

A incorporação de nSi gera um aumento significativo na resistência à compressão em relação ao concreto com mSi e ao de referência. A mistura [nmSi]_{2,5} / 2,5 é aquela com valores mais elevados, isto pode ser creditado a uma melhor distribuição granulométrica, considerando todos os componentes que contêm o concreto, de modo que assim é obtido um concreto mais compacto. A incorporação de nSi, mSi ou misturas binárias de ambas as adições produzem concretos com um pequeno e significativo aumento nas resistências à tração indireta.

Concretos com nSi apresentam uma diminuição do seu módulo de elasticidade, o que conduz a misturas mais deformáveis.

Os concretos com nSi apresentam os maiores valores na relação entre perda de água de gel e perda de água de portlandita em idades precoces, o que mostra que a formação de gel secundário ou tobermorite é maior quando utilizadas adições nano. Além disso, no caso dos concretos com mSi, essas relações têm valores mais baixos, ou seja, resultados concordantes com a menor resistência à compressão.

Nas misturas binárias, com a mesma quantidade total de adições e considerando a maiores idades, os valores daquela relação se aproximam aos valores intermediários das duas adições nas mesmas proporções.

O comportamento singularmente bom da mistura [nmSi]_{-2,5} / 2,5 sugere que existe uma relação ótima de superfície / água livre que também poderia melhorar o comportamento de qualquer uma das adições em separado.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Ministério da Economia e Competitividade (Espanha), Projeto de Pesquisa MAT2013-48009-C04-04-P.

6. REFERÊNCIAS

- 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*”, 3º 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 superplastizer 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, nº 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.



Comportamento químico e mecânico de cimentos de sulfoaluminato de cálcio obtidos a partir de resíduos industriais

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: 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.

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.

Palavras chave: sulfoaluminato de cálcio; etringita; resistência à compressão; 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. Ettringite 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.

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 cements curados en agua potable y en medios corrosivos a 40 °C. Los cements 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 cements 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.

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

1. INTRODUÇÃO

O cimento é um material utilizado na construção de cidades e de habitações que crescem de acordo com o aumento da população. O uso de concretos produzidos com insumos apropriados, corretamente dosados e bem consolidados asseguram a durabilidade dos edifícios. O material aglutinante mais empregado na construção civil é o cimento Portland, no entanto, o processo de produção envolve o consumo de grandes quantidades de combustíveis fósseis e, em paralelo, durante o processo de descarbonização de matérias-primas, são emitidos grandes volumes de CO₂ na atmosfera, contribuindo com cerca de 7% das emissões globais desse gás (Roy et al, 1999; Gartner et al, 2004). Existe uma variedade de materiais alternativos e viáveis (resíduos industriais) para a substituição do cimento Portland. A utilização destes materiais está baseada na importância de minimizar as emissões de CO₂, e no interesse em desenvolver e produzir materiais cimentícios com boas propriedades mecânicas e de estabilidade em ambientes corrosivos.

Uma alternativa para substituir total ou parcialmente o uso do cimento Portland é a fabricação de cimento de sulfoaluminato de cálcio (SAC) que apresenta uma estrutura cristalina composta por um arranjo tridimensional de tetraedros de AlO₄ interligados com íons Ca⁺² e SO₄⁻² localizados no interstício existente (Sharp J.H. et al., 1999). Este tipo de cimento apresenta uma baixa emissão de CO₂, é formado a uma temperatura aproximada de 1250 °C e desenvolve boas propriedades mecânicas (resistência à compressão) (Older, 2005; Zhou et al., 2006; Garcia-Maté et al., 2015; Hargis et al., 2014). Além disso, há uma grande quantidade de resíduos, tais como escória, gesso, cinzas entre outros, que apresentam em sua composição química quantidades consideráveis de Al₂O₃, CaO, CaSO₄ etc, sendo estes os principais componentes para a produção do clínquer de SAC. Uma vantagem muito importante resultante da fabricação do clínquer a partir de resíduos industriais é a redução da poluição do ar, solo e visual que estes originam (acumulados ao ar livre) e a redução das emissões de CO₂ para o meio ambiente. Li et al., relataram a sinterização do SAC utilizando cinzas com elevado teor de alumina, bauxita e calcário como materiais de partida (Li et al., 2007) onde as principais fases de sinterização foram SAC e silicato tricálcico (C₃S).

O sulfoaluminato-belita foi sinterizado a 1150 °C, a partir do cinza volante, poeiras e lamas recolhidas dos processos industriais. O clínquer obtido se apresentou como produto da sinterização das fases guelenita (formado pela decomposição da belita a temperaturas superiores a 1100 °C), SAC e belita (Li et al., 2001). Durante a sinterização do SAC utilizando resíduos industriais, obteve-se a formação de guelenita como produto secundário, sendo esta fase responsável pela diminuição na formação de SAC (Arjunan et al., 1999). A sinterização do sulfoaluminoférrico através da utilização de cal, gesso, lama vermelha e bauxita a 1250 °C apresentou fases como C₄(A₃F)₃ \bar{S} , C₄AF e C₂F.

A densidade deste aumentou com o incremento da quantidade de lama vermelha, finalmente os produtos de hidratação formados foram etringita e C₃(AF) H₆ (Singh et al., 1997). O uso de resíduos de indústrias de fertilizantes (adubos), bauxita e minério de ferro como matérias primas para a sinterização do SAC a 1230 °C gerou fases como SAC, C₄AF, C₂AF, 2C₂S·C \bar{S} e uma pequena quantidade de cal livre. Maiores volumes de minério de ferro aumentaram a quantidade da fase C₄AF e diminuíram a da fase SAC (Singh et al., 2008). O SAC foi sinterizado a partir de uma mistura de jarosita-alunita e resíduos de processos hidrometalúrgicos (desenvolvidos para o tratamento econômico de minérios com baixo teor de óxido de níquel) a 1300 °C (Katsioti et al., 2005).

Geralmente, as pastas elaboradas com o clínquer obtido dos resíduos ou subprodutos industriais mencionados apresentaram boas propriedades mecânicas. A etringita é o principal produto de hidratação do cimento de SAC, esta ocorre como um processo natural da combinação deste cimento, água e sulfato de cálcio (Mehta, 1967). A morfologia característica da etringita

compreende cristais de prismas hexagonais ou placas (Moore et al, 1968). A formação de etringita nas primeiras etapas de hidratação contribui com o desenvolvimento das propriedades mecânicas. No entanto, o desenvolvimento ou formação em etapas posteriores (formação de etringita tardia, FET) pode ser prejudicial. A FET, em materiais cimentícios endurecidos, gera microfissuras que comprometem as propriedades mecânicas, por se tratar de uma reação expansiva. Em muitos casos, a FET é atribuída a uma quantidade excessiva de sulfatos presentes no cimento (Taylor, 2001; Gallardo M. et al., 2014).

O desenvolvimento das propriedades físicas e químicas de novos materiais de construção em ambientes semelhantes ao que está exposto cotidianamente o cimento Portland tem despertado grande interesse na área de pesquisa. Foram realizados estudos sobre durabilidade e estabilidade química de diferentes tipos de cimento, cuja finalidade é avaliar o comportamento das reações que ocorrem nestes materiais de construção em diferentes condições de exposição. Por exemplo, investigações sobre o ataque químico em concretos de cimento Portland, pozolânico e de escória foram realizados simulando chuva ácida com uma solução de H_2SO_4 e HNO_3 , com um pH 3,5. Os resultados indicaram que o hidróxido de cálcio é o composto no qual tem início o ataque da solução, por conseguinte, poderia atuar como uma barreira contra o ataque dos silicatos hidratados. Os concretos pozolânicos foram mais suscetíveis a ataques do que os elaborados com escória. A difusão aumentou para altas relações água/cimento, devido à elevada permeabilidade (R. Sersele et al., 1997).

Foram realizados estudos sobre a durabilidade química de um cimento API classe B (utilizados em poços de petróleo) para determinar os efeitos resultantes do ataque de íons SO_4^{2-} , Mg^{2+} e Cl^- utilizando cura em soluções aquosas de Na_2SO_4 , $NaCl$ e $MgCl_2$. Detectou-se a formação de tobermorita, portlandita, etringita e monocloroaluminato como resultado da transformação das fases anidras do cimento. A portlandita aumentou em quantidade ao longo do tempo. A interação entre os íons SO_4^{2-} e o cimento gerou gesso parcialmente solúvel reagiram posteriormente com C_3A facilitando a formação de etringita. Os íons Cl^- se combinaram quimicamente com os aluminatos de cálcio hidratados resultando na formação de sal Friedel. Os íons Mg^{2+} propiciaram a descalcificação do cimento, que por sua vez reagiram com grupos hidroxila, resultando na formação de brucita (Martin J. J. et al., 2008).

O estudo da durabilidade química de um geopolímero elaborado com metacaolim, exposto a uma solução de HCl durante 10 dias com uma concentração de 0,5 N a 60 °C, forneceu como resultado uma degradação das pastas devido à destruição da estrutura geopolimérica e a liberação de Na, Al e Si, para uma solução ácida. Evidenciou-se uma troca de espécies iônicas entre H_3O^+ e Na^+ . O ataque químico foi mais intenso em pastas com maior relação $SiO_2/Al_2O_3=3$ e $Na_2O/Al_2O_3=0,55$, com uma perda de 33,1% de sua resistência inicial. Pastas com uma menor relação $SiO_2/Al_2O_3=2,6$ e $Na_2O/Al_2O_3=0,55$ só perderam 2% de sua resistência inicial. O mecanismo envolvido na deterioração foi a troca iônica e a dissociação do HCl em íons Cl^- e H_3O^+ , onde íons Cl^- neutralizaram cargas com íons Na^+ dando lugar a um precipitado NaCl (Burciaga-Diaz O. et al., 2007). O objetivo deste trabalho é a avaliação do desenvolvimento da resistência à compressão e da estabilidade química de cimentos de sulfoaluminato de cálcio sinterizado a partir de uma mistura de cinzas volantes, escória de alumínio e fluor-gesso a 1250 °C.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os materiais utilizados foram a cinza volante (cv), escória de alumínio (ea) e fluor-gesso (fg). Os dois últimos foram submetidos a um processo de moagem até a obtenção de partículas menores que 106 μm (peneira #140 ASTM). Posteriormente, a composição química de cada material foi

analisada mediante fluorescência de raios-X (FRX), cujos resultados estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Composição química dos óxidos das matérias primas.

Óxidos	Escória de alumínio ea (e.p. %)	Cinza Volante cv (e.p.%)	Fluor-gesso fg (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	-

Tendo como base a composição química foram misturados os resíduos na proporção necessária para a obtenção de SAC de acordo com a seguinte reação: $ea + cv + fg + CaCO_3 = SAC (80\% \text{ e.p.}) + Ca_2SiO_4 (20\% \text{ e.p.})$. As proporções de cada material de partida foram ajustadas com $CaCO_3$ (97% de pureza). Os materiais de partida foram homogeneizados em recipientes plásticos com acetona e bolas de alumina durante 4 horas, posteriormente foram secos a uma temperatura de 80 °C por 12 horas. Conformaram-se pastilhas de 2 cm de diâmetro por prensagem uniaxial a 45 MPa, que foram tratadas termicamente a 1250 °C, durante 4 horas. Constatou-se a formação de SAC mediante difração de raio-X. O clínquer obtido foi submetido a trituração até se obter uma superfície específica de aproximadamente 3800 cm²/g (ASTM C-204), posteriormente, foi misturado com 15, 20 ou 25% e.p. de sulfato de cálcio ($CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$) para preparar o cimento de SAC. As pastas foram preparadas com uma relação água/cimento de 0,5 de acordo com o procedimento indicado na norma mexicana NMX-C-085-ONNCCE-2002 (NMX-C-085). A nomenclatura dos sistemas foi a seguinte: 515, 520 e 525 onde o primeiro algarismo indica a relação água/cimento e os dois últimos o teor de sulfato de cálcio. As misturas foram colocadas em moldes Nyalcero e vibradas por 60 s para eliminar a porosidade. Os moldes cheios foram cobertos com plástico e colocados em câmaras isotérmicas a 40 °C durante 24 horas. Posteriormente os corpos de prova foram desmoldados e colocados em recipientes com água (água potável) para início da cura úmida à temperatura mencionada anteriormente durante 1, 3, 7, 14 ou 28 dias, após cada período de cura foi avaliada a resistência à compressão. Para efeito de comparação, foram desenvolvidas amostras de cimento Portland Comum (CPC comercial) como alvos de referência. Estas foram desenvolvidas e curadas sob as mesmas condições das amostras preparadas à base de cimentos de SAC.

Para os ensaios de durabilidade química, as amostras foram curadas por 7 dias em água potável e posteriormente, imersas em meios corrosivos durante 14, 28 ou 42 dias para a avaliação da resistência química, através dos resultados de resistência à compressão. As amostras foram imersas em 2 litros de solução (elaborada com água desionizada) de H₂SO₄ 0,5 N, MgCl₂ 0.6 N e Na₂SO₄ 0,04 N a 40 °C para simular as condições agressivas. As medições de resistência à compressão foram realizadas em uma prensa hidráulica automatizada (Controls modelo 50-C7024), com uma capacidade de 250 kN utilizando uma velocidade de aplicação de carga de 350 N/s. Os ensaios foram realizados de acordo com o procedimento descrito na norma ASTM

C109/C109-M95 (ASTM-C109). Para identificar as fases presentes, resultantes das reações de hidratação e do ataque químico, as amostras foram analisadas com 28 (água potável) e 42 (ambiente corrosivo) dias de imersão, mediante difração de raios-X (DRX). Foram selecionados fragmentos, preferencialmente da superfície de cada um dos corpos de prova submetidos ao ataque químico, e foram imersos em metanol, secos em estufa durante 48 horas a 40 °C. Mediante microscopia eletrônica de varredura (MEV) as amostras foram analisadas antes e depois do ataque químico.

3. RESULTADOS

Na Figura 1 está apresentado o padrão de difração do clínquer sinterizado a uma temperatura de 1250 °C. Foram observadas principalmente as reflexões correspondentes ao SAC. Foram formadas fases secundárias como guelenita ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{SiO}_7$), aluminato de cálcio (CaAl_2O_4), maienita ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$) e preocroita ($\text{Ca}_{20}\text{Al}_{26}\text{Mg}_3\text{Si}_3\text{O}_{68}$). A belita (Ca_2SiO_4) foi obtida em um percentual menor do que o pretendido devido à estabilidade termodinâmica das fases secundárias que se formaram a 1250 °C. Além disso, as fases guelenita e espinela são consideradas não cimentícias, devido sua pouca ou nenhuma reatividade na presença de água, mas estas podem atuar como fases de reforço.

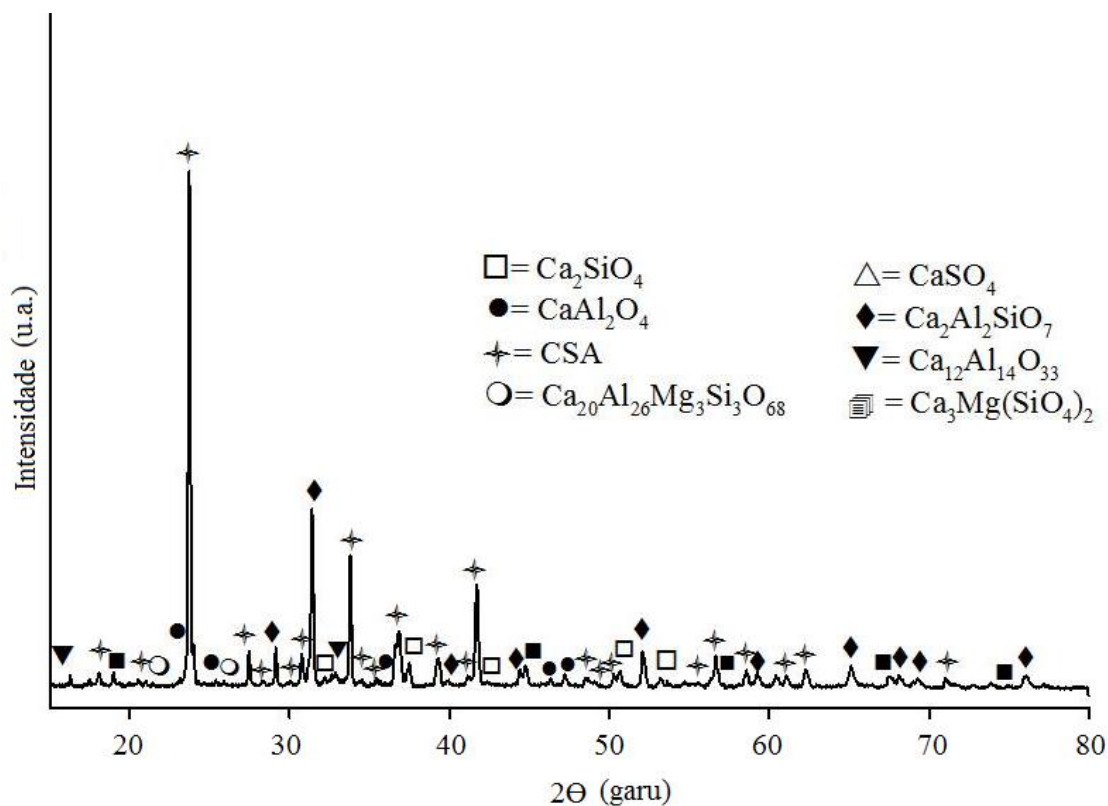


Figura 1. Padrão da DRX da sinterização a 1250 °C.

Na Figura 2 estão apresentados os resultados de resistência à compressão dos sistemas 515, 520 e 525 curadas de 1 a 28 dias a 40 °C. No sistema 515 se observou um lento desenvolvimento da resistência à compressão do primeiro até os 14 dias; aos 28 dias a resistência à compressão diminuiu, devido a formação de etringita tardia. O sistema 520 apresentou uma diminuição da resistência à compressão aos 7 dias; com um ligeiro aumento aos 14 e 28; no entanto, houve pouco

acréscimo de resistência, terminando com 24,25 MPa. No sistema 525 foi observado um aumento da resistência à compressão em função do tempo (entre 1 e 14 dias), em idades posteriores se manteve a mesma resistência de 38,9 MPa aos 28 dias. Possivelmente, a etringita foi formada quase inteiramente nos primeiros dias de cura, e o posterior aumento foi devido ao crescimento desta fase dentro dos poros e áreas fracas (microfissuras). A presença de um restante de gesso e de SAC em dias posteriores no início do período de cura indicam que as reações de hidratação continuaram com o passar do tempo. Este sistema apresentou os maiores valores de resistência à compressão. Diante do exposto, uma maior quantidade de gesso aumenta a resistência mecânica devido à formação de etringita a partir do primeiro dia de cura. Os resultados obtidos de resistência à compressão estavam dentro do valor definido na norma NMX-C-061-ONNCCE-2001 (20-40 MPa aos 28 dias de cura). O valor obtido experimentalmente para cimento CPC foi de 38 MPa.

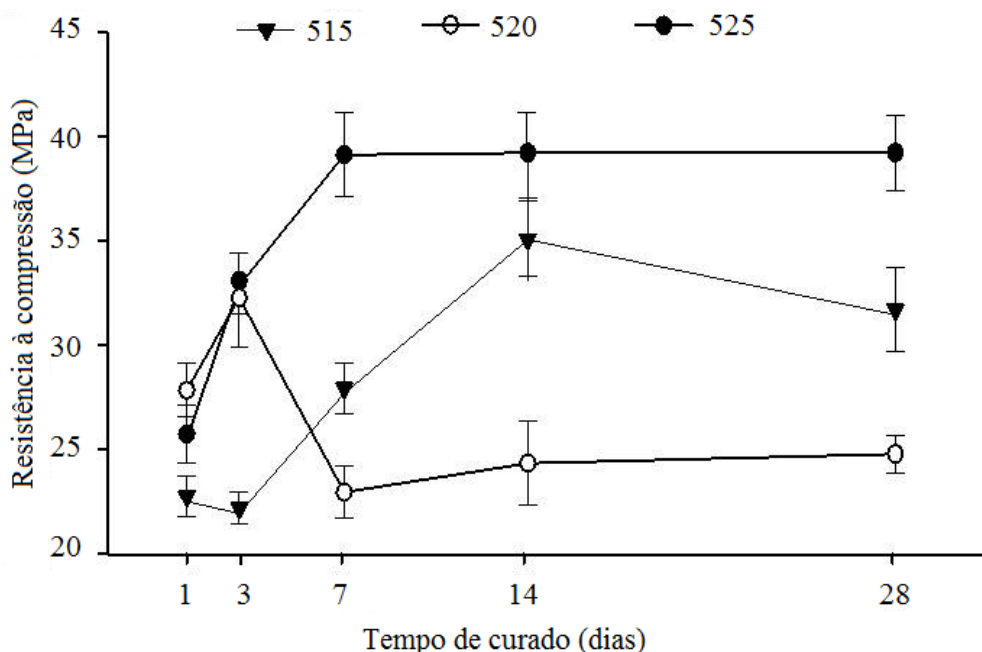


Figura 2. Resistência à compressão dos sistemas 515, 520 e 525 curados a 40 °C.

Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os padrões de DRX dos sistemas 515 e 525 curados durante 1, 14 e 28 dias a 40 °C. No sistema 515 (Figura 3), no primeiro dia foram observadas reflexões correspondentes a etringita e estas aumentaram de intensidade aos 14 e 28 dias de cura. No sistema 525 (Figura 4), no primeiro dia foram observadas reflexões correspondentes ao SAC e ao gesso, estas últimas até os 14 dias. Reflexões correspondentes a etringita foram visíveis a um dia de cura e aumentaram de intensidade aos 14 e 28 dias. O aumento gradual da intensidade das reflexões dos produtos de hidratação indicou a formação de etringita tardia. Esta não foi o suficiente para afetar as propriedades mecânicas e, possivelmente, essa fase ocupou lugar dentro dos poros existentes. Para ambos os sistemas foram observadas reflexões correspondentes a espinélia e guelenita sem alterações aparentes da intensidade das reflexões em função do tempo de cura, pois estas duas fases são inertes na presença de água.

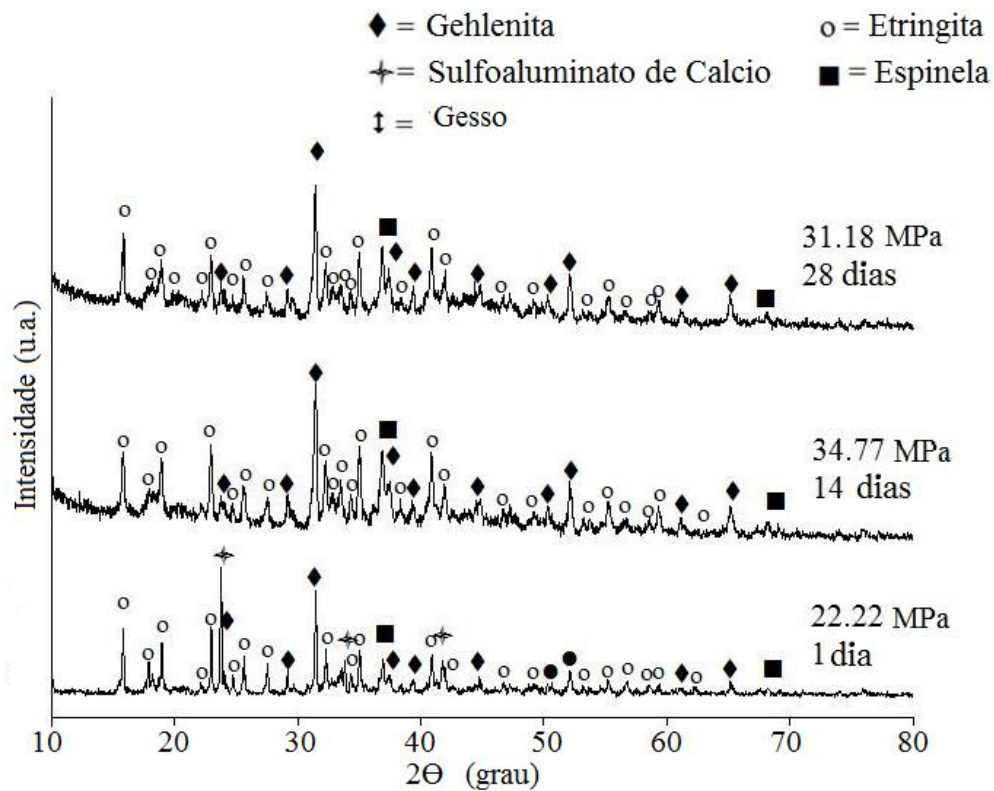


Figura 3. Padrões de DRX do sistema 515 curado durante 1, 14 e 28 dias a 40 °C.

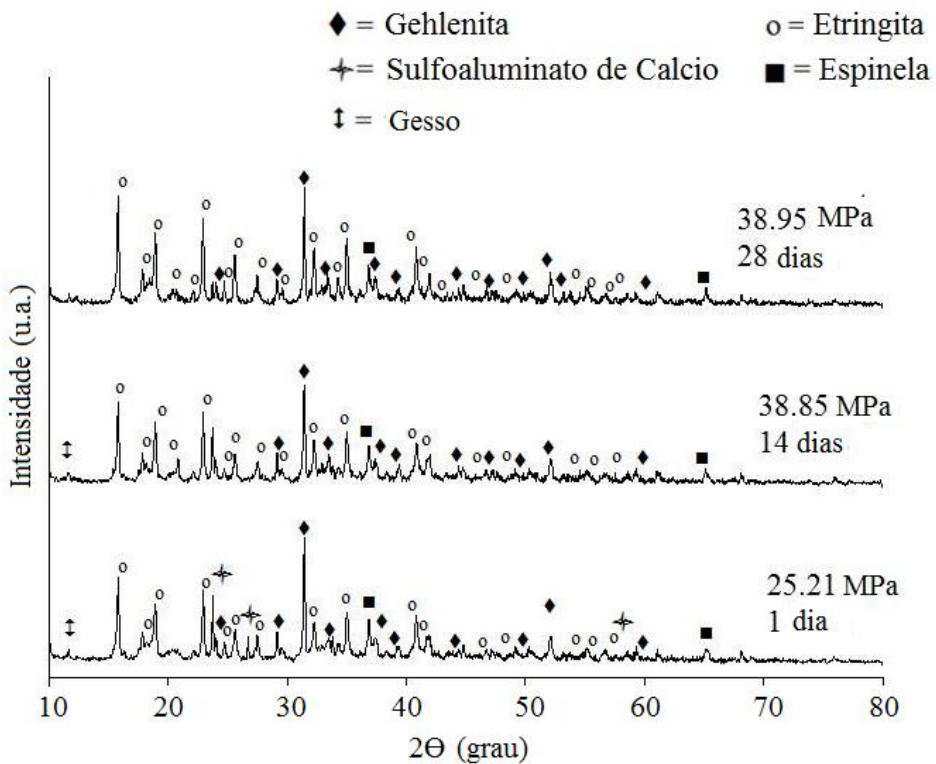


Figura 4. Padrões de DRX do sistema 525 curado durante 1, 14 e 28 dias a 40 °C.

Na Figura 5 estão apresentadas as micrografias de superfícies de fratura dos sistemas 515 e 525 curados a 1, 14 e 28 dias a 40 °C. No sistema 515 o primeiro dia exibe uma microestrutura densificada com a presença de algumas fissuras distribuídas na matriz. Aos 14 dias se observou uma microestrutura com uma matriz densificada e compacta onde as fissuras diminuem em quantidade explicando o aumento da resistência à compressão observada nesta idade. Aos 28 dias de cura foram observadas algumas áreas fracas geradas pelo crescimento de hidratos resultando numa diminuição da resistência à compressão do material.

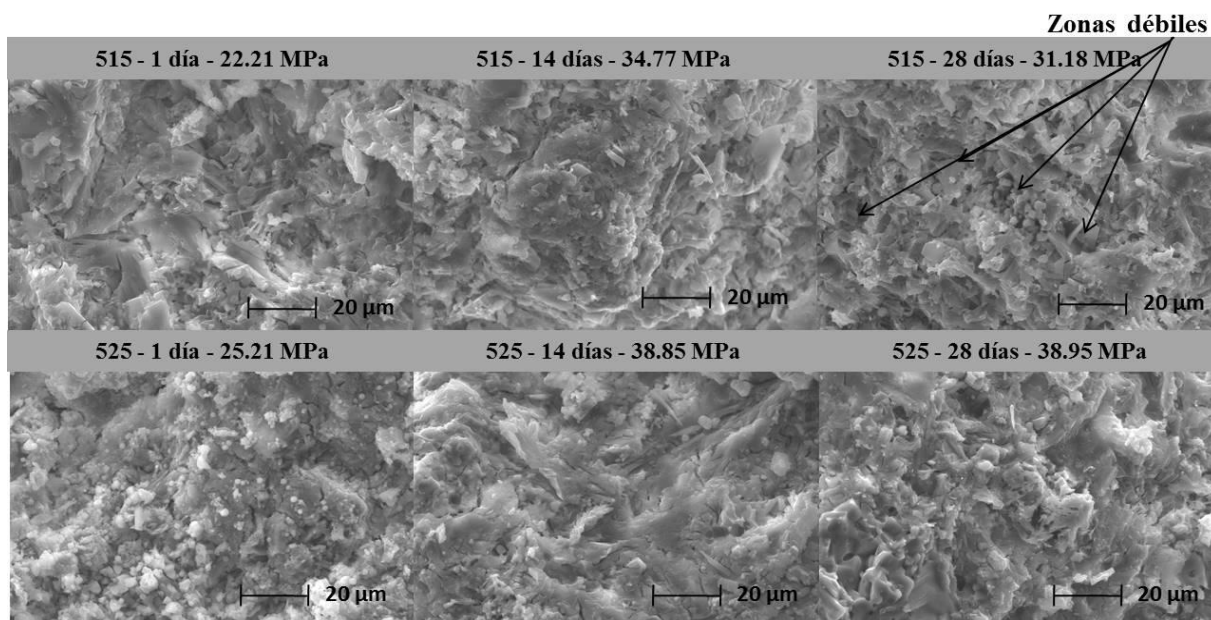


Figura 5. Micrografias de superfície de fratura de amostras dos sistemas 515 e 525 curadas a 1, 14 e 28 dias a 40 °C.

Nas microestruturas de superfície do sistema 525 no dia 1 foram observados nódulos brancos imersos em uma matriz de etringita densa. Estes nódulos brancos estão associados a formação de gesso. Aos 14 dias de cura, a matriz se apresentou ainda mais densificada sendo similar a microestrutura observada aos 28 dias, confirmando a semelhança nas propriedades mecânicas aos 14 e 28 dias de cura. O sistema 525 desenvolveu as melhores resistências à compressão, mostrando melhor estabilidade em função do tempo por não apresentar diminuição da resistência. Por conseguinte, foi avaliada a estabilidade deste sistema imerso em soluções agressivas. Amostras desse cimento foram previamente curadas durante 7 dias em água potável (38,95) e posteriormente imersas em soluções corrosivas.

Na Figura 6 estão apresentados os resultados de resistência à compressão obtidos das amostras após imersão em meios corrosivos durante 7, 14, 28 e 42 dias a 40 °C. As amostras imersas em uma solução de NaSO₄ 0,04N desenvolveram uma maior resistência à compressão aos 42 dias de cura (34,63 MPa). As amostras imersas em soluções de H₂SO₄ e MgCl₂ desenvolveram resistências à compressão aos 42 dias de 28,10 e 29,2 MPa, respectivamente. Foi observada uma diminuição da resistência à compressão de 28,6% e 25,83% nas amostras imersas em solução de H₂SO₄ e MgCl₂ respectivamente. Estas variações podem ser atribuídas à interação das amostras como íons Cl⁻, Mg²⁺, SO₄⁻² e Na⁺ presentes nas soluções corrosivas. As amostras imersas em água potável não apresentaram diminuição da resistência à compressão em qualquer tempo de cura (dias 1-28).

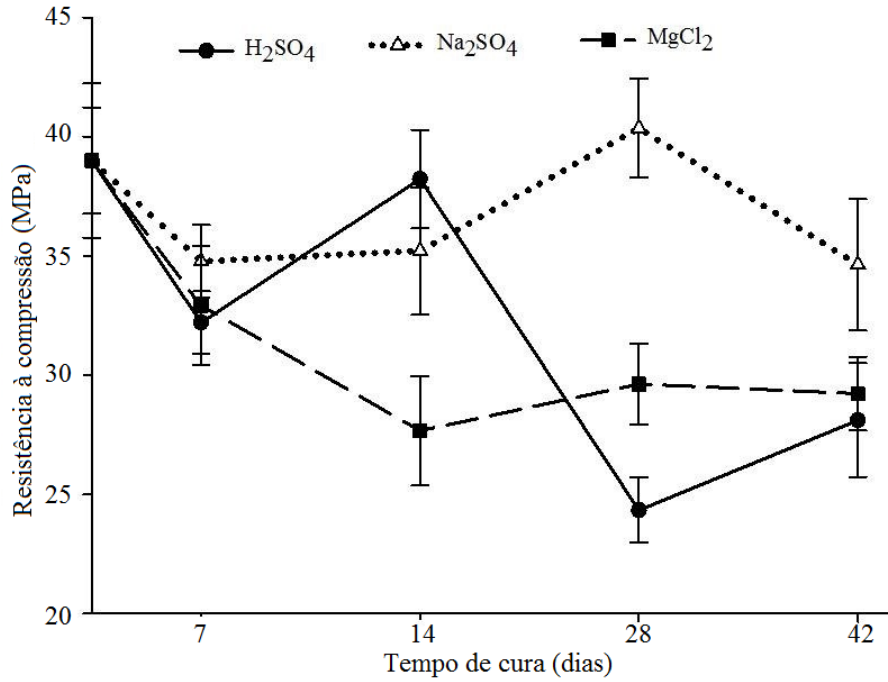


Figura 6. Resistência à compressão do sistema 525 curados em soluções agressivas a 40 °C.

Os resultados obtidos na caracterização por DRX das amostras imersas em soluções agressivas aos 42 dias de cura estão apresentados na Figura 7. Foram observadas reflexões de alta intensidade correspondentes ao gesso em amostras imersas em uma solução de H₂SO₄, indicando degradação da etringita, causada pela difusão de íons SO₄²⁻ no interior da microestrutura, resultando numa dissolução do material. As amostras imersas em MgCl₂ e Na₂SO₄ apresentaram um padrão semelhante ao descrito anteriormente, exceção feita as reflexões correspondentes ao gesso que apresentaram uma baixa intensidade indicando um ataque moderado ao material.

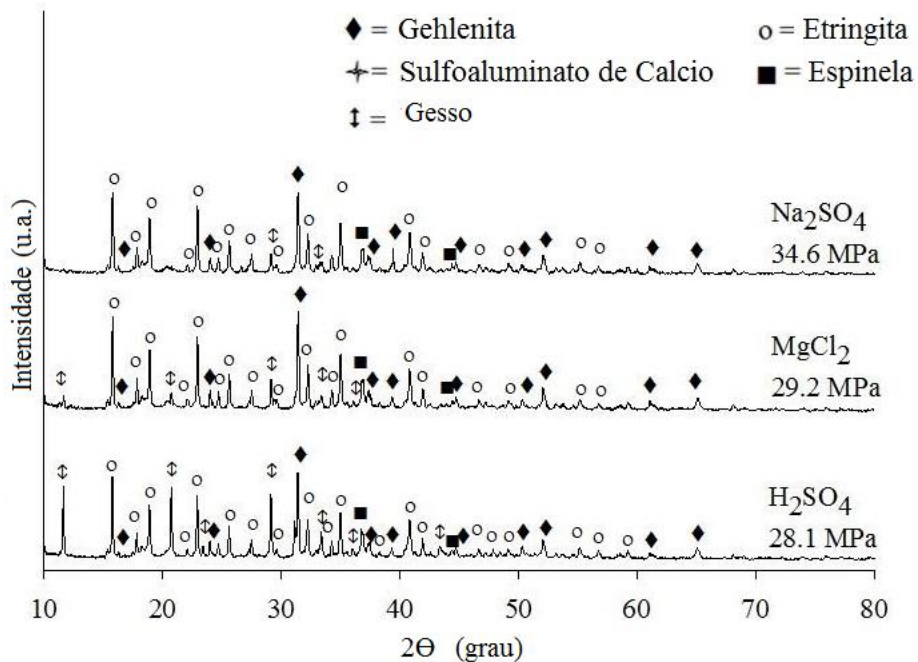


Figura 7. Padrões de DRX do sistema 525 imerso em soluções agressivas durante 42 dias a 40 °C.

Alguns danos se destacaram durante uma análise visual, onde foi observado um amolecimento da superfície, sendo este mais expressivo nas amostras imersas na solução ácida indicando maior agressividade desta solução.

A Figura 8 apresenta uma micrografia correspondente a uma amostra imersa em solução de H_2SO_4 0.5N a 40 °C. Observou-se, a partir da superfície da amostra, um ataque químico com profundidade de aproximadamente 129 μm , nota-se visualmente nesta região uma tonalidade mais escura de cinza que no resto da amostra. A análise por EDS (espectrometria de energia dispersiva de raios X) indicou a migração de íons de Al^{+3} provocada pelo ataque da solução ácida. Originou-se uma fissura de 22 μm de espessura devido à alteração do volume, causada pela migração de íons de cálcio e sulfatos para o exterior, aumentando o ataque nas novas superfícies expostas à solução corrosiva. Sob a fissura se observou uma matriz densa e compacta sugerindo que se trata de uma zona onde o meio corrosivo não penetrou.

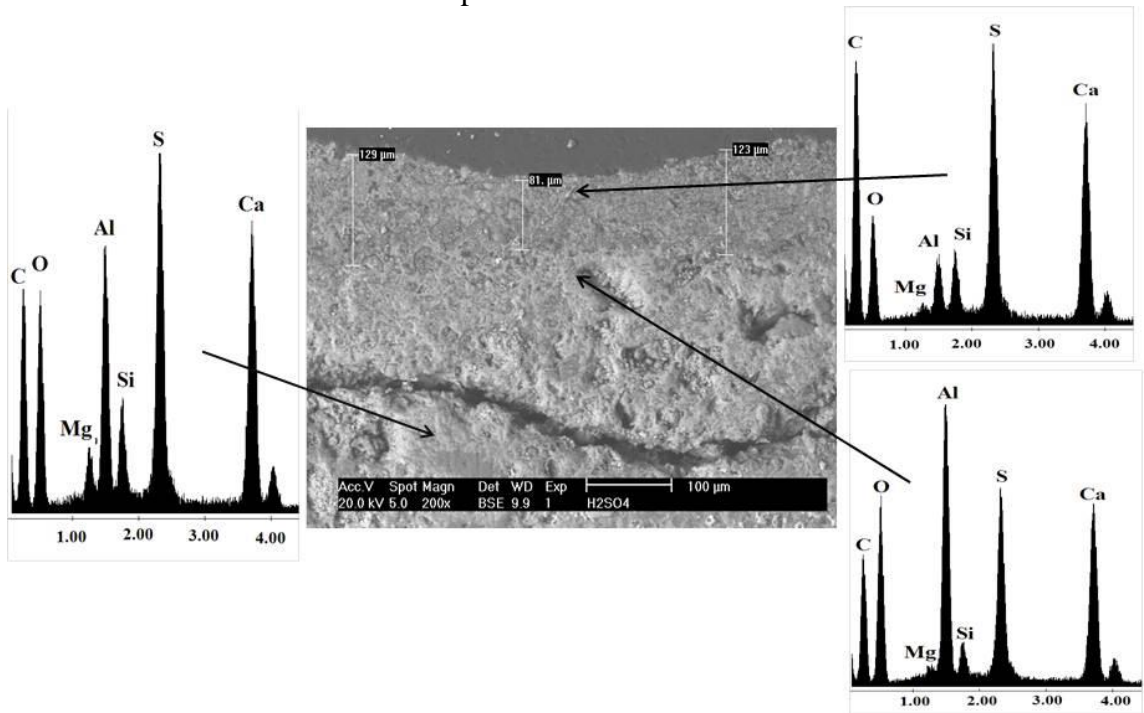


Figura 8. Micrografia do cimento após 42 dias de imersão em uma solução de H_2SO_4 0.5 N.

Na Figura 9 está apresentada a microestrutura de uma amostra imersa na solução de $MgCl_2$ 0,6 N durante 42 dias a 40 °C. A profundidade do ataque químico foi de aproximadamente 380 μm sendo maior do que a observada no cimento atacado com uma solução de H_2SO_4 . Observou-se a formação de uma fissura na superfície com aproximadamente 1,16-1,25 μm . Na região superior à fissura se observou uma interface de elevado teor de Mg, pela difusão lenta de íons de Mg^{+2} na amostra. Indicando uma troca iônica com íons de cálcio. A região não corroída apresentou uma microestrutura compacta.

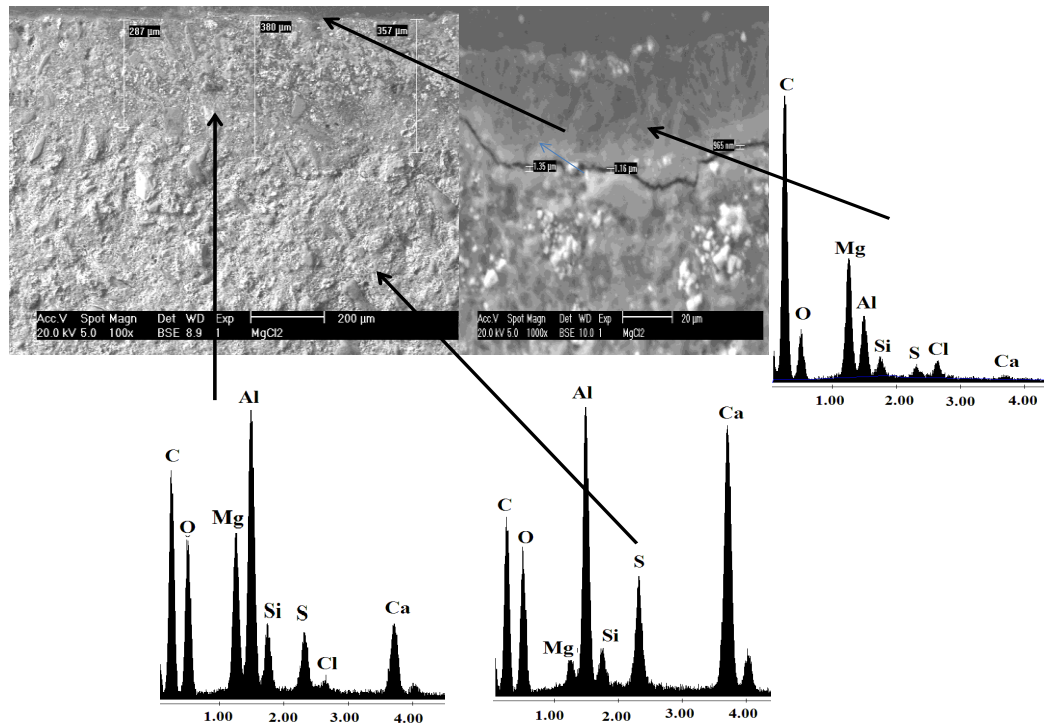


Figura 9. Micrografia do cimento após 42 dias de imersão em uma solução de $MgCl_2$ 0.6 N.

Na Figura 10 está apresentada a microestrutura de uma amostra imersa na solução de Na_2SO_4 0,04 N durante 42 dias a 40 °C. Observou-se uma profundidade de ataque de 46,7 μm, com aparência granular, possivelmente estes nódulos são de gesso, produto de uma descalcificação do material. Foram observadas partículas de alumina no interior da matriz, indicando uma migração de íons de cálcio e sulfato para o exterior. O cimento imerso na solução apresentou maior resistência ao ataque e sua resistência à compressão foi de 34,63 MPa aos 42 dias de imersão, possivelmente os íons Na^+ substituíram os íons Ca^{+2} e formaram parte da rede cristalina.

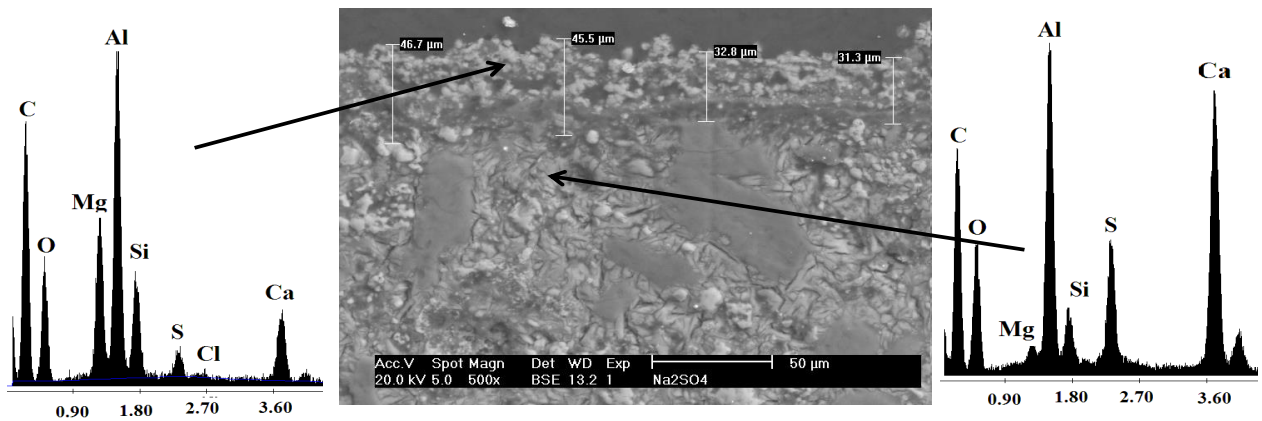


Figura 10. Micrografia do cimento após 42 dias de imersão em uma solução de Na_2SO_4 0.6 N.

4. CONCLUSÕES

Obteve-se um clínquer de sulfoaluminato de cálcio a partir da sinterização de uma mistura de escória de alumínio, cinza volante e fluor-gesso. O clínquer apresentou em sua composição fases como sulfoaluminato de cálcio, guelenita, aluminato de cálcio, maienita e belita.

Os cimentos produzidos com sulfoaluminato de cálcio sinterizado a partir de resíduos industriais desenvolveram resistências à compressão de 38,95 MPa, sendo estas semelhantes às desenvolvidas por pastas de cimento Portland comum curados sob as mesmas condições.

As pastas imersas em uma solução de (Na₂SO₄) apresentaram uma elevada resistência ao ataque por sulfatos, desenvolvendo uma resistência à compressão de 34,63 MPa, após 42 dias de imersão.

A degradação das pastas por ataque de H₂SO₄ e MgCl₂ ocorre por processos desaluminação e descalcificação. As amostras imersas em H₂SO₄ e MgCl₂ desenvolveram uma resistência de 28,10MPa e 29,2MPa, respectivamente, após 42 dias de cura.

5. REFERÊNCIAS

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., Upadhyay, 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.



Concreto e concretagem de blocos de fundação em concreto autoadensável e de alta resistência (70 MPa)

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

¹ PhD Engenharia.

² Universidade 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: 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.

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 SCC auto adensável 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 auto adensável, modelagem de concreto massa, produção de concreto 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 by 4.5m, high). A numerical model by employing a FEM software was developed to predict the thermal hydration gain of different casting procedures, in order 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 modeling, refrigerated concrete production.

RESUMEN

El Edificio Comercial Brookfield Century Plaza, localizado en Alphaville, São Paulo, Brasil, fue diseñado para ser sostenido por dos grandes bloques de hormigón. Un hormigón de alta resistencia (70 MPa) y SCC auto compactante fue desarrollado para estos dos bloques masivos de fundación (cada un mide 28.4mx 18.6m por 4.5m de altura). Un modelo numérico utilizando un software FEM fue desarrollado para predecir la ganancia térmica de hidratación de diferentes capas de hormigonado con el fin de establecer el procedimiento más adecuado para cumplir con los requisitos de tiempo y de la construcción, sin que aparezcan fisuras. Fueron establecidos y supervisados procedimientos para controlar la producción de concreto en la empresa productora de concretos y aplicarlo en el sitio de construcción. Finalmente, la temperatura interna del concreto se registró para permitir una mejor calibración del modelo.

Palabras clave: concreto de alta resistencia, concreto autocompactante, concreto masivo, producción de concreto refrigerado.

Contact author: Carlos Britze (carlos.britez@concretophd.com.br)

1. INTRODUÇÃO

O Edifício Comercial Brookfield Century Plaza, localizado em Alphaville, São Paulo, Brasil, foi projetado para ser apoiado em dois grandes blocos de concreto. Cada um deles com dimensões de 28.4m x 18.6m por 4.5m de altura (o que representa um total de cerca de 2,400m³ ou 3,000yd³ de concreto) e contendo da ordem de 400t de aço. A resistência à compressão especificada em projeto foi de ≥ 70 MPa (10,000psi).



Figura 1. Perspectiva ilustrada do Edifício Comercial Brookfield Century Plaza (<http://www.br.brookfield.com/>).

O escopo deste artigo consiste em apresentar os procedimentos e boas práticas de engenharia para obter o melhor desempenho e qualidade destes grandes blocos concebidos em concreto de alta resistência, incluindo o desenvolvimento de um estudo de dosagem para obtenção do traço de concreto que melhor atendesse às especificações técnicas e de projeto, de uma simulação computacional eficiente para tratamento dos cálculos térmicos do calor de hidratação, bem como o estabelecimento de procedimentos de produção e aplicação do concreto e supervisão da execução em campo.

2. CONCEITO DE CONCRETO MASSA

Comparado ao concreto conhecido como “normal” ou “convencional”, o concreto massa possui uma peculiaridade em destaque que é a dificuldade de liberar o calor gerado pelas reações químicas exotérmicas de hidratação do cimento. A liberação do calor no interior da massa de concreto é influenciada pelas propriedades térmicas dos materiais empregados, pelas condições ambientais e pelas dimensões/geometria do elemento estrutural de concreto (ACI, 2005; Mehta e Monteiro, 2014; Isaia, 2011).

A hidratação do cimento Portland é uma reação exotérmica, que libera energia térmica no interior do concreto após sua aplicação. O calor liberado ao meio exterior é influenciado pelas

características térmicas dos materiais empregados, pelas condições ambientais e pelas dimensões da estrutura.

O concreto, através de seu coeficiente de dilatação térmica, também sofre variações dimensionais expansivas quando exposto à ação da temperatura decorrente desta reação química. Como ainda não está totalmente solidificado, expande quase livre e rapidamente, pois as reações exotérmicas principais, na maioria das vezes, ocorrem nas primeiras idades, a aproximadamente 50h-120h após a concretagem.

Ao resfriar-se à temperatura ambiente, o que ocorre de forma irregular e de fora para dentro criando gradientes térmicos importantes, fica sujeito a uma retração ou contração térmica. Esta retração, por conta das restrições naturais de atrito e engastamentos, induz o surgimento de tensões que podem superar as tensões resistentes de tração do concreto, provocando a fissuração de origem térmica da estrutura (ACI, 2005; Furnas, 2007).

Nesse aspecto, entende-se que para a concepção de elementos estruturais envolvendo concreto massa, como os blocos de fundação deste artigo, são necessários cuidados especiais, no que tange ao estudo de dosagem racional do concreto [por exemplo, com o menor consumo de cimento (clínquer) possível, informando a necessidade ou não do uso de gelo e materiais suplementares como escória, cinza volante e metacaulim], a simulação térmica eficiente (capaz de informar a necessidade ou não de concretagens em mais de uma camada, bem como fornecer subsídios para elaboração de um plano detalhado de concretagem), o procedimento executivo apropriado (capaz de fornecer diretrizes para controle da temperatura máxima de lançamento do concreto e outras particularidades) e ainda o acompanhamento técnico especializado dos eventos de concretagem, a fim de minimizar potenciais manifestações patológicas futuras.

3. ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO

O traço de concreto para este objetivo foi desenvolvido através de extensos estudos de laboratório e de campo. As proporções da mistura foram baseadas nas diretrizes do método de dosagem do IBRACON (Tutikian e Helene, 2011), nos insumos disponíveis na região, nas particularidades de campo e em conformidade com os requisitos da ABNT NBR 12655: 2006 (ABNT, 2006) e do ACI 237R-07 (ACI, 2007), bem como as especificações do projeto estrutural, orientado por dois parâmetros:

- Um bloco de concreto de 70 MPa (10,000psi) e cerca de 2,400m³ (3,000yd³) ficará sujeito a elevadas temperaturas durante sua aplicação, sendo necessário projetar um concreto capaz de reduzir o calor de hidratação a um valor mínimo;
- Após analisar os projetos estruturais e descobrir que a disposição de armaduras em alguns locais era bastante densa, será necessário também escolher um método de aplicação capaz de evitar anomalias, como falhas, vazios ou ninhos de concretagem.

Por estas razões, decidiu-se por substituir toda a água de amassamento por gelo e usar CP III-40 e adição de metacaulim no traço de concreto (com o intuito de reduzir o calor de hidratação), bem como empregar concreto autoadensável para facilitar o lançamento e evitar falhas de concretagem, pois há dificuldade de vibração.

O traço de concreto foi elaborado em um laboratório na cidade de São Paulo. Diferentes traços foram desenvolvidos, com distintas proporções de argamassa (Figura 2). Para cada traço candidato, as propriedades do concreto no estado fresco, como o conteúdo de ar aprisionado, massa específica e espalhamento (*slump-flow*) foram aferidos, e corpos de prova foram moldados, para serem ensaiados aos 3, 7 e 28 dias, com o objetivo de verificar a resistência à compressão, como apresentam as Figuras 3 e 4, a seguir.



Figura 2. Estudos de dosagem com diferentes teores de argamassa.



Figura 3. Aferição do ar aprisionado e da massa específica.



Figura 4. Espalhamento (*slump-flow*) e corpos de prova sendo moldados para os ensaios de resistência à compressão.

O traço final que atendeu às características desejadas foi obtido pelas proporções de materiais expostas na Tabela 1.

Tabela 1. Traço de concreto autoadensável para aplicação nos blocos de fundação do Edifício Comercial Brookfield Century Plaza.

$f_{ck} \geq 70$ MPa (10,000psi) e relação água/aglomerante = 0.36	
Cimento (CP III 40 Mizú)	447kg (313kg de escória + 134kg de clínquer)
Metacaulim HP	38kg
Areia artificial (pó de pedra)	481kg
Areia quartzosa natural	321kg
Brita 9-19mm	194kg
Brita 19-25mm	777kg
Água total (gelo + umidade dos agregados)	175L
Sikament 735 Aditivo polifuncional (0.5%)	2.2L
Sika 5700 Aditivo superplastificante (1%)	4.6L

4. ESTUDO TÉRMICO

O estudo térmico foi desenvolvido com o programa *b4cast 3.0*, que emprega o método da maturidade (calculado pela equação de Arrhenius), como descreve a ASTM C 1074-04 (ASTM, 2004). Este programa baseia-se no Método dos Elementos Finitos, sendo capaz de simular o histórico de evolução das temperaturas e das tensões oriundas das diferenças de temperatura no interior do elemento. Para estimar a tensão de tração, a Equação (1) foi empregada, como prescrito na normalização brasileira.

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

Várias simulações foram realizadas, explorando diferentes estratégias de concretagem. A Construtora desejava investigar a possibilidade de concretar todo o bloco em apenas uma ou duas camadas, o que provou ser não recomendado, visto que as tensões internas de tração seriam maiores que resistência à tração de concreto. Como resultado das simulações considerando uma ou duas camadas, decidiu-se por investigar o comportamento das temperaturas e tensões numa concretagem do bloco em quatro camadas, cada uma com 1.125m de altura, com um intervalo de três dias entre os eventos. A temperatura de pico, de 64,6°, diminuiu para 54°C (redução de aproximadamente 20%). Também diminuíram as tensões de tração, as quais ficaram muito próximas à evolução da resistência à tração, resultando na baixa possibilidade de fissuras de origem térmica (Figura 5).

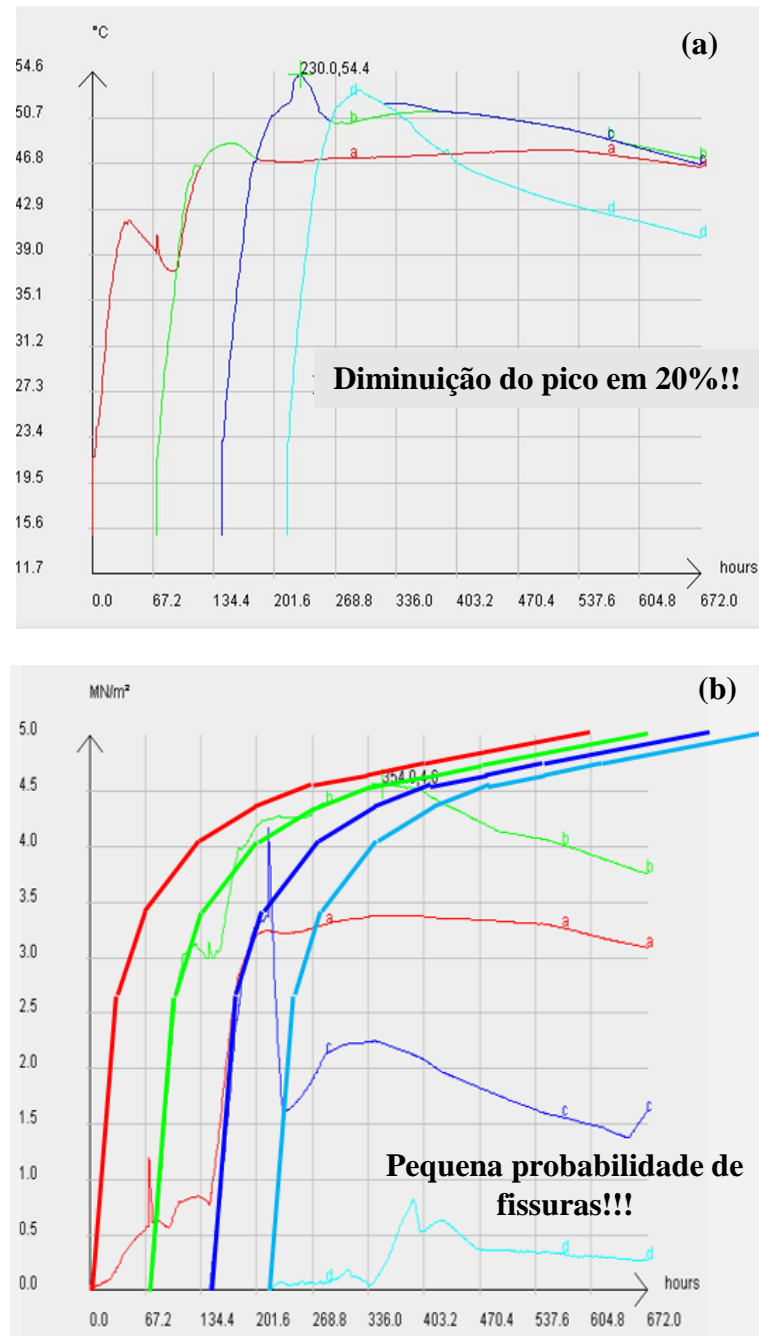


Figura 5. Concretagem do bloco em quatro camadas de 1,125m de altura e intervalo de três dias entre eventos de concretagem: (a) temperaturas e (b) tensões térmicas vs. resistência à tração.

5. PRODUÇÃO DO CONCRETO E PROCEDIMENTOS EXECUTIVOS

Os procedimentos recomendados para a concretagem dos blocos de fundação foram baseados nas disposições da normalização vigente (ABNT, 2004; ACI, 2010) e nas boas práticas de engenharia (Kosmatka e Wilson, 2011; Kennedy, 2005).

Para garantir que a produção e a aplicação do concreto na obra cumpriram com as normas de qualidade e as características especificadas, procedimentos executivos específicos (Tabela 2)

foram estabelecidos, os quais deveriam ser adotados pela Empresa de Serviços de Concretagem, pela Construtora e pelo Laboratório de Controle Tecnológico.

Tabela 2. Procedimentos de produção e aplicação do concreto.

Controle proposto e intervenientes	Procedimentos
Controle de produção do concreto na central Responsáveis: Empresa de Serviços de Concretagem e Laboratório de Controle Tecnológico	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar aspersão de água no agregado graúdo; • Medir as temperaturas dos agregados e do cimento, sendo inferiores a 15°C (para os agregados) e 70°C (para o cimento); • Substituir toda a água de amassamento por gelo; • Pesquisar os sacos de gelo para determinar seu peso médio; • Aferir a umidade da areia; • Misturar e transportar apenas 6m³ em cada caminhão betoneira, sendo os aditivos dosados na central; • Estabelecer um fluxo constante de caminhões betoneira.
Controle da concretagem <i>in loco</i> Responsável: Laboratório de Controle Tecnológico	<ul style="list-style-type: none"> • A temperatura do concreto deveria ser medida e controlada, sendo $\leq 20^{\circ}\text{C}$; • O <i>slump-flow</i> deveria ser medido; • Corpos de prova deveriam ser moldados para ensaios de resistência à compressão; • A temperatura de cada camada de concretagem deveria ser aferida em pontos e momentos previamente definidos, através de termopares.
Procedimentos de concretagem Responsável: Construtora	<ul style="list-style-type: none"> • Execução das fôrmas e armaduras <i>in loco</i>, limpeza da camada inferior de concretagem, rebaixamento do lençol freático, drenagem de águas pluviais; • Provisão das bombas de concreto (três); • Preparação da face do concreto entre camadas para evitar “juntas frias”; • Cura do concreto e limpeza das superfícies.

É muito importante ressaltar o fato de que, para que o concreto ingressasse à obra com temperaturas inferiores a 20°C, um restrito e periódico controle da umidade da areia e da massa real dos sacos de gelo carregados em cada caminhão betoneira teve de ser rigorosamente conduzido.

Visto que, no Brasil, o gelo geralmente é vendido em sacos de massa nominal de 20kg, a massa média de um saco teve de ser aferida com frequência, para garantir que a quantidade especificada previamente de água estava efetivamente sendo adicionada à mistura.

6. SUPERVISÃO TÉCNICA EM CAMPO

A produção do concreto e os procedimentos de concretagem foram supervisionados, com o intuito de garantir que as recomendações fossem cumpridas e também para corrigir quaisquer desvios que pudessem ocorrer ou dar o suporte necessário em ocasiões específicas.

6.1. Supervisão na central de concreto

Na central de concreto da Empresa de Serviços de Concretagem, situada a cerca de 20min da obra, as temperaturas do cimento e dos agregados foram verificadas em diferentes oportunidades durante o dia. A temperatura do cimento nunca ultrapassou os 50°C. Procedeu-se com aspersão de água sobre os agregados (Figura 6), pois durante as tardes a temperatura ambiente chegava a mais de 30°C. A aspersão de água manteve a temperatura dos agregados inferior a 25°C (Figura 7).



Figura 6. Aspersão de água nos agregados graúdos na central de concreto.



Figura 7. Registro da temperatura dos agregados graúdos antes e após a aspersão de água na central de concreto.

A quantidade de sacos de gelo foi determinada através da aferição da umidade da areia e, então, calculada a massa média dos sacos de gelo. Com o incremento de temperatura durante o dia, o gelo poderia derreter mais rapidamente, forçando novas medidas.

Uma plataforma móvel foi instalada na traseira do caminhão de gelo e a quantidade determinada de sacos de gelo foi provida no caminhão betoneira. Um técnico do Laboratório de Controle Tecnológico verificou o número de sacos carregados por caminhão.

6.2. Supervisão na obra – Temperatura e *slump-flow* do concreto

Com a chegada do concreto à obra, sua temperatura foi devidamente controlada. Caso superior a 20°C, o concreto era rejeitado. A temperatura média dos eventos de concretagem foi inferior a 18°C (Figura 8).



Figura 8. A temperatura do concreto fresco foi controlada para cada caminhão betoneira através da imersão de um termômetro digital (exemplo: 13.2°C).

Caso a temperatura do concreto estivesse de acordo com a especificação, o espalhamento (*slump-flow*) do concreto era medido, devendo apresentar valores entre 600mm e 750mm. Além disso, como condicionante para a aceitação do concreto, o mesmo não poderia apresentar segregação. O *slump-flow* deveria ser a média de três diferentes medidas do diâmetro, e foi verificado pelo Laboratório de Controle Tecnológico (Figura 9).



Figura 9. Aferição do espalhamento (*slump-flow*) do concreto.

6.3. Supervisão na obra – Histórico de temperatura do concreto endurecido

Para registrar a temperatura do concreto endurecido, 12 termopares foram instalados pelo Laboratório de Controle Tecnológico, em três pontos e à meia altura de cada camada de concretagem. Os intervalos de tempo em que a temperatura deveria ser registrada também foram informados. Esses resultados foram guardados para posterior análise e calibragem do modelo térmico.

6.4. Supervisão na obra – Posicionamento das bombas de concreto e procedimento de concretagem

O posicionamento das bombas de concreto e a sequência de concretagem foi discutida juntamente com a equipe técnica da Construtora. Três bombas foram utilizadas (Figura 10). O concreto deveria ser lançado em subcamadas uniformes, com aproximadamente 0,3m de altura, iniciando ao lado da entrada com a bomba n.º.1 e prosseguindo para os fundos com as bombas n.º. 2 e 3.



Figura 10. Vista geral – Posicionamento das bombas de concreto.

A sequência de concretagem descrita foi empregada para todas as camadas. As duas primeiras foram concretadas antes da execução da armação superior (Figura 11a). Após a finalização de cada camada, a superfície foi preparada para apresentar a rugosidade necessária para promover uma melhor aderência com a camada subsequente. A cura do concreto iniciou imediatamente após o endurecimento, pela criação de uma lamina de água sobre a superfície. Previamente à concretagem, a superfície foi drenada e limpa com jatos de água. O concreto foi lançado sobre uma superfície saturada. Após a execução da segunda camada, a armação superior dos blocos e dos pilares foi posicionada, e o concreto foi aplicado com o auxílio de tremonhas (Figuras 11b e 12).



Figura 11. (a) Concretagem da segunda camada sem a armação superior e (b) aplicação do concreto após a montagem de todas as armaduras.



Figura 12. A armação superior consistia de duas camadas duplas de barras de 32mm de diâmetro. O concreto autoadensável foi concebido para atravessar esta malha tanto a superior como a do fundo do bloco que era ainda mais concentrada.

7. RESULTADOS

7.1 Controle tecnológico

Com relação ao controle tecnológico da resistência à compressão do concreto, ensaios foram realizados por amostragem total (100% dos caminhões betoneira) nas idades de 7, 28 e 63 dias. A maioria dos resultados foi de encontro aos requisitos de resistência à compressão ($f_{ck} \geq 70$ MPa) e demais especificações de projeto. Os resultados de resistência à compressão aos 28 dias de uma das

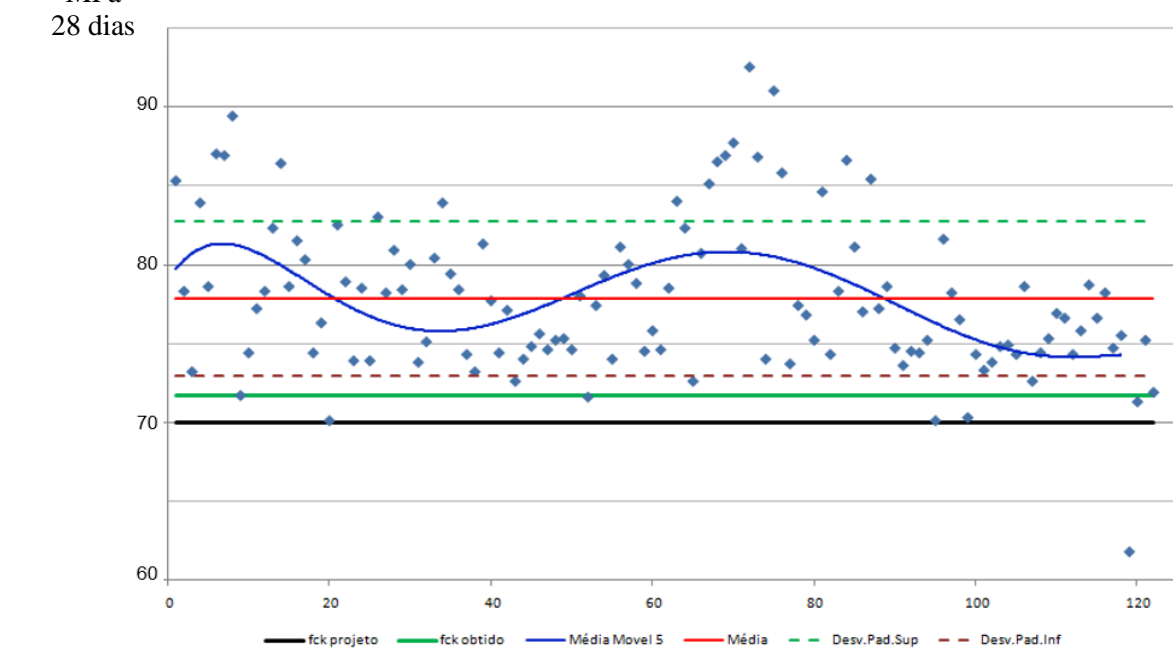


Figura 13. Exemplo de resultados de resistência à compressão do concreto de uma das camadas. Média móvel a cada 3 betonadas.

Além disso, o concreto autoadensável demonstrou um excelente desempenho em campo, acelerando a concretagem: o tempo médio necessário para bombear um caminhão de $6m^3$ foi de 15 minutos (incluindo os ensaios de aceitação), e não houve necessidade de vibração (adensamento).

7.2 Temperaturas aferidas no interior dos blocos de fundação

As temperaturas reais no concreto foram registradas. O pico de temperatura, 57°C, foi alcançado na quarta camada após 582h do início da concretagem. Como se percebe no gráfico, o intervalo de tempo entre concretagens foi alterado *in loco* para melhor se adequar à execução. Ao invés de 3, 3 e 3 dias de intervalo, 3, 10 e 2 foram empregados, o que levou a diferenças de temperatura inferiores a 10% (Figura 15).

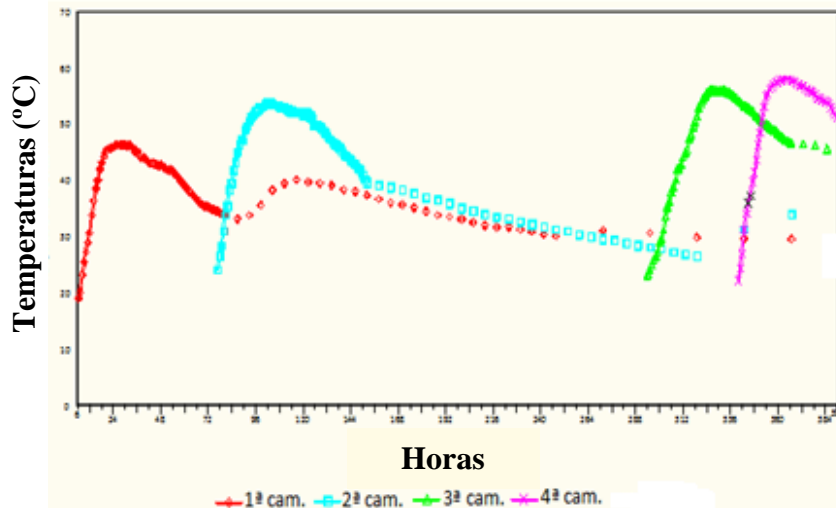


Figura 15. Temperaturas resultantes do calor de hidratação do cimento, conforme registradas em campo. Intervalos de 3, 10 e 2 dias.

8. CONCLUSÕES

Este artigo teve como objetivo demonstrar que o desenvolvimento prévio de estudos de laboratório de traços de concreto e de simulações térmicas computacionais, bem como a proposição de procedimentos executivos rigorosos e, em especial, o controle e supervisão técnica de eventos de concretagem em campo, foram fatores determinantes para promover um elemento estrutural com integridade e em conformidade com as especificações do projeto, sem fissuras.

Assim, como uma menção final, observou-se que as premissas observadas neste artigo, tanto teóricas (antes da concretagem) quanto práticas (durante e após a concretagem), possibilitaram um resultado satisfatório, revelando serem poderosas ferramentas para planejamento e execução de estruturas de concreto desafiadoras e tecnicamente complexas, como as que envolvem concreto massa.

9. AGRADECIMENTOS

Os autores reconhecem e apreciam o apoio e colaboração das empresas envolvidas neste caso, como segue: Brookfield S.A. (Construtora), Polimix Concreto Ltda. (Empresa de Serviços de Concretagem), Pasqua & Graziano Consultores, Concepção Estrutural e Projetos (Projetista Estrutural) e Falcão Bauer (Laboratório de Controle de Qualidade do Concreto).

10. REFERÊNCIAS

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, B., Helene, P. (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.



Revista ALCONPAT

<http://www.revistaalconpat.org>

eISSN 2007-6835



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

Durabilidade de argamassas de reparo sustentáveis expostas 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.

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.

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.

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 carbonación.

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

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

1. INTRODUÇÃO

O principal problema para o qual uma estrutura de concreto armado necessita de reparo é a corrosão do aço, afetando negativamente a durabilidade das edificações, colocando em risco a sua funcionalidade e segurança (Andrade C., Feliu S., 1989). Em ambientes industriais e urbanos, altas concentrações de CO₂ são um problema para edificações de concreto armado devido à carbonatação do concreto, que provoca uma redução na alcalinidade e gera a passivação e corrosão do aço. Para o desenvolvimento da carbonatação, a umidade e a temperatura são fatores que modificam a sua velocidade de avanço.

Depois de detectar o dano causado pela corrosão em uma estrutura, é necessário agir para executar um reparo e prolongar a sua vida útil. Os trabalhos de reparo podem ser basicamente divididos nas seguintes etapas: remoção de concreto, limpeza do aço exposto e aplicação de um material de reparo (Fernández Cánovas, 1989).

A seleção do material de reparo é o fator mais importante a considerar na obra de reparo, geralmente a resistência à compressão é tomada para selecionar uma argamassa de reparo, o que é totalmente insuficiente se não levar em conta outros parâmetros mais importantes, como a compatibilidade da argamassa com o substrato de concreto. O problema de compatibilidade conduz a estudos sobre a diferença entre as propriedades do substrato de concreto e a argamassa de reparo, visto que esta diferença pode induzir a efeitos negativos sobre o reparo, gerando fissurações e, portanto, diminuindo a sua durabilidade (Decter, 1997).

Muitos estudos têm sido realizados para avaliar os diferentes tipos de materiais de reparo disponíveis no mercado. Infelizmente, não são especificadas as propriedades que devem ser consideradas para a avaliação e seleção dos materiais de reparo (Cabrera, 1997). Alguns autores (Emmons, 1994), estabelecem as considerações que afetam a compatibilidade para uma boa seleção de materiais de reparo. A partir destas considerações, provavelmente, a mais importante é a capacidade para resistir às variações de volume, sem perda de adesão ou fissurações, conhecido como "compatibilidade dimensional". Além das alterações de volume, um reparo também deve ter um efeito protetor e para garantir isso, deve-se considerar a compatibilidade química, eletroquímica e a permeabilidade do material de reparo.

Os problemas relacionados com as propriedades a serem avaliadas e a seleção dos materiais de reparo são atribuídos à falta de normalização sobre as atividades de reparo, manutenção e restauro (Kay, 1987; Treadaway, 1987), além das informações insuficientes fornecidas pelos fabricantes de materiais de reparo. Portanto, são necessárias a realização de pesquisas sobre os materiais de reparo adequados para as respectivas classes de agressividade e as condições de serviço de cada estrutura. Por sua vez, o uso de materiais cimentícios alternativos, tais como cinzas volantes, permitirá a obtenção de materiais de reparo com baixo impacto ambiental, pela diminuição no uso de cimento Portland comum (CPC) e que cumpram com as características necessárias de um reparo duradouro. O objetivo deste estudo foi o de avaliar a durabilidade e desempenho potencial de três argamassas preparadas em laboratório, duas com substituição de parte do CPC por cinza volante (20% e 50%) e três argamassas comerciais de reparo, particularmente o seu comportamento mecânico, estabilidade dimensional, adesão e capacidade de proteger o aço contra a corrosão por carbonatação num ambiente industrial.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Tabela 1 mostra os traços das argamassas elaboradas em laboratório. A argamassa MR é usada como referência, as argamassas M1 e M2 foram elaboradas com a mesma relação água/cimento e cimento e areia que a referência, mas com as adições de cinzas volantes CV de 20% e 50% em massa em substituição do cimento empregado na argamassa de referência. O cimento utilizado é tipo CPC 40 e a CV do tipo F, que foi obtida da Carboelétrica da cidade de Nava Coahuila. A composição química do CPC e da CV estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1. Traços das argamassas de reparo fabricadas em laboratório

Argamassa	Componente	Traço
MR	CPC	1
	Areia	3
	Água	0,5
M1	CPC	0,8
	CV	0,2
	Areia	3
	Água	0,5
M2	CPC	0,5
	CV	0,5
	Areia	3
	Água	0,5

As argamassas comerciais de reparo são identificadas como C1, C2 e C3, são argamassas pré-embaladas, base cimento e monocomponente, C1 é uma argamassa reforçada com fibras, C2 de pega rápida, C1 e C3 são modificadas com polímeros e com adição de microsílca em proporções conhecidas pelo fabricante. A mistura e as quantidades de água que foram utilizadas foram as especificadas na ficha técnica de cada argamassa.

Tabela 2. Composição Química do Cimento Portland CPC e da Cinza Volante CV

Óxidos	CPC (%)	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

Foram elaborados diferentes tipos de amostras de acordo com os ensaios a serem realizados; após a moldagem, as amostras foram armazenadas numa câmara de cura a 100% de umidade relativa (UR) e a $21 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 14 dias. Subsequentemente à cura, as amostras foram retiradas da câmara, até atingir a idade de 28 dias.

Para o ensaio de potencial de corrosão foram moldadas amostras com duas barras de aço de 6mm de diâmetro para manter um cobrimento de 7mm, adicionalmente foi inserida uma barra de grafite com o mesmo diâmetro para ser utilizada como contra-eletródo.

Para avaliar a capacidade de resistir à penetração de agentes agressivos, as amostras foram expostas a carbonatação num ambiente industrial.

Na indústria onde as amostras foram dispostas existem processos industriais de produção de carbonato e de bicarbonato de sódio, que se constituem num ambiente agressivo e prejudicial ao concreto.

2.1 Resistência à compressão e à flexão

Para determinar a resistência à compressão foram moldados cubos de argamassa de 50mm de lado. O procedimento de moldagem e ensaio dos cubos e ensaio foi realizado conforme o estabelecido na norma (ASTM C 109). A resistência à flexão foi realizada de acordo com o procedimento descrito na norma, em amostras prismáticas de 40x40x160mm (ASTM C 348).

2.2 Aderência

O ensaio utilizado foi o conhecido como de corte inclinado, no qual se utiliza um prisma 100x100x300mm, feito de duas metades idênticas unidas a 30° e testadas sob compressão axial (Momayez, 2005).

2.3 Permeabilidade

O procedimento para determinar a permeabilidade ao ar das argamassas de reparo foi realizado por meio de testes de permeabilidade de Torrent (TPT), em amostras cúbicas de 150 mm (Torrent, 1992; Kucharczykova, 2010).

2.4 Profundidade de Carbonatação

Para este ensaio, foram moldados corpos de prova prismáticos de 20x55x280 mm. As amostras foram colocadas no ambiente industrial mencionado anteriormente e os resultados nem sempre são uniformes, uma vez que dependem da produção na fábrica, dados obtidos foram relatados em um artigo anterior (Durán-Herrera, 2015). A monitorização foi realizada por pulverização de fenolftaleína como um indicador da profundidade de carbonatação em amostras recém-cortadas em diferentes idades.

2.5 Potenciais e Velocidades de Corrosão

Os potenciais (E_{corr}) e velocidades (i_{corr}) de corrosão foram determinados por meio de ensaios de resistência de polarização (ASTM G 59), com uma velocidade de varredura de 0,06 mV/s e apenas na área do cátodo, de 0 a -10 mV. Esta metodologia é aplicável ao estudo de proteção exercida pelas argamassas de reparo sobre a armadura.

O aço utilizado foi preparado e limpo seguindo o procedimento estabelecido na norma ASTM G1 (ASTM G 1), que consiste em remover completamente os produtos de corrosão que possam haver se formado antes de se iniciar o ensaio. Depois de limpar o aço, o mesmo foi pesado e cuidadosamente protegido para delimitar a área em questão (50 mm).

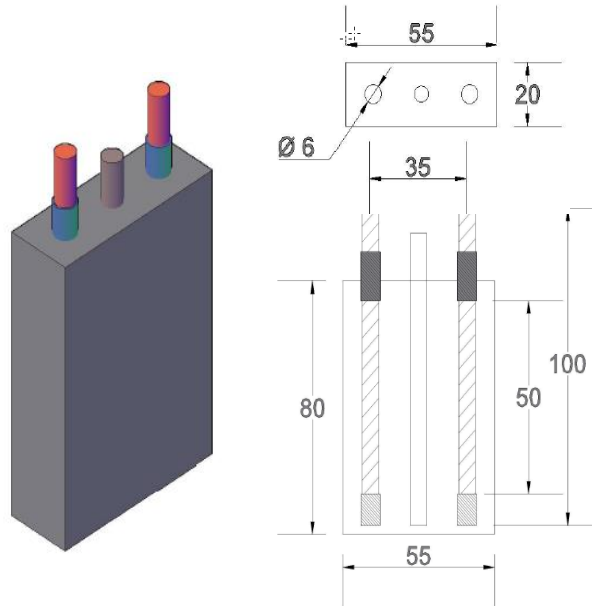


Figura 1. Corpo de prova utilizado na avaliação da durabilidade das argamassas de reparo (unidades em mm)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 mostra o comportamento mecânico de cada argamassa de reparo e os resultados dos ensaios aos 28 dias. Nota-se que a argamassa de reparo C1 apresenta a maior resistência à compressão.

Por sua vez, a argamassa M1 é a próxima na ordem de resistência, sendo maior do que a argamassa MR e as argamassas comerciais C2 e C3. Tal como para a resistência à flexão, a argamassa C1 mostra a maior resistência, devido à adição de fibras. A argamassa comercial C2 apresenta o comportamento mecânico mais baixo. De acordo com várias investigações (Bjegovic 1990; Jiang, 2009), a menor resistência das argamassas C2 e C3 é provavelmente resultante de suas adições.

Tabela 3. Comportamento mecânico das argamassas de recuperação.

Argamassa	Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)	Resistência à Flexão aos 28 dias (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

A aderência foi avaliada pelo tipo de falha que os prismas apresentaram, na Tabela 4 se mostra a resistência de aderência de cada argamassa aos 28 dias e o seu tipo de falha. Se houver uma boa aderência, a amostra falha monoliticamente como um elemento único, em vez de falhar ao longo da junta.

O outro tipo de falha apresentado é na interface onde a falha por aderência entre o concreto e a argamassa é dada antes de falhar qualquer um dos dois materiais. Os resultados de resistência de aderência mostram que as argamassas com melhor desempenho são as C1 e C3, devido à falha ter ocorrido em conjunto com o concreto (monolítica), embora a falha monolítica seja desejável, observa-se que a argamassa M1 apresentou falha na interface, mas a maior resistência de aderência (Cabrera, 1997). A argamassa C2, por sua vez, apresenta as menores propriedades mecânicas, no ensaio de aderência, a falha se apresentou imediatamente no início do ensaio, não permitindo assim qualquer registro por parte da equipe.

Tabela 4. Aderência das argamassas de reparo

Argamassa	Resistência por Aderência aos 28 dias (MPa)	Tipo de Falha
MR	22,2	Interface
M1	26,1	Interface
M2	13,4	Interface
C1	19,4	Monolítica
C2	0,0	Interface
C3	22,5	Monolítica

A Figura 2 mostra a relação entre a permeabilidade do ar ao longo do tempo para as diferentes argamassas. Note-se que a permeabilidade aumenta em quase todas as argamassas, sendo a argamassa C3 a que apresenta os valores mais baixos de permeabilidade e sem aumentos em relação ao tempo. A argamassa C2 não é observada pelos intervalos de escala, por ser muito permeável. Enquanto a argamassa industrializada C1 não pôde ser ensaiada, por apresentar uma superfície rugosa e a presença de agregados de maior dimensão em relação ao resto das argamassas, mas como pode ser visto na carbonatação, não é possível medir seu avanço por não apresentar nenhuma reação com a fenolftaleína (Figura 3).

Portanto, pode dizer-se que a argamassa M1 tem boa resistência ao ingresso de CO₂, pois esta amostra apresentou boa correlação com outras amostras de durabilidade superior, como o caso da argamassa industrializada C3. As argamassas MR e M1 apresentaram valores classificados como de baixa permeabilidade (0,01 a 0,1), enquanto que a argamassa M2 apresentou coeficientes de permeabilidade moderada (0,1-1,0), e as demais classificações estão apresentadas na Tabela 5. Os resultados obtidos pelo método de permeabilidade rápida mostraram boa correlação com os ensaios de permeabilidade à água, cloretos e carbonatação (Ebensperger, 2010).

Tabela 5. Classificação de permeabilidade em função de kT (Ebensperger, 2010).

Classe	kT (10 ⁻¹⁶ m ²)	Permeabilidade
1	<0,01	Muito baixa
2	0,01-0,1	Baixa
3	0,1-1,0	Moderada
4	1,0-10	Alta
5	>10	Muito alta

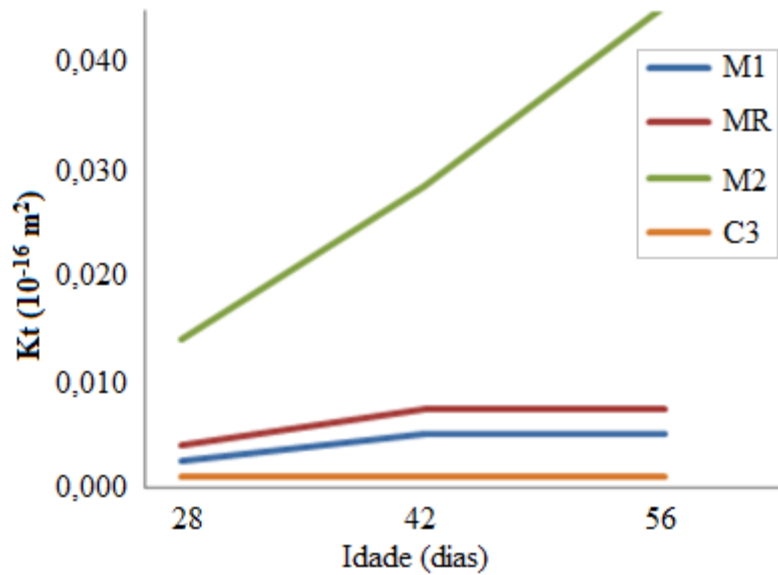


Figura 2. Evolução da permeabilidade das argamassas (kT) ao longo do tempo.

A profundidade de carbonatação dá um indicativo de como o avanço de CO_2 atinge o aço e consegue um decréscimo significativo no pH da argamassa; com a diminuição do pH se inicia a despassivação da armadura, iniciando a sua corrosão. O cobrimento para a armadura é de 7 mm. O comportamento de argamassas de reparo contra o avanço da carbonatação está apresentado na Fig. 3. As argamassas que apresentaram os maiores avanços de carbonatação foram as M2 e C2, enquanto que as argamassas M1, C1 e C3 são as que apresentaram a menor profundidade de carbonatação. Estes resultados estão relacionados com a permeabilidade de cada argamassa, o seu teor de CaO e a presença de um polímero, que é usual dentre os produtos industrializados. O teor de CaO é observado na Tabela 2, onde a quantidade é muito menor para a CV e a sua quantidade em argamassas diminui com o aumento da substituição. Vale ressaltar que para a argamassa C1 não foi possível realizar medições porque não apresentaram reação com o indicador de fenolftaleína. A carbonatação em M2 foi a mais alta devido ao fato de que o ingresso foi medido em relação à face dos corpos de prova, influenciando a média final.

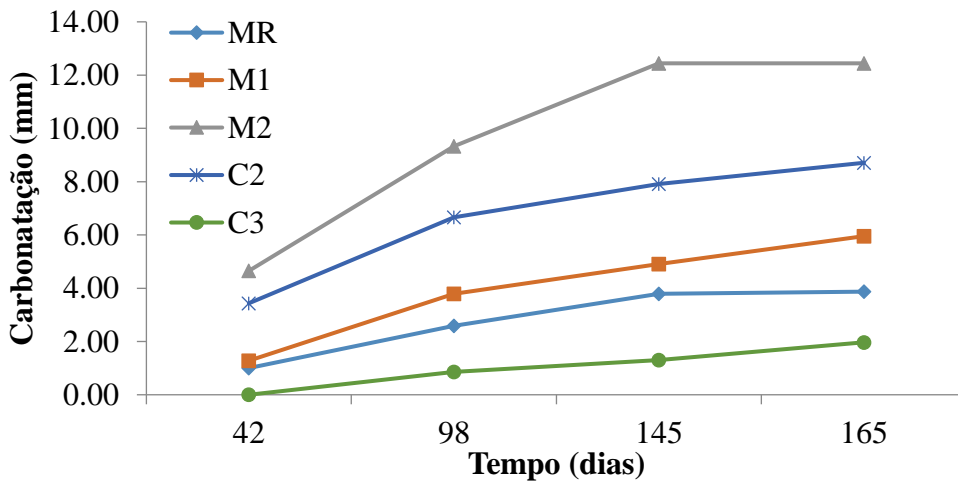


Figura 3. Profundidade de Carbonatação.

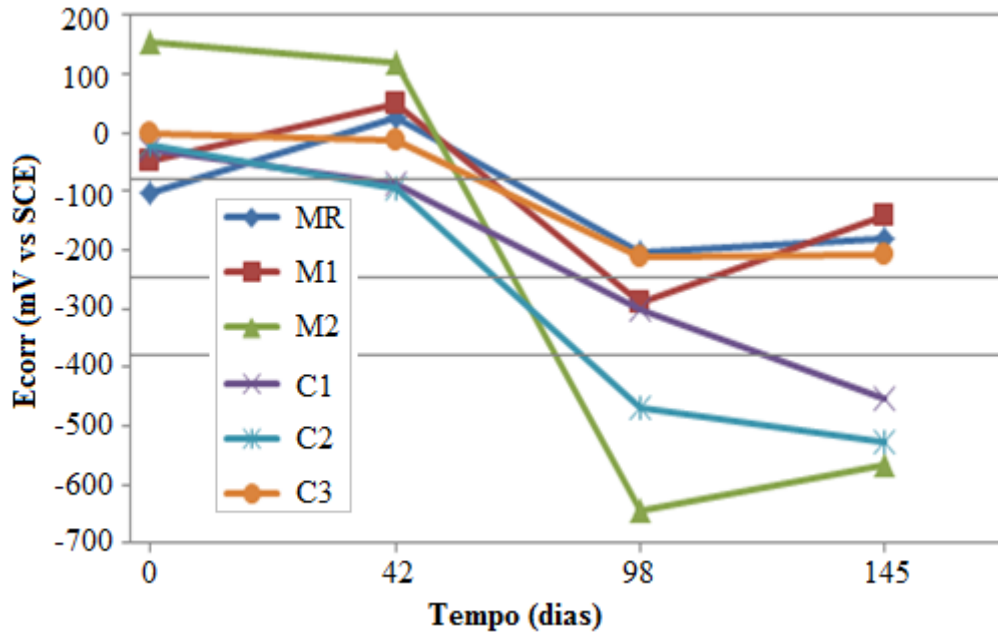


Figura 4. Evolução de Ecorr no tempo de exposição.

Na Figura 4 estão apresentados os potenciais de corrosão (Ecorr) com referência ao eletrodo de Calomel saturado (ECS). As argamassas M2, C1 e C2 mostram alta probabilidade de que se apresente corrosão na armadura a partir de 98 dias, conforme especificado pela Tabela 6, de acordo com a norma ASTM C 876. As argamassas que têm menores probabilidades de corrosão são MR, M1 e C3 para as quais o comportamento foi muito semelhante.

Tabela 6. Critérios para avaliar os potenciais de corrosão na armaduar (ASTM C 876, 2009)

Ecorr vs CuSO ₄ (mV)	Ecorr vs Calomel (mV)	Probabilidade de corrosão
> - 200	> - 80	10% que se apresente
- 200 a - 350	- 80 a - 230	Zona incerta
< - 350	< - 230	90% que se apresente
< - 500	< - 380	Corrosão severa

A evolução de i_{corr} durante o processo de carbonatação está apresentada na Figura 5. Desta é possível dizer que, inicialmente, os valores de i_{corr} na primeira idade mostravam passivação da armadura (menos de $0,1 \mu A / cm^2$) em todas as argamassas. No entanto, como indica o Ecorr, o aço dentro das argamassas M2, C1 e C2 despassiva após 42 dias.

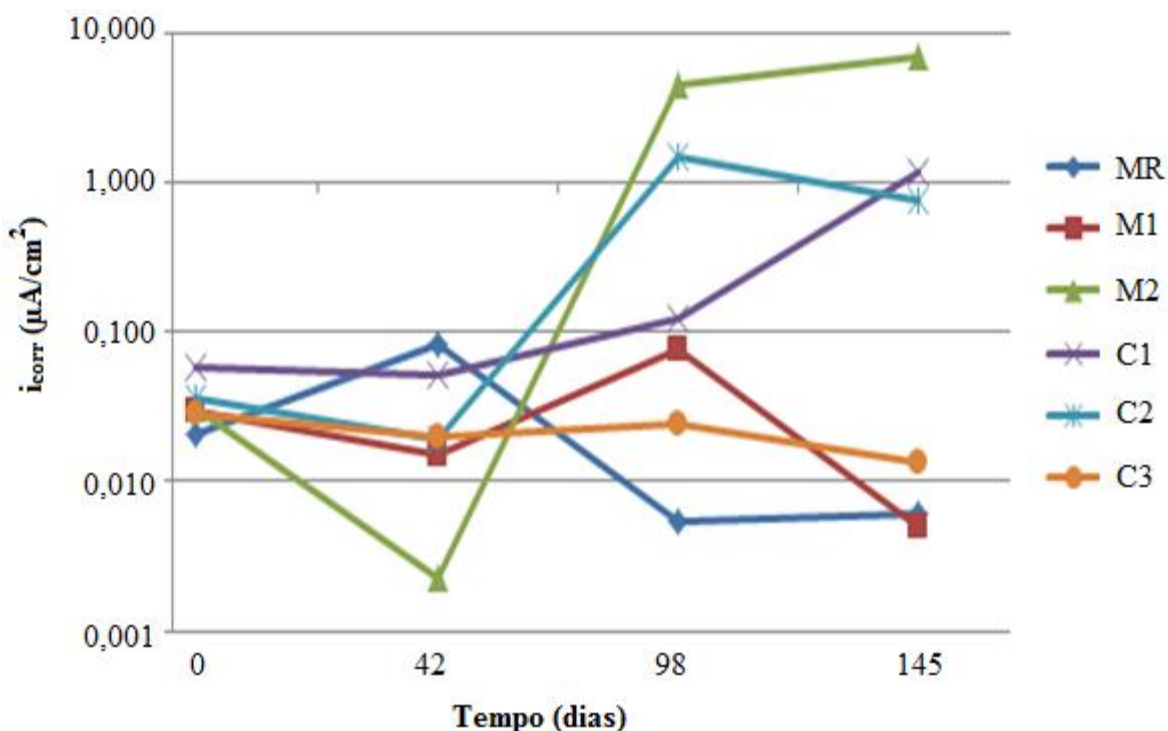


Figura 5. Velocidade de corrosão (i_{corr}) na armadura para cada argamassa de reparo.

O comportamento das argamassas M2 e C2 se comprova devido ao seu baixo comportamento mecânico relacionado com uma maior porosidade e uma maior profundidade de carbonatação. Enquanto a argamassa C1, apesar de ter excelentes propriedades mecânicas pelo uso de fibras, é bastante permeável, permitindo o avanço de CO_2 até a armadura, que gera valores de corrosão elevados.

Como mencionado anteriormente, a argamassa C1 não apresentou reação com o indicador fenolftaleína, que permitiria obter uma medição adequada da carbonatação.

4. CONCLUSÕES

Em termos de desempenho e durabilidade, as argamassas que apresentam o melhor comportamento são as M1 e C3. A argamassa M1 com substituição de cimento Portland comum CPC por 20% de cinza volante CV, melhora o comportamento em relação à argamassa de referência (MR) contra o ataque de CO_2 , mostrando melhor desempenho, incluindo as argamassas industriais C1 e C2.

Do ponto de vista da corrosão, apenas a argamassa industrializada C3 apresenta boas propriedades de durabilidade.

Se a utilização de argamassas tradicionais com boa durabilidade for corretamente empregada, não seria necessária a utilização de uma argamassa industrializada, cujo custo é elevado pelas adições e modificações que, para alguns reparos, podem ser consideradas desnecessárias.

Os ensaios de durabilidade realizados demonstram com maior certeza a proteção oferecida pelo reparo sobre a corrosão da armadura. Estes ensaios juntamente com os ensaios de resistência à compressão, flexão e aderência nos dão as diretrizes para acreditar que uma argamassa tradicional (cimento e areia com substituições minerais), pode funcionar como um reparo eficaz e duradouro.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CONACYT pelo apoio financeiro ao longo do projeto (Projeto CONACYT Ciência Básica nº 155,363). Também agradecem à equipe da Indústria que deu acesso para a exposição das amostras ao ambiente industrial agressivo.

6. REFERÊNCIAS

- 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*.



Compósitos cimentícios de alto desempenho para aplicação como substrato de transição em vigas

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

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

²Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São 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 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: www.alconpat.org](http://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.

RESUMO

Neste estudo apresenta-se o desenvolvimento e a análise do comportamento de compósitos cimentícios de elevado desempenho reforçados com fibras. O material descrito foi especificamente desenvolvido para aplicação como um substrato 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 compósitos 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 compósitos através de comportamento de pseudo-encruamento.

Palavras-chave: compósitos cimentícios; vigas de concreto; substrato de transição.

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.

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.

Autor a contactar: Vladimir Ferrarí (vladimirjf@hotmail.com)

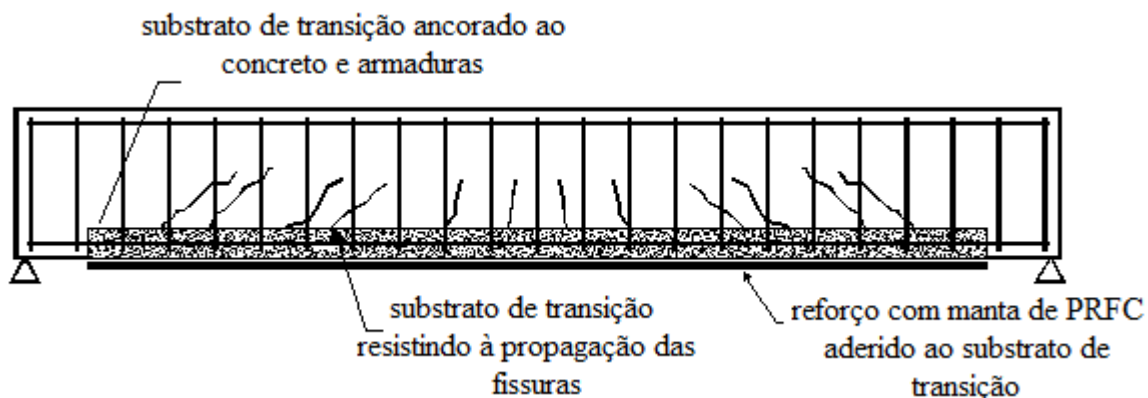
1. INTRODUÇÃO

De acordo com Ferreira (2012), as modificações resultantes da adição de fibras de aço ao concreto, em taxas relativamente baixas (máximo de 2%), são restritas a fase de pós-pico do histórico de carregamento. Em tais condições, as fibras de aço não são suficientes para inibir o processo de fissuração da matriz que ocorre antes da aplicação do carregamento máximo (crescimento subcrítico da fissura).

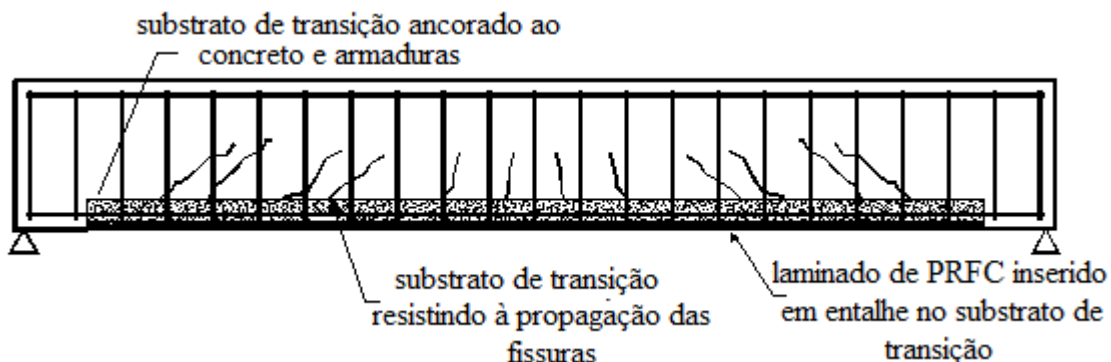
O efeito da incorporação de microfibras de aço às fibras curtas é aqui estudado numa tentativa de melhorar o comportamento dos compósitos cimentícios na fase pré-pico do histórico de carregamento.

Esses materiais foram especificamente desenvolvidos para aplicação como um substrato de transição (Figura 1). Dezenove diferentes compósitos foram preparados em dois estágios: Estágio I (compósitos foram desenvolvidos para aplicação como um substrato de transição de vigas de concreto armado reforçadas pela colagem externa de mantas de PRFC – Figura 1.a) e Estágio II (compósitos foram desenvolvidos para aplicação como substrato de transição de vigas reforçadas pela inserção de lâminas de PRFC em entalhes executados nesse substrato – Figura 1.b).

Na prática de engenharia, é comum encontrar vigas de concreto armado com o banzo inferior tracionado deteriorado por ações mecânicas, efeitos de corrosão da armadura ou fissuração. Em tais casos, o processo de reforço da viga deve ser precedido pelo de recuperação do banzo. Para essa finalidade, Ferrari (2012) então, propôs o desenvolvimento de um compósito de elevado desempenho a base de cimento destinado a formar o substrato de transição como indicado na Figura 1. O conceito do substrato de transição é criar um novo banzo tracionado formado pelo compósito cimentício com características mais apropriadas à aderência do reforço polimérico.



a) Reforço externo com manta de PRFC aderido ao substrato de transição (Ferrari, 2012)



b) laminado de PRFC inserido em entalhe no substrato de transição (Arquez, 2010)

Figura 1. Substrato de transição de viga de concreto armado reforçada com PRFC

No presente estudo, novos resultados foram adicionados aos já apresentados em Ferrari (2012). Os novos resultados foram obtidos através do desenvolvimento e da análise de compósitos cimentícios para formar o substrato de transição de vigas reforçadas através da inserção de lâminas de PRFC em entalhes nesse novo substrato.

2. COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ELEVADO DESEMPENHO

Para avaliar a resistência à tração na flexão dos compósitos cimentícios, foram realizados ensaios em três pontos em corpos de prova prismáticos (150mm x 150mm x 500mm) dotados de um entalhe central reto passante seguindo-se as recomendações da Rilem (2002). A Figura 2 mostra a configuração geral do ensaio que foi conduzido controlando-se o deslocamento da abertura da fissura na entrada do entalhe (CMOD – *crack mouth opening displacement*).

No Estágio I, treze compósitos foram analisados como mostrado na Tabela 1. Os compósitos foram constituídos por diferentes volumes e tipos de fibras de aço e, também por diferentes tipos de matriz cimentícia (argamassa e microconcreto). Os compósitos foram divididos em grupos, sendo cada grupo formado por três corpos de prova prismáticos com as mesmas características. No Estágio II, um grupo adicional formado por seis compósitos (todos eles feitos de microconcreto) foram analisados.

A fibra de aço especificada por “A” tem comprimento de 25 mm e um diâmetro de 0,75 mm. A fibra do tipo “C”, produzida especificamente para essa pesquisa, tem 13 mm de comprimento e um diâmetro de 0,75 mm. Essa fibra tem sido designada por microfibras de aço (Figura 3).

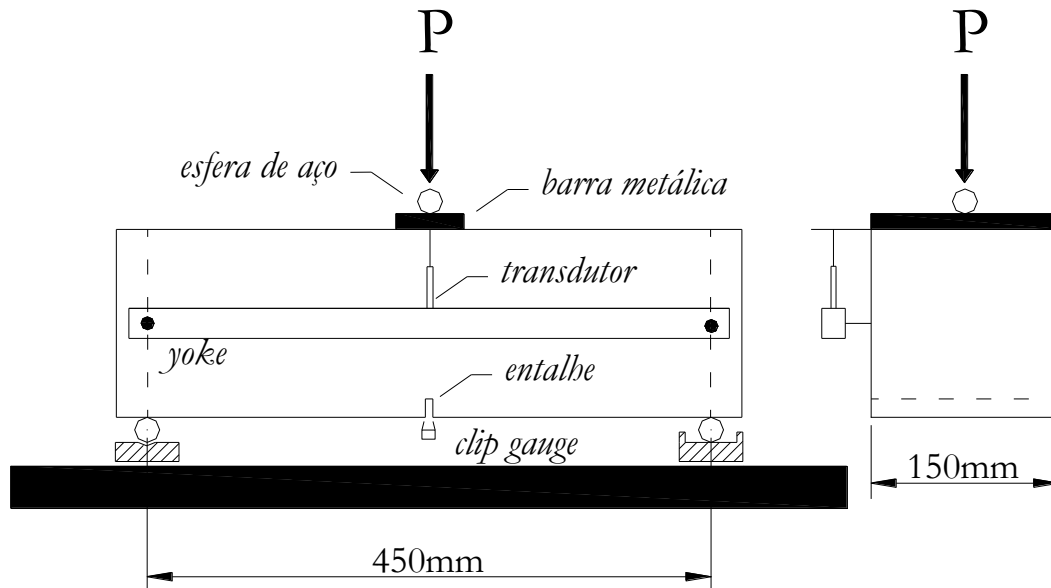


Figura 2. Configuração geral do ensaio

Tabela 1. Compósitos analisados

Matriz	Estágio	Grupo	Compósitos	Volume fibras	Tipo fibras	Material	Idade (dias)
Argamassa (A)	I	1	CPA	0%	-	Argamassa	29
		2	CPA1A	1%	A	Argamassa	29
		3	CPA1.5A	1.5%	A	Argamassa	29
		4	CPA2A	2%	A	Argamassa	29
		5	CPA1.5A0.5C	1.5%+0,5%	A+C	Argamassa	28
		6	CPA1.5A1.5C	1.5%+1.5%	A+C	Argamassa	28
		7	CPA1.5A2.5C	1,5%+2.5%	A+C	Argamassa	28
		8	CPA1.5A3.5C	1.5%+3.5%	A+C	Argamassa	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)

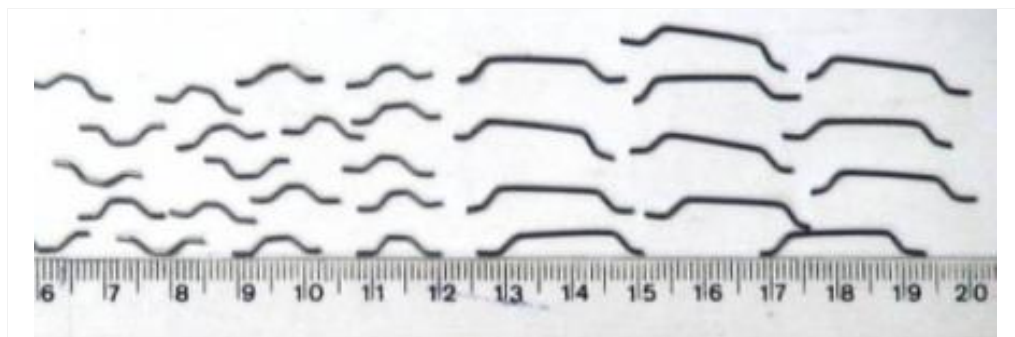


Figura 3. Microfibras de aço (esquerda) e fibras convencionais de aço (direita)

3. RESULTADOS E ANÁLISES

3.1. Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos

Os valores das propriedades mecânicas dos compósitos estão apresentados na Tabela 2: resistência média à compressão (f_{cm}), resistência média à tração por compressão diametral ($f_{ctm,sp}$) e o módulo de elasticidade (E_{cs}).

Tabela 2. Resultados médios da caracterização dos compósitos sobre compressão

Matriz	Estágio	Grupo	Compósitos	f_{cm} (MPa)	$f_{ctm, sp}$ (MPa)	E_{cs} (GPa)
Argamassa (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. Ensaio de flexão – cargas e resistências

A tenacidade flexional dos compósitos foi determinada seguindo-se as recomendações da Rilem (2002) e os resultados são indicados na Tabela 3. O critério para avaliação da tenacidade é baseado na capacidade de absorção de energia, entendida como sendo a área sobre a curva carga (P) versus deslocamento vertical (δ).

Segundo a Rilem, a contribuição das fibras para a tenacidade do compósito é avaliada através da subtração da parcela de tenacidade que provém da resposta da matriz cimentícia. Na Figura 4 ilustra-se uma resposta típica do comportamento à flexão de compósitos com fibras, juntamente com as expressões utilizadas para cálculo das resistências equivalentes à tração na flexão ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$) e das resistências residuais em flexão ($f_{R,1}$ e $f_{R,4}$). Os significados dos parâmetros apresentados nessa figura são:

- F_L - é a força máxima de *offset* dentro do intervalo de $\delta=0,05$ mm. Esse intervalo é obtido com o auxílio de uma reta paralela à tangente inicial, passando pelo ponto que caracteriza o deslocamento δ de *offset*;
- δ_L - é o valor de deslocamento vertical correspondente a F_L ;
- $f_{fct,L}$ - é a tensão correspondente à força F_L , dado pela expressão:
$$f_{fct,L} = \frac{3.F_L.L}{2.b.h_{sp}^2};$$
- L - é o vão livre do corpo de prova prismático e b é a sua largura;
- h_{sp} - distância do topo do entalhe até a face superior do corpo de prova;
- D_{BZ}^b , $D_{BZ,2}^f$ e $D_{BZ,3}^f$ - parcelas de absorção de energia pela matriz e pelas fibras, respectivamente. São calculadas através da área sob a curva $P-\delta$ até deslocamentos específicos (ver Figura 4);
- $F_{R,1}$ e $F_{R,4}$ - valores de força correspondentes aos deslocamentos $\delta_{R1}=0,46$ mm e $\delta_{R4}=3,00$ mm. São valores utilizados para cálculo das resistências residuais dos compósitos.

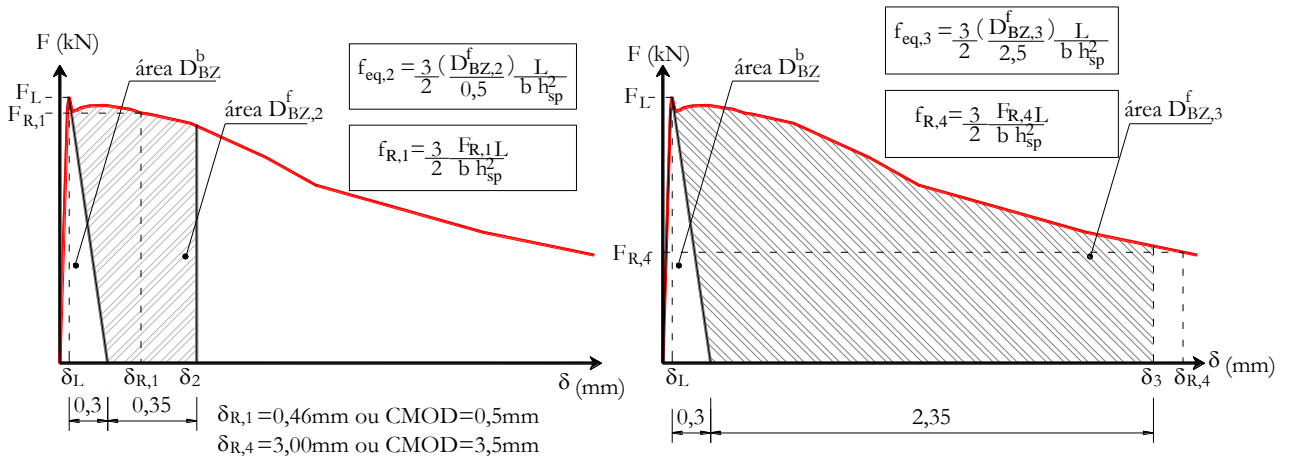


Figura 4 – Critérios da Rilem (2002) para avaliação do comportamento de materiais com fibras

Ainda de acordo com a Rilem (2002), as parcelas de tenacidade ($D_{BZ,2}^f$ e $D_{BZ,3}^f$) são transformadas em resistências flexionais equivalentes ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$) para os diferentes níveis de deslocamentos δ_2 e δ_3 . A capacidade de carga do material em relação a um valor pré-definido de flecha é avaliada através do conceito de resistências flexionais residuais ($f_{R,1}$ e $f_{R,4}$).

Na Tabela 3 é também apresentado o valor da força (F_M), que corresponde à força máxima alcançada pelo compósito ao longo do histórico de carregamento.

Tabela 3. Cargas e resistências

Matriz	Estágio	Compósitos	Cargas (kN)				Resistências (MPa)				
			F _L	F _M	F _{R,1}	F _{R,4}	f _{ft,L}	f _{eq,2}	f _{eq,3}	f _{R,1}	f _{R,4}
Argamassa (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

Fica evidenciado que a adição de fibras de aço contribuiu significativamente para o aumento da resistência definida pelo parâmetro ($f_{ft,L}$) que representa a parcela de resistência do compósito proveniente da contribuição da matriz cimentícia.

Ainda é possível afirmar que a adição de microfibras às fibras de aço resultou numa melhora ainda mais significativa nessa propriedade para os compósitos de argamassa em relação aos de microconcreto.

O desempenho dos compósitos de argamassa proveniente da parcela de contribuição das fibras ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$) foi melhorado com o aumento do volume da fibra A e potencializado quando da adição das microfibras de aço.

Para os compósitos de microconcreto é evidente a elevação dos níveis das resistências flexionais equivalentes ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$) por meio da adição das microfibras de aço à fibra A. Em grande parte desses compósitos, a resistência ($f_{eq,2}$) supera o valor da resistência ($f_{ft,L}$), denotando ganhos significativos de resistência após a fissuração da matriz.

3.3. Curvas P-CMOD

As curvas P-CMOD dos compósitos de argamassa são apresentados na Figura 5. A presença de fibras e microfibras de aço na matriz cimentícia de argamassa melhorou o seu comportamento, traduzido em termos de aumento da capacidade de absorção de energia e elevação dos níveis de resistência, antes e após a fissuração da matriz.

O aumento no volume de fibras do tipo “A”, proporcionou melhora gradual na ductilidade dos compósitos de argamassa. Sobremaneira, a incorporação das microfibras de aço às fibras “A”, contribuiu ainda mais nesse sentido.

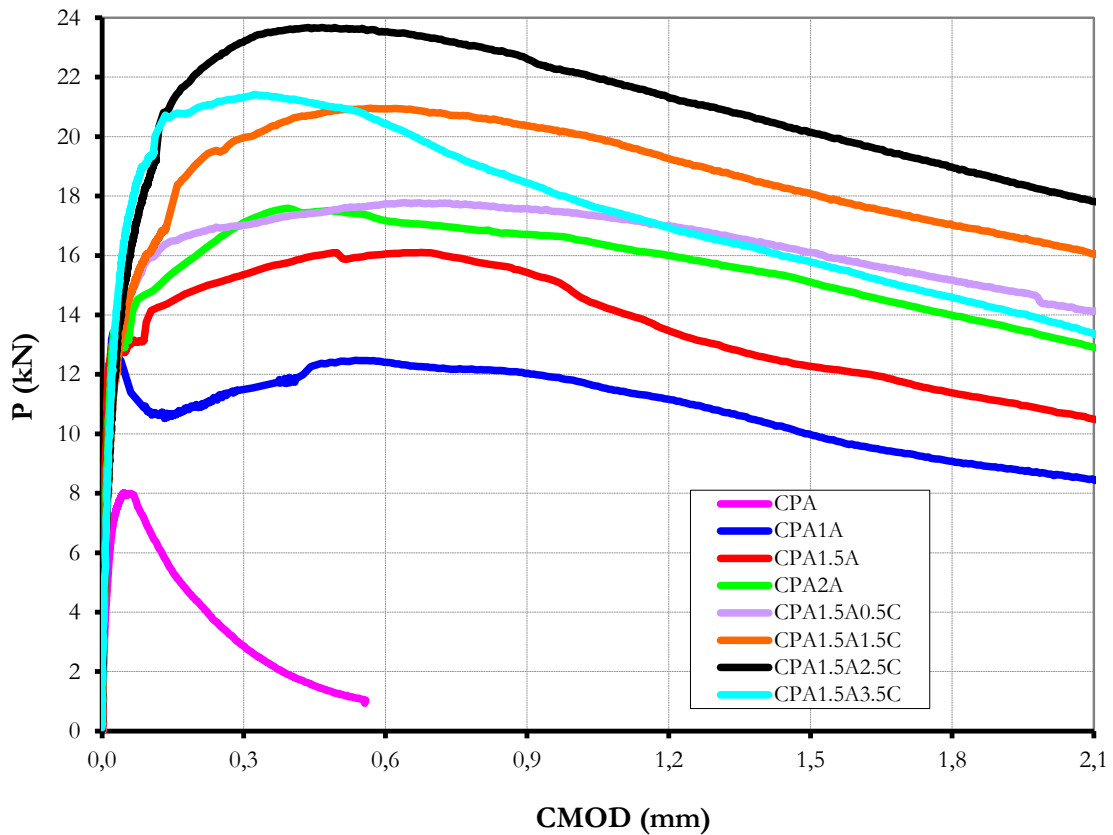


Figura 5. Curvas P-CMOD dos compósitos de argamassa

As curvas dos compósitos de microconcreto são apresentadas na Figura 6. A presença de fibras e microfibras melhorou principalmente a capacidade de absorção de energia desses compósitos. A capacidade resistente foi diminuída com a presença isolada da fibra A (compósito CPM1A).

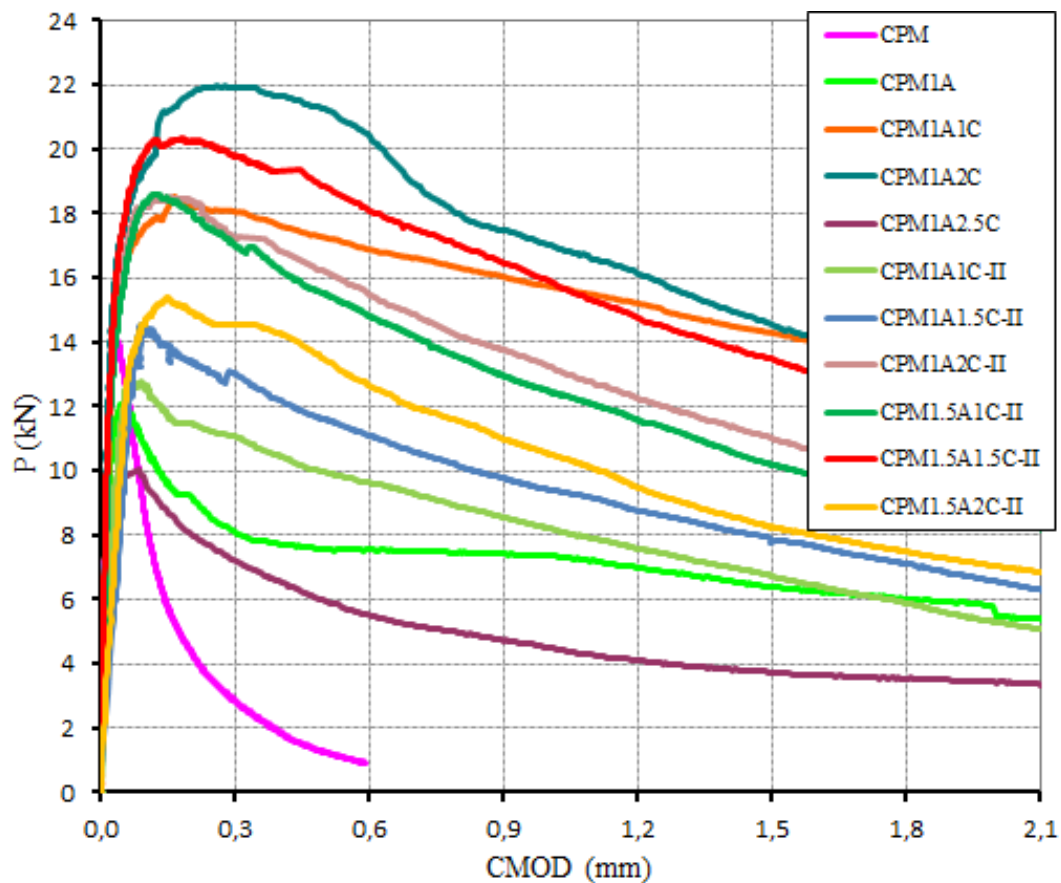


Figura 6. Curvas P-CMOD dos compósitos de microconcreto

3.4. Curvas de resistência ao fraturamento

Na Figura 7 mostram-se as curvas de resistência ao fraturamento dos compósitos de argamassa. Nas Figuras 8 e 9 são apresentadas as curvas de resistência dos compósitos de microconcreto produzidos nos estágios I e II, respectivamente. Onde “ K_R ” representa a resistência ao avanço da fissura (resistência ao fraturamento do compósito) e “ α ” é a profundidade da fissura (a) normalizada relativamente à altura (W) do corpo de prova prístático, ou seja, $\alpha = a/W$.

O ganho de resistência ao fraturamento ficou bem evidenciado principalmente no regime de ruptura pós-pico (força máxima), aumentando-se entre os diferentes compósitos com o aumento do teor de fibras metálicas incorporadas a cada um deles. Exceções para os compósitos CPA1.5A3.5C e CPM1A2.5C em que suas resistências ao fraturamento ao longo do histórico de carregamento foram inferiores às dos compósitos CPA1.5A2.5C e CPM1A2C, respectivamente.

Também é possível notar que na fase de pós-pico de carregamento, os trechos finais das curvas de resistência para os compósitos de argamassa (CPA1.5A1.5C e CPA1.5A2.5C) e de microconcreto (CPM1A1C e CPM1A2C) são ascendentes, o que representa o elevado ganho de resistência à propagação da fissura proporcionado pela presença das fibras e microfibras de aço. Tal fato está associado à dissipação de energia envolvida no processo de arrancamento das fibras e microfibras da matriz cimentícia.

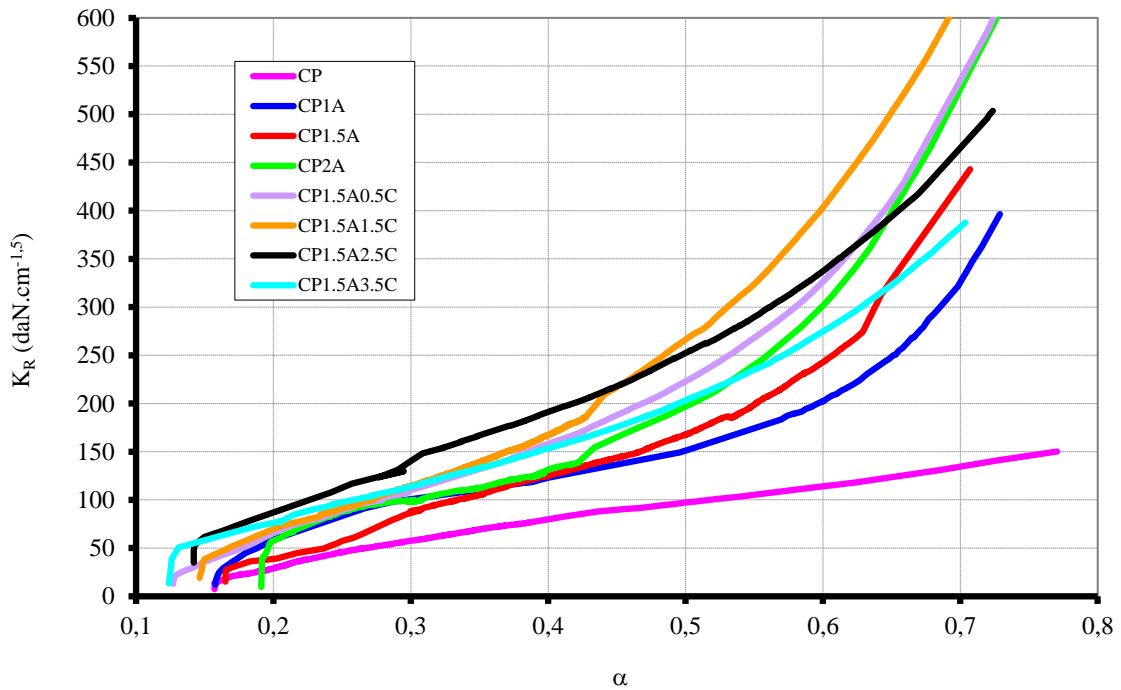


Figura 7. Curvas de resistência ao fraturamento dos compósitos de argamassa

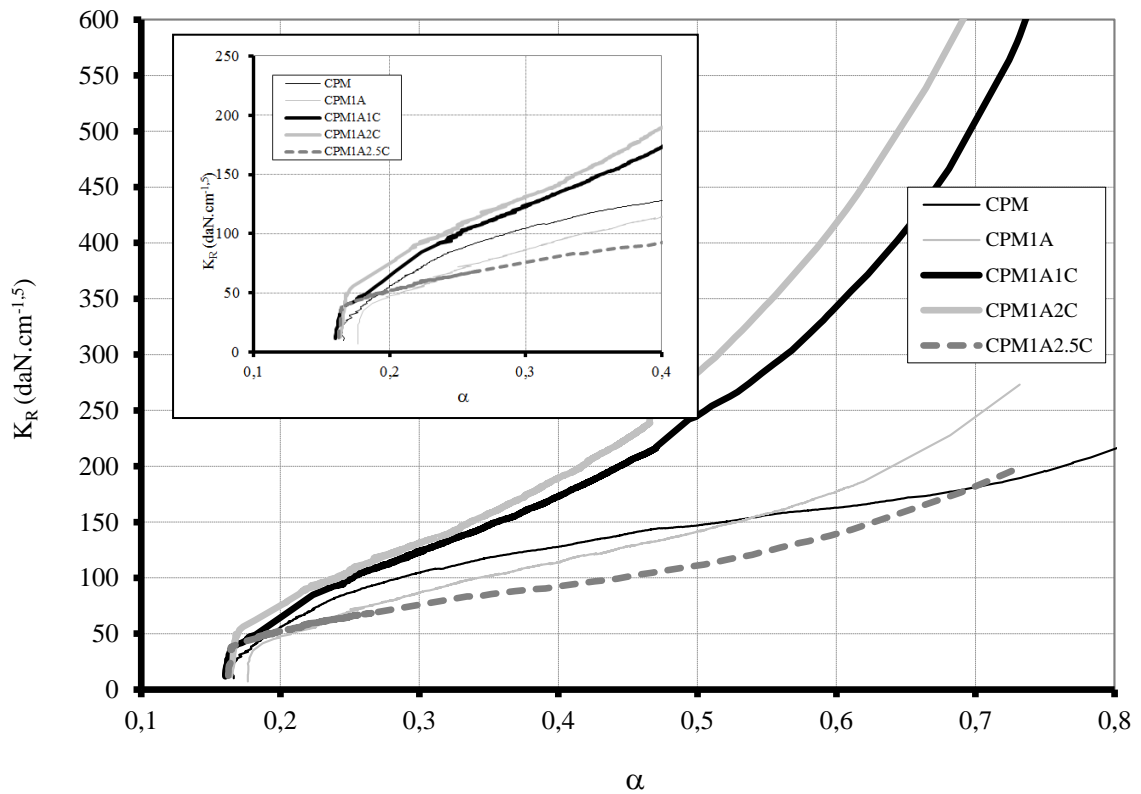


Figura 8. Curvas de resistência ao fraturamento dos compósitos de microconcreto – Estágio I

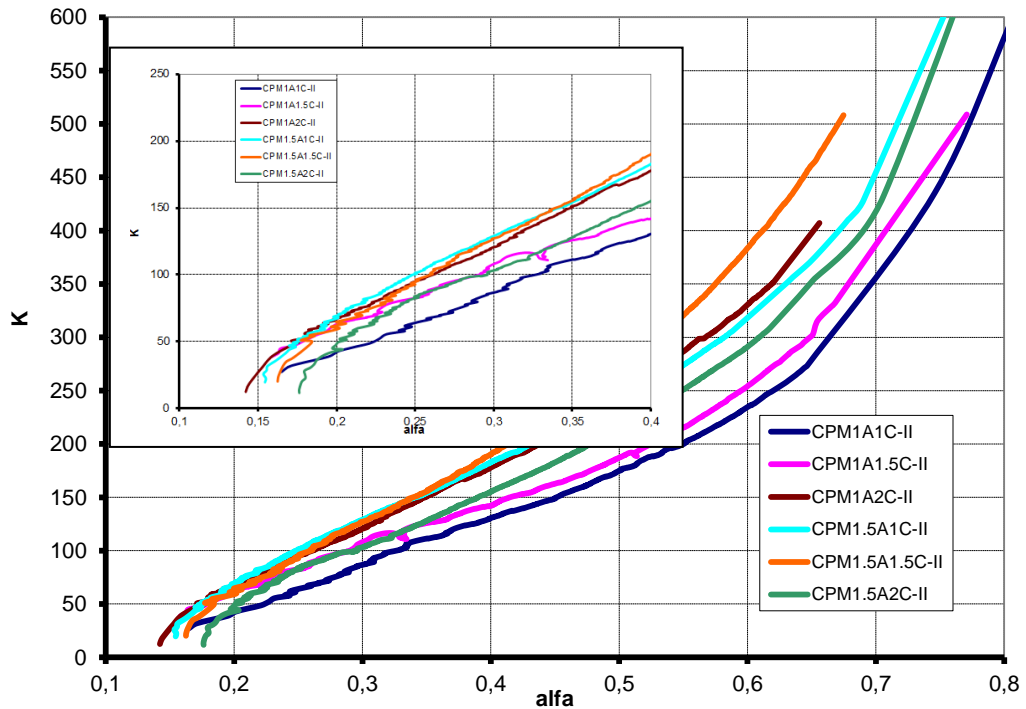


Figura 9. Curvas de resistência ao fraturamento dos compósitos de microconcreto – Estágio II

4. CONCLUSÕES

Da pesquisa que foi conduzida, as seguintes observações podem ser estabelecidas:

1. O processo de hibridização é uma alternativa interessante para aplicação na recuperação do banzo tracionado de vigas de concreto, uma vez que, a adição de microfibras de aço às fibras curtas de aço aumenta a resistência à tração na flexão e aumentam a tenacidade flexional dos compósitos de argamassa e de microconcreto;
2. Com a fissuração da matriz a transferência de tensões foi facilitada pelas microfibras que, uma vez dispersas na matriz, condicionaram a propagação da fissura a um aumento do nível de carregamento do compósito;
3. Considerando-se as características de pseudo-encruamento e a sua aplicação específica, o compósito CPM1A2C foi o que apresentou as melhores propriedades entre os produzidos no estágio I;
4. Entre os compósitos produzidos no estágio II, destaca-se o CPM1.5A1.5C-II que, através da hibridização resultou em aumentos consideráveis na carga máxima como também na resistência ao fraturamento e a flexão.

5. REFERÊNCIAS

- 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, “*Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado*”, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São 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.



Resistência à compressão de concreto com escória de alto forno. Re-revisão do estado da arte

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 12 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.

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.

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.

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.

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

1. INTRODUÇÃO

Desde as primeiras civilizações, os materiais com certa capacidade de aderência (materiais cimentícios) têm sido fundamentais para o desenvolvimento e evolução das construções. Foi assim que, no decorrer do tempo, o homem buscou novos materiais cimentícios de modo a obter melhores propriedades mecânicas e durabilidade. Essa evolução fez com que o cimento Portland e o concreto armado sejam os materiais mais utilizados na indústria da construção (Gamgbir, 2009). Entretanto, a indústria do cimento é uma das principais fontes geradoras de dióxido de carbono (CO_2). Estima-se que as emissões de CO_2 na atmosfera sejam da ordem de 1.0 ton por tonelada de Clinker (Cassgnabere, 2009), que é da onde se obtém o cimento Portland após sua moagem. Diante dessa situação, tem se buscado alternativas de aproveitamento de outros materiais pozolânicos, que sejam menos nocivos ao meio ambiente, devido a sua procedência, e que adequadamente empregados possam conferir benefícios. Isto levou a utilização de subprodutos industriais, cuja categorização é ampla e variada (Malhotra, 1996; Day, 2006). Embora a quantidade de resíduos/subprodutos utilizada atualmente seja pouca, quando comparada a quantidade que se produz, dia-a-dia ao redor do mundo são conduzidas pesquisas com objetivo de se buscar novas aplicações a esses resíduos, como materiais pozolânicos, na indústria da construção, com objetivo de aumentar seu emprego e, conseqüentemente, reduzir a pegada de carbono da indústria da construção.

Existem alguns resíduos industriais que podem ser usados de forma plenamente viável como materiais cimentícios e que também requerem pouco ou nenhum tipo de tratamento prévio para sua utilização como adição ao concreto ou argamassa. Por outro lado, também existem outros materiais cimentícios de origem natural (por exemplo, a cinza vulcânica), que se encontram disponíveis para serem utilizados como adição ao concreto (Malhotra, 1996).

Alguns materiais cimentícios provenientes de resíduos industriais que podem ser utilizados como materiais alternativos são: cinza volante, sílica ativa, escória de alto forno, o metacaulim e xisto (Day, 2006), que podem ser utilizados como adições minerais na preparação do cimento Portland em fábrica (cimento Portland modificado, CPM); como adição na moagem; ou pela mistura de dois ou mais tipos de materiais finos que substituam parcialmente o cimento Portland (cimento hidráulico com adições ou cimento com adições) usado na mistura do concreto ou argamassa (Kosmatka, 2004).

A primeira propriedade do concreto que foi afetada pelo uso de materiais cimentícios de origem natural ou industrial é a resistência à compressão, denominada nesse artigo como resistência real (f_c), obtida a partir de ensaios por compressão e, portanto, existem diversos artigos (Cassgnabere, 2009; Bagheri, 2013, Atis, 2003; Ashtiani, 2013) que, em diferentes misturas, condições, origem ou atmosfera permitem utilizar uma certa quantidade destes materiais sem afetar significativamente as propriedades mecânicas do concreto. É difícil pensar em um manual de utilização destes materiais, mas é visto como uma necessidade saber se a tendência a diminuir f_c é constante ou qual é seu o limite em função dos parâmetros de pesquisa que foram utilizados em vários estudos.

Da mesma forma, apesar de já existirem excelentes combinações de materiais cimentícios que resultam em cimentos binários, ternários e quaternários (Nedi, 2001), a disponibilidade dos materiais em uma única área ou região pode constituir um obstáculo econômico para o seu uso generalizado, especialmente em países em desenvolvimento. Portanto, a utilização de cimento binário produzido em fábrica pode ser neste momento a alternativa mais prática em termos econômicos e de disponibilidade. O objetivo deste artigo é revisar o estado da arte sobre as tendências da resistência à compressão de concreto e estruturas que utilizam escória de alto forno (EAF) como material cimentício e verificar os níveis de substituição de cimento Portland

considerados nas normas de diferentes países para a classificação dos cimentos com escória de alto forno, seja misturado durante a moagem ou pela mistura separada a partir de cada material moído.

2. CARACTERÍSTICAS DA ESCÓRIA DE ALTO FORNO

Um subproduto cimentício é um material secundário ou ocasional derivado do processo de fabricação industrial através de uma reação química, que possui característica aglomerante depois de certo tratamento (Malhotra, 1996). Um subproduto industrial considerado como resíduo, pode possuir certa capacidade pozolânica, e pode ser útil e comercializável para encontrar alguma aplicação em outro setor industrial, por exemplo, como substituto parcial do cimento Portland nas construções com concreto, ou como agregado pétreo, como é o caso da escória granulada.

A escória de alto forno é um subproduto (não-metálico) da fabricação de ferro fundido em alto-forno, composto essencialmente por silicatos e aluminossilicatos de cálcio e outras fases (Siddique, 2008). Alguns autores (Malhotra, 1996; Lea, 1971) descrevem a escória de alto forno como um material pozolânico, uma vez que não apresenta propriedades cimentícias por si só, a menos que seja combinado com outros materiais cimentícios para sua ativação química. Mas outros autores observam que deve ser classificado como um cimento hidráulico latente, pois seus componentes são semelhantes aos óxidos do cimento Portland (cal, sílica e alumina) em diferentes proporções (Lea, 1971).

A escória gerada na indústria do aço é de quatro tipos de acordo com o método utilizado para o seu resfriamento: escória de alto forno resfriada ao ar; escória expandida ou de espuma; escória paletizada e escória granulada de alto-forno.

A escória resfriada ao ar não apresenta as mesmas propriedades hidráulicas que a escória resfriada por água, já que ao se resfriar lentamente no ar, seus compostos são capazes de alcançar um maior grau de cristalização, o que resulta num material com pouca atividade reativa. A escória expandida, por sua vez, é utilizada como agregado graúdo na produção do concreto leve com baixo peso específico (Malhotra, 1996). Estes materiais são utilizados na construção de estradas e construções. O tipo de escória utilizada como material cimentício é o material granulado de alto forno, que é obtido pelo resfriamento rápido da escória fundida, através da aplicação de água na sua superfície, visando obter um material vítreo que terá algum certo grau de ativação.

O resfriamento rápido da escória fundida com água previne a formação de cristais maiores, resultando num material granular que compreende aproximadamente 95% do composto de aluminossilicato de cálcio não cristalino. A escória granulada é processada através de uma pré-secagem e, em seguida, é submetida à moagem com moinho de esferas rotativo até se obter um pó fino, que é conhecido como cimento de escória de alto forno de grãos moídos (GGBS é sua sigla em Inglês). A escória granular apresenta dimensões das partículas entre 4 e 15 mm, e depois da moagem apresenta dimensões menores que 45µm e área de superfície de 400 a 600 m² / kg, que pode ser empregada como um cimento hidráulico latente (Lea, 1971). O material triturado é um pó de cor mais clara do que a do cimento Portland, resultando num concreto com cor mais clara e um acabamento superficial mais suave em comparação com concreto de cimento Portland. Sua densidade específica é 3.15.

Na Figura 1 uma imagem de MEB (SEM) extraída da literatura, com a morfologia de uma pasta hidratada, composta por um sistema cimentício com 30% de escória de alto-forno e 70% de cimento Portland comum (Li, 2011). Na Figura 1 se observam partículas angulares correspondentes à escória e que não chegaram a hidratar após 7 dias. Este comportamento é normal nos cimentos com escória, já que a escória apresenta uma menor atividade de reação em comparação com o cimento Portland comum.

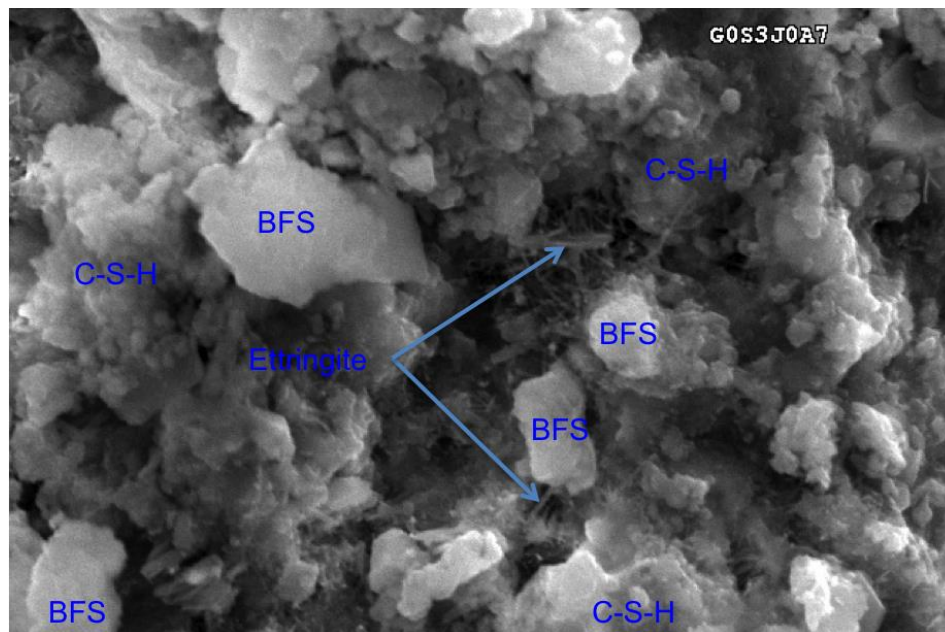


Figura 1. Microfotografias de MEB de pastas hidratadas após 7 dias, pasta com 30% de escória de alto-forno e 70% de cimento Portland comum (BFS escória de alto forno, C-S-H silicato de cálcio hidratado) (Li, 2011).

As especificações para a escória de alto-forno granulada como material cimentício se encontram na ASTM C 989 (ASTM-C-989, 1999), onde a escória é classificada em três graus de resistência. Estes graus estão baseados em um índice de atividade da escória: grau 80 (com baixo índice de atividade); grau 100 (com índice de atividade moderado) e grau 120 (com alto índice de atividade); outras especificações para a escória também são encontradas na AASHTO M302 (ASSTHO-M302, 2000). O número nas designações de qualidade corresponde à resistência à compressão aos 28 dias, aproximadamente, realizada em cubos padrão de argamassa, preparados com EGAF (mistura com uma quantidade igual em massa de cimento Portland). O grau de atividade influencia no comportamento reativo na mistura de concreto no estado fresco e posteriormente no estado endurecido. Além disso, a atividade hidráulica da escória é determinada pela sua composição química, área superficial da partícula e do tamanho da partícula da escória moída (Puertas, 1993; Pal, 2003).

A composição química da escória de alto forno pode variar de acordo com a sua origem, mas para ser considerada como um material cimentício é necessário que a composição química se encontre nos intervalos: CaO (30-45%), SiO₂ (30-48%), Al₂O₃ (15-25%), Fe₂O₃ (0,5-2%), e outros óxidos de menor quantidade (Shetty, 2013). Entre os requisitos químicos dados pela ASTM 989 (ASTM-C-989), se estabelecem 2,5% e 4,0% como as quantidades máximas de enxofre (S) e sulfatos, respectivamente; abaixo destas quantidades a presença de escória no concreto armado não representa um risco de corrosão para a armadura (Wang, 2010). A escória de alto forno pulverizada é ligeiramente alcalina e apresenta um pH em solução num intervalo de 8 a 10; no entanto o lixiviado de escória pode exceder um valor de 11, um nível que pode ser corrosivo para o alumínio ou barras de aço galvanizado colocadas em contato direto com a escória (Wang, 2010). As proporções dos compostos de óxidos mencionados anteriormente determinarão a basicidade da escória e sua capacidade hidráulica. Mas para que a escória possa realmente desenvolver o seu potencial hidráulico é necessário que sua fase vítrea seja em sua maioria superior a 70%. Esta característica vítrea irá determinar a capacidade da escória de recriar a estrutura cristalina que irá proporcionar ao concreto suas qualidades de resistência e durabilidade.

Como um material cimentício, a escória granulada tem as seguintes características: é um forte cimento hidráulico latente quando é moído, tem baixa quantidade de Na_2O e K_2O , baixa densidade, de elevada permeabilidade à água, não contém cloretos e não produz reações álcali-agregado.

A substituição de cimento por escória granulada moída (EGAF) geralmente reduz a quantidade de água necessária para obter um mesmo abatimento como o obtido em um concreto com CPC. A redução da quantidade de água será influenciada com o aumento do nível de substituição e a finura da escória (Shetty, 2013). A demanda de água típica da mistura de concreto com EGAF é da ordem de 3 a 5% menor do que a do concreto com cimento Portland (Wang, 2004; Walker, 2011). Isto representa uma redução de 5 a 10 litros de água por metro cúbico de concreto. Para substituições de CPC por EGAF da ordem de 70% e 80%, a redução na demanda de água pode ser menor, devido à concentração muito mais elevada das partículas mais finas de EGAF (Siddique, 2012; Oner, 2007). Este comportamento é devido à superfície das partículas de EGAF serem mais macias e de maior cristalinidade do que as do cimento Portland, o que resulta em uma menor absorção de água na superfície das partículas de EGAF.

Entre as vantagens que o emprego de escória granulada moída no concreto fresco e endurecido pode oferecer, destacam-se: redução do calor de hidratação, o refinamento da estrutura de poros, redução da permeabilidade de agentes externos, o aumento da resistência ao ataque químico, resistência ao ataque por sulfatos, melhor trabalhabilidade da mistura, e em alguns casos, pode melhorar a resistência à corrosão da armadura, lembrando aqui que isto dependerá da composição química da escória. O concreto com escória pode alcançar uma maior resistência à compressão para determinados níveis de substituição do cimento Portland. Além disso, tem-se uma economia de cimento Portland comum na mistura de concreto (Shetty, 2013).

A incorporação de escória de alto forno na mistura de cimento modifica a natureza e as características dos hidratados formados, afetando a rede capilar do concreto, reduzindo o tamanho e o número de poros. Este efeito da escória se reflete no concreto no estado endurecido e em sua durabilidade. No entanto, os efeitos benéficos da escória nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto irão depender de diversos fatores, entre os quais pode ser aqui destacado a qualidade da escória, o estudo apropriado do traço, o lançamento e transporte do concreto no estado fresco e o cuidado no período e tipo de cura.

Uma outra característica significativa da escória é o processo de hidratação, que é mais lento do que o do clínquer, porque a sua dissolução é mais difícil devido ao seu caráter vítreo e também pela necessidade de uma fonte de ativação sulfática (gesso, anidrita) ou alcalina (pela presença de um álcali ou portlandita). A ativação da escória é gerada pela presença de portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberada da hidratação do clínquer, pelos álcalis presentes na escória e pela ação de controle de pega (gesso e/ou anidrita).

Diante disso, podemos citar outras características dos cimentos de escória granulada de alto-forno, relacionadas com o seu processo de hidratação.

- Não há liberação de portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e pode se pensar em um consumo da quantidade liberada pelo clínquer.
- Não há formação de aluminato tricálcico (C_3A).
- Os álcalis (K_2O e Na_2O), que participam como catalisadores na hidratação das escórias são aprisionados na rede cristalina e não no estado livre.

Por outro lado, como um benefício ambiental, a escória granulada moída é também considerada um material sustentável (Gjørsv, 2000), por ser um subproduto de resíduos industriais e seu uso no concreto é reconhecido pelo LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) (Council U.S.G.B. 2014; Slag Cement Association). Diante disso, a escória pode ser usada em concreto para superestruturas, e com uma avaliação adequada, também é empregada em concreto armado

expostos em ambientes com cloretos e sulfatos, com a desvantagem de sua característica de pega lenta, o que implica num maior tempo de execução em determinado projeto.

Pelo fato da escória adicionada na mistura de concreto tem menor reatividade nos primeiros dias, há uma diminuição considerável da resistência à compressão nas primeiras idades em comparação com misturas de concreto com CP. No entanto, em idades posteriores, foi detectado o contrário, isto é, alcançando em vários casos resistências mais elevadas do que aquelas de um concreto convencional (Oner, 2007; Berndt, 2009).

3. ESCÓRIA DE ALTO-FORNO COMO MATERIAL CIMENTÍCIO NA NORMALIZAÇÃO

A EAF pode ser empregada para a mesma finalidade que o cimento Portland, já que sua pega e endurecimento se dá pela reação química com a água, de modo que é considerada como um cimento hidráulico latente, tendo os mesmos compostos. No entanto, em alguns casos, é necessário que a escória também seja misturada com cal hidratada para ganhar funcionalidade (Gambhir, 2009; Lea, 1971).

As especificações para os cimentos com escória se encontram na norma ASTM C595 (ASTM-C595, 200) os quais são classificados nos tipos IS e S (cimento Portland com escória de alto forno e cimento de escória ou siderúrgico), respectivamente.

O cimento tipo IS é composto basicamente por escória granulada de alto forno (EGAF), que pode ser moída juntamente com o clínquer do cimento Portland ou moída separadamente para ser incorporada posteriormente à mistura de cimento. A quantidade de EAF neste tipo de cimento está entre 25% e 70% da massa de cimento. Considera-se que o teor de escória de 70% da massa de cimento traz certo benefício à resistência e durabilidade, mas até certo ponto e de acordo com o ambiente onde o concreto está exposto. Por outro lado, caso se pretenda utilizar doses mais elevadas do que a anterior, devem ser realizados ensaios no concreto para a verificação da resistência, durabilidade e outras especificações exigidas para o projeto.

A Tabela 1 mostra as quantidades de escória no cimento consideradas nas normas de diferentes países. De acordo com as normas apresentadas na Tabela 1, a norma europeia (UNE-EN-197, 2013) considera um nível de escória na mistura de cimento de 95%, sendo o nível mais elevado em comparação com outros países mostrados na tabela 1. Enquanto que para os países americanos, a Colômbia é que tem considerado em sua norma até 85% de escória e o México, com 80%. Por outro lado, é essencial que a utilização de níveis elevados de escória deve ser sujeito ao controle de verificação do concreto, devido à sua compatibilidade com outras adições na mistura, ou pelos agregados e as condições ambientais.

O emprego de outros materiais cimentícios, diferentes dos tradicionais, implicarão certos efeitos e alterações no concreto no estado fresco e endurecido. Para a mistura do concreto, é necessária certa quantidade de água para possibilitar a reação de hidratação. A escória tem entre as suas características a capacidade de diminuir a quantidade de água de amassamento de 1% a 10%, dependendo da quantidade de substituição. Além disso, pode-se ter maior quantidade de exsudação sem que isso tenha efeitos adversos sobre o concreto, mas também tende a reduzir o calor de hidratação em comparação com cimento Portland. No entanto, o uso combinado de escória de alto forno moída e cinza volante pode reduzir o tempo de pega (Lee, 2013).

Para o concreto endurecido, o emprego de escória pode contribuir para melhorar a resistência à compressão. Mas também se corre o risco de que a resistência do concreto sofra um decréscimo com a adição quando nenhum método de cura apropriado é empregado e o respectivo cuidado para o sistema cimentício empregado. Assim, temos que o desenvolvimento da resistência no concreto

com EGAF pode ser semelhante ao concreto normal se for curado à temperatura de 23°C aproximadamente.

Tabela 1. Quantidade de escória nos cimentos de acordo com as normas de diferentes países.

Pais e norma	Tipo de cimento	Quantidade de escória
Comité Europeo de Normalización UNE-EN 197-1, 2013.	Cimento portland com adição de escória Cimento portland com escória de alto forno	6 a 35% 36 a 95%
Argentina IRAM 50000, 2000; IRAM 50001, 2000.	CP normal CP con escoria Cimento portland composto Cimento de alto forno	Máximo 10% de EAF 11% – 35% de EAF 35% EAF 35-75%
Chile NCH148	Cimento portland siderúrgico Cimento siderúrgico	Máximo 30% EAF 30% - 70%
Colombia NTC 30	Cimento siderúrgico Cimento Portland de EAF	>70 de EAF 15 – 85 EGAF
México NMX-C414-ONNCCE	CPC Cimento portland com escória de alto forno Cimento portland composto Cimento com escória de alto forno	5 6 – 60 6 – 35 61 – 80
Estados Unidos (ASTM C595, 2000; AASHTO M240)	Cimento portland de alto forno Cimento com escória de alto forno ou siderúrgico Cimento portland modificado com escória	25 – 70 de EGAF Mínimo 70% EGAF < 25%
Canadá CSA A362, CSA A23.5 CAN/CSA-A3001-03	Cimento portland com escória de alto forno Cimento portland modificado com escória	25 a 40% de escória 25 – 70%
Austrália AS/NZS 2350.1; AS 3582.2; AS 3972,	Cimento binário misturado com escória Cimento ternário com escória e outro material cimentício suplementar	30 – 70% 30% - 50%

4. RESULTADOS DO EFEITO DA EAF NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para esta seção foi realizada uma recompilação de dados de pesquisa relatadas na literatura, tendo atenção aos níveis de substituição do cimento portland por escória de alto forno e os efeitos causados sobre a resistência à compressão real (f_c) de concreto endurecido nas idades de 28 e 90 dias. Nota-se que as misturas de material cimentício que foram estudadas são compostas pelo sistema: cimento portland e escória.

Regularmente a quantidade de água usada para preparar a mistura de concreto é especificada implicitamente na relação água/cimento (a/c), mas para os sistemas cimentícios a quantidade de água está especificada pela relação água/material cimentício expressa por a/mc. No entanto, há casos particulares em que não se usa unicamente água para preparar a mistura, mas requer alguma solução ativadora de qualquer subproduto, então o termo usado é s/mc, que representa a solução aquosa com o agente químico (solução alcalina) e material cimentício.

As técnicas de cura do concreto após 24h do fim da pega podem ser muito variadas, entre elas estão: cura úmida ou em imersão de água; cura à temperatura ambiente; cura com temperatura (T) e umidade relativa controlada (RH). O período de cura dependerá do sistema de cimento utilizado para a mistura do concreto com quantidades de escória como substituição do cimento.

Na Tabela 2 são apresentados alguns resultados relatados na literatura sobre a resistência à compressão real f_c do concreto nas idades de 28 e 90 dias, contendo substituições de cimento portland comum tipo I pelo subproduto de EAF. Na tabela são mencionados o nível de substituição, a relação a/mc e resistência à compressão aos 28 e 90 dias.

Como se pode observar na Tabela 2, a quantidade de substituição de cimento por escória tem um máximo de 80% para a pesquisa publicada em 2007 (ATIS, 2007), sendo esta quantidade dentro da faixa relatada nas normas de diferentes países, como México e Colômbia. Também se pode mencionar que têm sido investigados concretos com diferentes relações a/mc, compreendidas no intervalo entre 0,28-0,55, mencionando também que em baixas relações a/mc se faz indispensável a utilização de aditivo redutor de água ou superplastificante para conferir as propriedades adequadas do concreto no estado fresco.

De acordo com a Tabela 2, existe um amplo gama de possibilidades para empregar a EAF como substituição parcial do cimento para elaborar misturas de concreto, mas em alguns casos, o resultado não tem um efeito positivo no que diz respeito à resistência mecânica. Por isso, é importante fornecer determinados detalhes sobre a resistência à compressão do concreto em função da quantidade de escória utilizada no sistema cimentício CPC + EAF.

Tabela 2. Resistências à compressão (f_c) do concreto com sistema cimentícios CPC tipo I + EAF com diferentes níveis de substituição segundo diversos autores.

Autores	Substituição com sub produto (%)	a/mc	f_c (MPa) 28 dias	f_c (MPa) 90 dias	Autores	Substituição com sub produto (%)	a/mc	f_c (MPa) 28 dias	f_c (MPa) 90 dias
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					

Tabela 2. Continuação.

Autores	Substituição com sub produto (%)	a/mc	f_c (MPa) 28 dias	f_c (MPa) 90 dias	Autores	Substituição com sub produto (%)	a/mc	f_c (MPa) 28 dias	f_c (MPa) 90 dias
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						

Tabela 2. Continuação.

Autores	Substituição com sub produto (%)	a/mc	f_c (MPa) 28 dias	f_c (MPa) 90 dias	Autores	Substituição com sub produto (%)	a/mc	f_c (MPa) 28 dias	f_c (MPa) 90 dias
Johari, 2011	0	0.28	87	96	Hadjasadok, 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	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						

Nas Figuras 2 e 3 estão apresentados graficamente os dados mostrados na Tabela 2, correspondentes à resistência à compressão real do concreto na idade de 28 dias (Figura 2) e 90 dias (Figura 3), dependendo do nível de substituição de cimento. Também nas Figuras 2 e 3 estão apresentadas as linhas de correlação média com a classificação em intervalos da relação a/mc; os valores menores que 0,4, o intervalo entre 0,4 e 0,6, e valores superiores a 0,6.

Pode ser visto na Figura 2, que há uma ligeira tendência generalizada para a diminuição da resistência quando se aumenta a quantidade de escória na mistura cimentícia, embora possa se observar que existe um intervalo em que a resistência pode ser melhorada. O nível de substituição que tem sido utilizado nos diversos estudos atinge um valor de 80%, mas pode ser visto que no intervalo de 20% a 60% estão os valores ligeiramente mais altos de f_c em relação ao concreto de referência, ou seja, sem escória. Um comportamento similar ao da resistência aos 28 dias também pode ser observado na resistência aos 90 dias mostrada na Figura 3. Neste gráfico pode ser observado que para um período de tempo maior (maior idade do concreto), a resistência f_c dos concretos com substituições no intervalo de 20% a 60% tende a aumentar com a idade.

Para ambas as idades dos concretos (figuras 2 e 3) se observa que os níveis de substituição de cimento superiores a 60% de escória, a resistência do concreto é menor do que o concreto sem substituição.

Para determinar o efeito gerado na resistência f_c do concreto para as idades de 28 e 90 dias, foi determinado um parâmetro chamado de taxa de troca, que é um valor unidimensional obtido a partir da relação entre a resistência f_c do concreto com escória e a f_c do concreto de referência. Nos gráficos da Figura 3, é apresentada a taxa de troca (eficiência) da resistência f_c do concreto com escória em relação ao concreto de referência e de acordo com os diferentes níveis de substituição. A linha horizontal marca a taxa de f_c para o concreto de referência. Um valor abaixo desta linha indica que o concreto com escória não atingiu o valor de resistência de seu homólogo sem escória, enquanto os valores acima da linha horizontal significam que o concreto superou ou melhorou a resistência do concreto sem escória.

De modo semelhante ao que foi descrito nas figuras 2 e 3, se pode observar na Figura 4 que há uma tendência conhecida e esperada do decréscimo da resistência f_c do concreto com o aumento

do nível de substituição de cimento por escória no sistema cimentício sendo consistente com o descrito na literatura (Abdelkader, 2010).

Novamente, o intervalo em que se observa um melhor efeito sobre a resistência situa-se entre os níveis de 20% e 60%, onde se alcançam valores semelhantes ou ligeiramente mais elevados de f_c em relação ao concreto de referência, este efeito é mais pronunciado no gráfico da Figura 5 para concreto com 90 dias de idade. Também é mostrado no gráfico da Figura 4, que substituições superiores a 60% apresentam uma diminuição no melhoramento da resistência f_c . Da mesma forma, este efeito também é observado com a idade de 90 dias, o que é consistente com o observado nas Figuras 2 e 3.

De acordo com os resultados relatados por Ahmend Hadjasadok et al. (Hadjasadok, 2012) se observa que, para a mesma relação a/mc a resistência f_c é reduzida quando se aumenta o nível de substituição de CPC, mas para a mesma quantidade de escória, a resistência f_c é aumentada ao se reduzir a relação a/mc

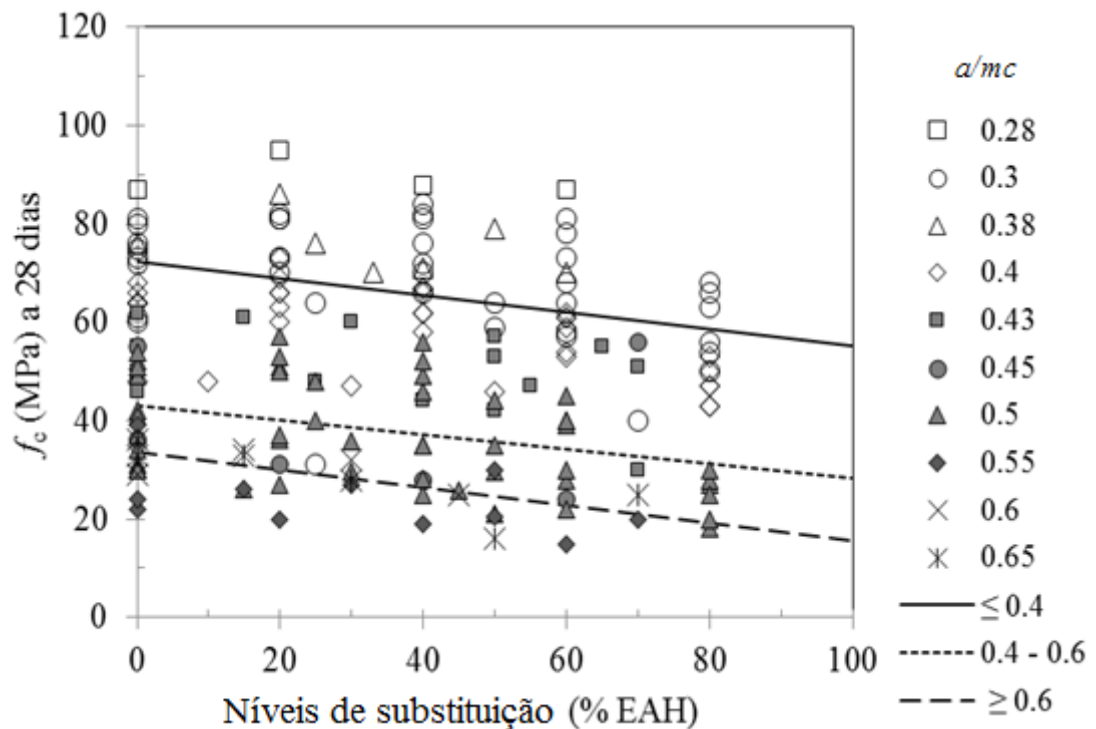


Figura 2. Dados reportados na literatura (tabela 2) de resistência à compressão real (f_c) dos concretos com escória e ensaiados aos 28 dias.

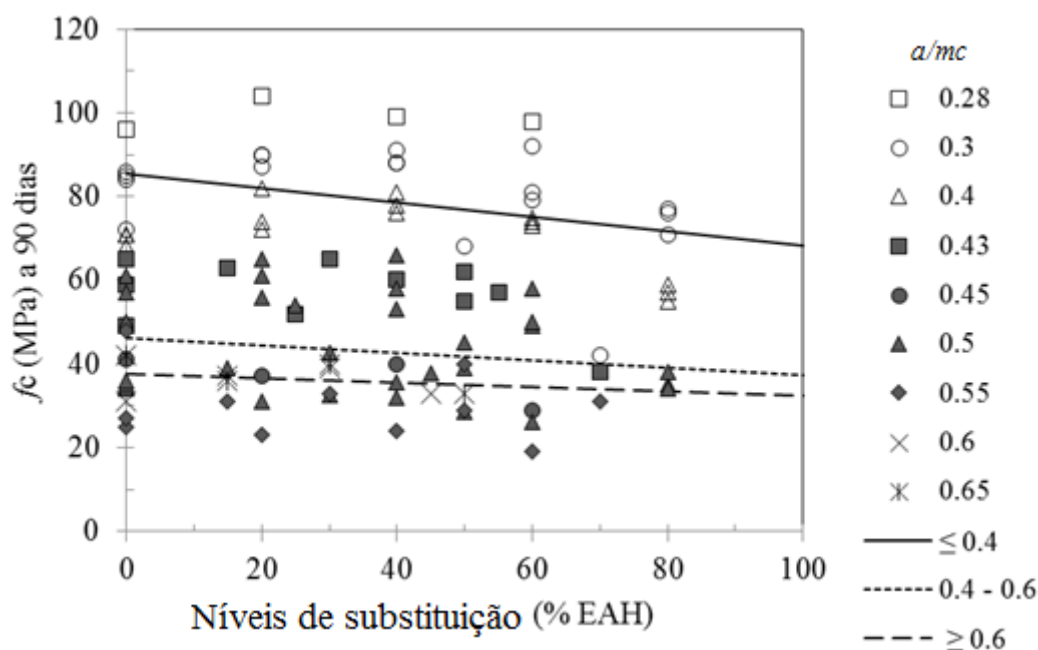


Figura 3. Dados relatados na literatura (Tabela 2) de resistência à compressão real (f_c) dos concretos com escória e ensaiados aos 90 dias.

Além disso, na Figura 5, pode ser visto que na idade de 90 dias concreto adquire maior resistência em comparação com a idade de 28 dias (Figura 4). Esta observação também foi feita no trabalho de Ilker Bekir Topcu e Raif Boga (Topç, 2010), que também concluem que com substituições de 25% de EGAF no sistema cimentício, resulta numa maior resistência à compressão do concreto curado sob a água e durante 28 dias, bem como aos 90 dias. Também deve ser mencionado que o concreto com 90 dias de idade atingiu 10,5% a mais de resistência do que aos 28 dias. No entanto, para uma substituição de 50% a resistência diminui em tempos de cura semelhantes, este efeito com nível de substituição semelhante foi observado por Bougara (Abdelkader, 2010). Por sua vez, Chidiac e Panesar (Chidiac, 2008), concluem que a resistência f_c do concreto com escória é reduzida com o aumento do nível de substituição de cimento.

O comportamento observado no atraso do melhoramento da resistência mecânica do concreto com escória infere-se que porque o subproduto cimentício siderúrgico tem um processo de ativação mais lento que o do cimento convencional.

Estas características também foram mencionados em outros estudos realizados em pastas (Sanchez, 2011), outros em argamassa (Hwang, 1991) e também em concreto (Lee, 2013), com um resultado semelhante na diminuição da resistência à idade precoce, em consequência do tempo de atraso de hidratação do material cimentício suplementar. Este comportamento gera uma diminuição da velocidade de precipitação do produto de reação mais estável, o que contribui para a resistência mecânica.

Devido à resistência estar relacionada com as fases formadas nas pastas, observa-se um dos resultados da pesquisa realizada pelo Chao-Lung Hwang e Der-Hsien Shen (Hwang, 1991) nas pastas com sistemas de CPC - EAF com substituições de 10% a 40% e três relações água/materiais cimentícios, 0,35, 0,47 e 0,59, concluindo que para uma dada razão a/mc , um elevado teor de EAF vai exigir mais tempo de cura da pasta.

No entanto, de acordo com pesquisa realizada por Martinez Aguilar et al, (Aguilar, 2010) a f_c nas pastas com EAF poderia ser melhorada com a ativação da escória por um tipo de sulfato alcalino (Na_2SO_4 ou K_2SO_4 misturado com Al_2SO_4) ou por alguma fonte como o fluorgesso (Fy , CaSO_4), que também é outro subproduto industrial, e também mencionar que a f_c aos 90 dias, em alguns

casos, foi inferior a 28 dias. Os autores referem este efeito com a formação de fases pouco estáveis (etringita e gesso) na estrutura interna da pasta de cimento e, por conseguinte, resulta em instabilidade (expansão) em idades posteriores.

De acordo com o descrito acima se pode dizer que, para um teor de escória constante, o tempo de pega irá alterar proporcionalmente com a relação a/mc . Isto conduzirá à obtenção de um melhor resultado da resistência à compressão em idades posteriores do que para um concreto convencional, pois se teria uma maior taxa de hidratação dos produtos químicos do material ligante.

Para se observar o efeito causado pela escória no concreto endurecido com o passar do tempo, foi determinada a frequência da mudança na resistência do concreto de acordo com três faixas de taxa de troca: os concretos com EAF que apresentaram uma alteração <1 com relação ao concreto de referência; aqueles sem qualquer alteração ou taxa de variação, que foram considerados iguais a 1; e aqueles que tiveram alterações > 1 , para ambas as idades de concreto. Isto é mostrado na Figura 6, através de um gráfico de uma amostra representativa dos dados de resistência de concreto com escória analisados neste trabalho e que geraram taxas de troca de f_c menores, iguais e maior do que 1. A figura 6 mostra claramente que para a taxa de troca <1 há uma diminuição na frequência da taxa de troca para o concreto com EAF passando de 28 para 90 dias de idade, enquanto para a taxa de troca > 1 , há um aumento da frequência. Isto significa que o impacto sobre a taxa de troca com os valores <1 para concretos com EAF aos 28 dias é maior do que para o concreto de referência. Enquanto os valores da taxa de troca > 1 , que representam os concretos com EAF e superam a resistência do concreto de referência, têm o maior impacto sobre a taxa de troca os concretos com 90 dias de idade. Isto está relacionado com exposto anteriormente, enquanto a escória tem um processo de hidratação mais lento do que o CPC, o que requer um tempo mais longo para alcançar a hidratação ótima e, portanto, desenvolver compostos e fases quimicamente mais estáveis, que resultam em melhoria da resistência à compressão do concreto. Isto posto, acredita-se que estas características de hidratação são um fator condicionante para o desenvolvimento da resistência e que interfere na diminuição da resistência, além do tipo de atividade da escória e cura aplicada no concreto.

Como mencionado acima, para o sistema cimentício CPC + escória aplicado ao concreto endurecido, o mesmo pode produzir um efeito sobre a resistência que supera a estabelecida em projeto na idade de 28 dias de cura, como relatado na literatura (Topç, 2010; Yeau, 2005). Antes dessa idade, o concreto com EGAF apresentaram f_c mais baixas em comparação com o concreto de referência, mas que pode ser superada em idades posteriores, sendo este mesmo comportamento para todos os níveis de substituição. Este resultado é devido às reações químicas secundárias e da reação hidráulica lenta da escória, que contribui para densificar a microestrutura do concreto. Os resultados apresentados por Chidiac e Panesar (Chidiac, 2008) confirmam esta premissa, e ainda que a taxa de hidratação inicial é mais lenta em concretos com EGAF do que com CPC. Assim, no decorrer do tempo, de 7 a 28 dias, o concreto com EGAF (60%) começa a ganhar resistência, conseguindo exceder o concreto com CPC.

Tendo em conta estes resultados, podemos dizer agora que as possibilidades de utilização de um subproduto serão determinadas pelas necessidades específicas de qualidade do concreto, ou seja, as propriedades de resistência mecânica e durabilidade. Deve se notar aqui que a resistência à compressão não é um parâmetro absoluto para a escolha de um determinado concreto em determinada construção. Então, com o exposto anteriormente é possível prever que com o aumento da dosagem de EAF no sistema cimentício podem ser obtidas resistências à compressão do concreto semelhantes a um concreto com CP convencional, mas com a ressalva de que será em idades posteriores, como um concreto normal.

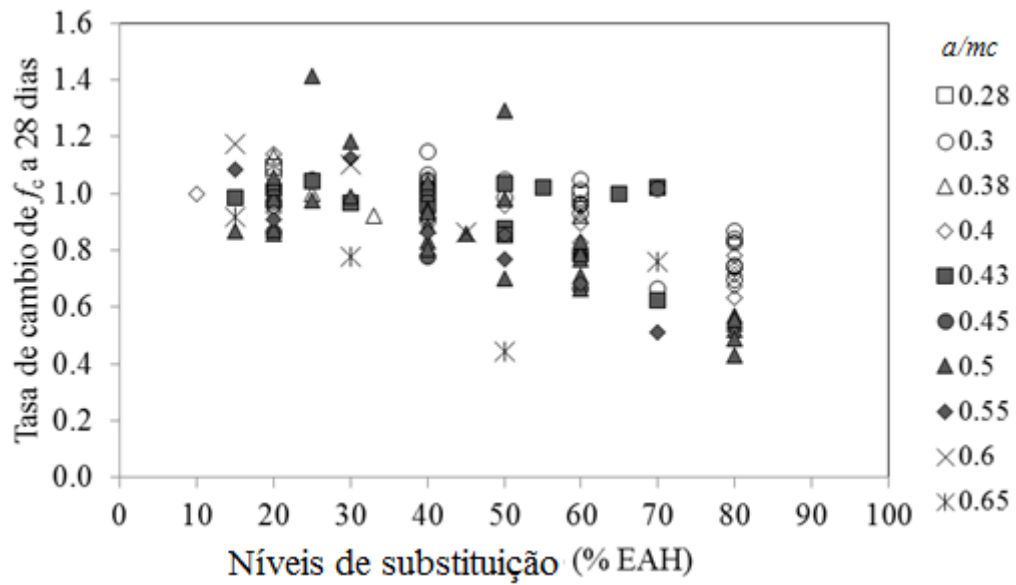


Figura 4. Taxa de troca (eficiência) da resistência à compressão real f_c dos concretos com escória, aos 28 dias.

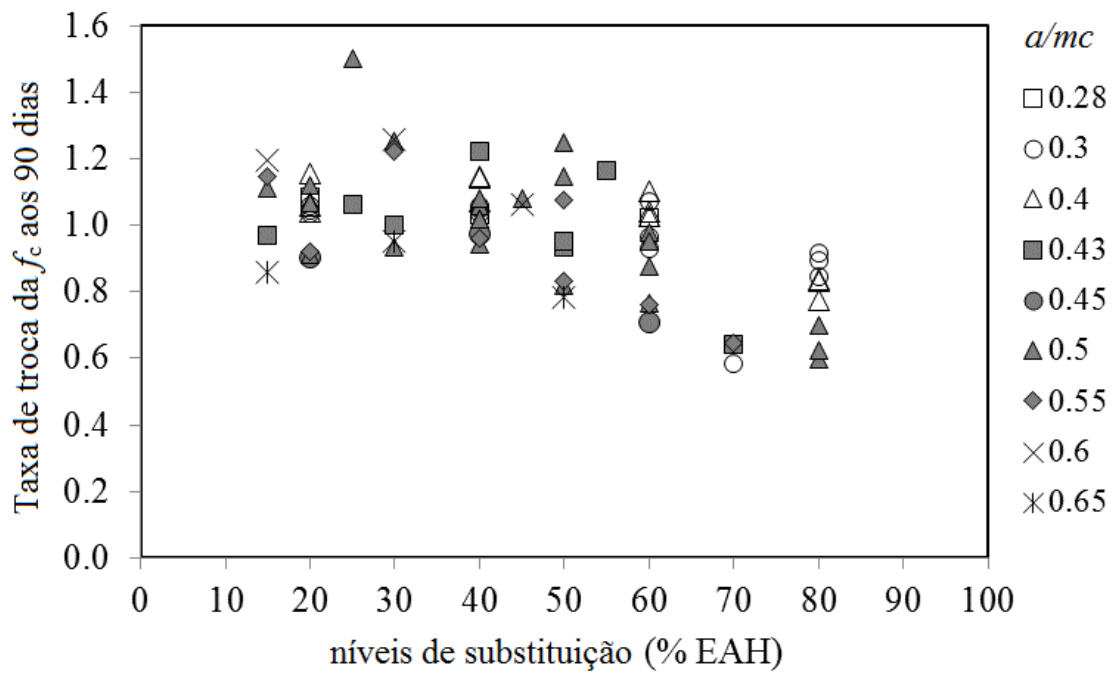


Figura 5. Taxa de troca (eficiência) da resistência à compressão real f_c dos concretos com escória, aos 90 dias.

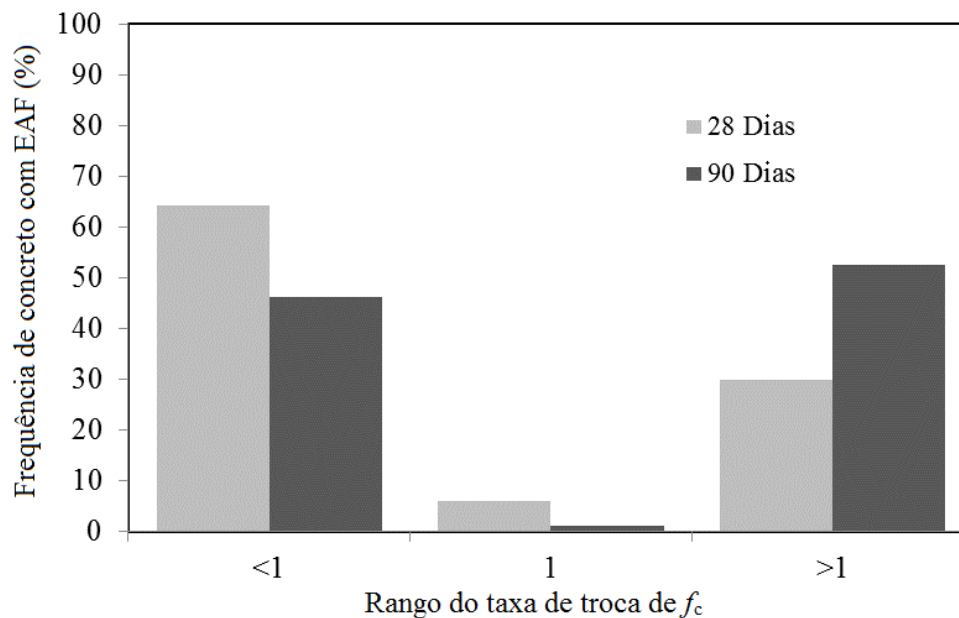


Figura 6. Frequência do número de amostras de concreto com EAF relacionadas com a taxa de troca (eficiência) de f_c com relação ao concreto de referência.

Foi observado anteriormente que a incorporação e aumentando do nível de escória na mistura de concreto pode ter um carácter benéfico nas propriedades mecânicas do concreto endurecido, mas sujeita a um certo grau de substituição e de uma certa idade. Em contrapartida, pode-se dizer que o concreto feito com uma elevada percentagem de escória é muito sensível às condições de cura, gerando uma secagem prematura na superfície do concreto, que conduzir a um aumento da permeabilidade, além de que a hidratação do material cimentício é reduzida gerando uma diminuição nas propriedades mecânicas de resistência do concreto endurecido.

Da mesma forma como para um concreto convencional, a cura durante as primeiras horas após o endurecimento do concreto com um sistema cimentício de CPC + EAF é extremamente essencial, pois esta prática influencia no desenvolvimento da resistência à compressão, reduzindo a porosidade e elevada resistência à penetração de cloretos. Sob esta premissa Ramezianpour e Malhotra (Ramezianpour, 1995), fornecem os resultados de seu estudo com concreto com níveis de substituição apresentados na Tabela 2 e com cura úmida padrão contínua, corroborando que os concretos que não receberam cura mostraram pobres desempenhos no desenvolvimento da resistência mecânica, assim como uma maior porosidade e uma fraca resistência à penetração de íons cloreto. Deve-se notar que, mesmo que os concretos foram curados durante 2 dias, foi observada uma melhoria significativa em sua resistência em comparação com a resistência do concreto sem tratamento de cura. Por conseguinte, a importância da cura do concreto é confirmada pelo sistema cimentício CPC + EAF, porque, como dito, a reação de hidratação da escória é mais lenta do que a do cimento.

Um fator importante na previsão da resistência do concreto com escória através do modelo de Feret (Feret, 1982) é o coeficiente de eficiência da escória. No momento da hidratação da mistura cimentícia, a escória tende a melhorar o seu coeficiente até alcançar um valor ótimo em relação ao cimento Portland, mas posteriormente também foi visto que pode diminuir (Abdelkader, 2010). Portanto, a eficiência depende do nível de substituição, uma vez que foi observado que, com 15% de escória, a ativação é completa e é 67% mais eficiente do que um cimento comum. Enquanto que para níveis elevados de substituição (50%) a eficiência da escória diminui ou, no melhor dos casos alcança a do cimento (Abdelkader, 2010).

Em estudos realizados em elementos estruturais com misturas cimentícias de 30%, 50% e 70% de escória, tem se alcançado bons resultados na resistência à compressão f_c real e expostas numa atmosfera de agressividade leve e os resultados são mostrados na Tabela 2, na pesquisa de Osborne (Osborne, 1999). Por outro lado, o autor observa que a velocidade de carbonatação e a permeabilidade das amostras gasosas são semelhantes a um concreto com um cimento comum, no entanto é considerado altamente suscetível o concreto com alto nível de escória e exposto ao ar livre, sendo extremamente agressivo em lugares com um ambiente seco. No entanto, aponta que dar atenção para o cobrimento da armadura, e restringir as quantidades de escória para situações ambientais de risco excessivo de carbonatação pode diminuir este efeito, sendo assim, o nível de substituição de escória deve ser limitado a 50%. Para ambientes consideravelmente úmidos e na presença de cloretos pode ser utilizado um nível de 70% (Osborne, 1999).

Face ao exposto, pode-se dizer que uma devida cura do concreto com escória de alto-forno deve ser considerada um fator essencial para a hidratação e, assim pode garantir um bom desempenho em termos de durabilidade e resistência mecânica.

Portanto, pode-se dizer que o uso e nível de substituição de escória de alto forno nos sistemas cimentícios para concreto, serão definidos de acordo com as características de projeto da mistura de concreto, tanto no estado fresco como no endurecido, e do meio onde os elementos estruturais serão expostos.

5. CONCLUSÕES

Depois de revisar o estado da arte sobre a f_c em concretos com escória de alto forno pode se confirmar, através da experiência de vários autores que avaliaram diversas condições e tipos de escória, que o nível de substituição pode ser significativamente alto, mas ao se superar os 50% será necessário um esquema rigoroso de controle de qualidade na preparação e na combinação de outros aditivos que contribuam para melhorar a resistência mecânica, já que o contrário serão provocados efeitos adversos aos desejados.

O nível de substituição máximo recomendado por vários autores e de acordo com os resultados obtidos é de 70% para a escória em ambientes de baixa agressividade de carbonatação, caso contrário, deve ser limitado a 50%.

O concreto que recebe substituição parcial de cimento por EAF demandará um tempo maior de hidratação para garantir a f_c desejada, sendo de crucial importância a cura do concreto.

6. AGRADECIMENTOS

Ao CINVESTAV unidade Mérida e ao CONACYT pelo apoio no financiamento do estudo de doutorado de J. A. Cabrera-Madrid

7. REFERÊNCIAS

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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., Mehta, P. K. (1996), “Pozzolan 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., Shammass, N. K. (2010), *Handbook of Advanced Industrial and Hazardous Wastes Treatment*, (E. U.: CRC Press Taylor & Francis Group): p. 170.
- Yeau, K. Y., 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.