



## Resistência à compressão de concreto com escória de alto forno. Revisão do estado da arte

J. A. Cabrera-Madrid<sup>1</sup>, J. I. Escalante-García<sup>2</sup>, P. Castro-Borges<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> 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](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.nda.cinvestav.mx/alconpat/revista](http://www.nda.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 compression resistance 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 compression resistance, 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](mailto: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 ( $\text{CO}_2$ ). Estima-se que as emissões de  $\text{CO}_2$  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 m<sup>2</sup> / 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.

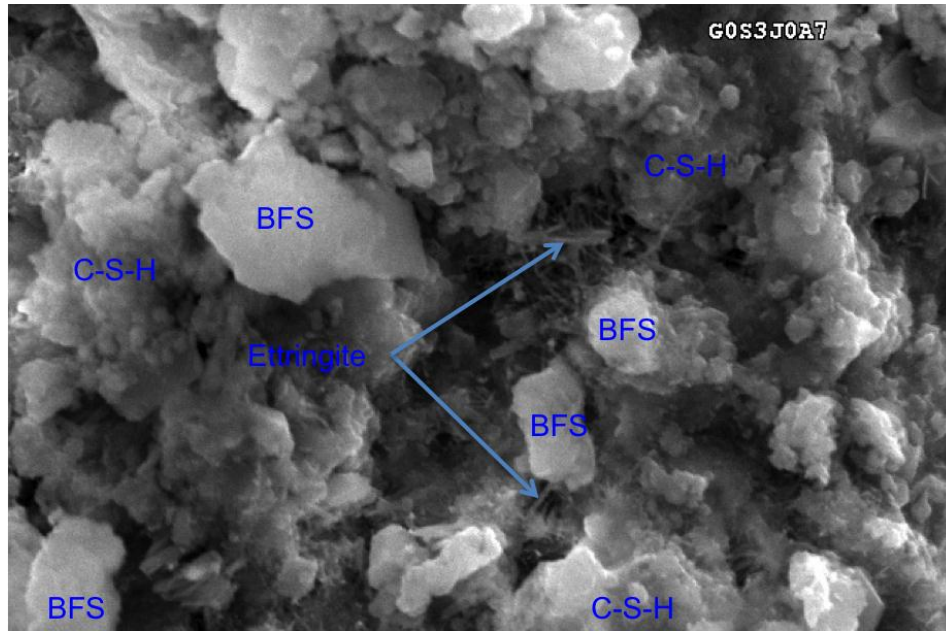


Figura 1. Microfotografías de MEB de pastas hidratadas após 7 dias, pasta com 30% de escória de alto-forno e 70% de cimento Portland comum (BFS escória de alto forno, C-S-H silicato de cálcio hidratado) (Li, 2011).

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%), SiO<sub>2</sub> (30-48%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15-25%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (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  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ , 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 ( $\text{C}_3\text{A}$ ).
- Os álcalis ( $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ ), 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.

<b>Pais e norma</b>	<b>Tipo de cimento</b>	<b>Quantidade de escória</b>
<b>Comité Europeo de Normalización UNE-EN 197-1, 2013.</b>	Cimento portland com adição de escória Cimento portland com escória de alto forno	6 a 35% 36 a 95% %
<b>Argentina IRAM 50000, 2000; IRAM 50001, 2000.</b>	CP normal CP con escoria Cimento portland composto Cimento de alto forno	Máximo 10% de EAF 11% – 35% de EAF 35% EAF 35-75%
<b>Chile NCH148</b>	Cimento portland siderúrgico Cimento siderúrgico	Máximo 30% EAF 30% - 70%
<b>Colombia NTC 30</b>	Cimento siderúrgico Cimento Portland de EAF	>70 de EAF 15 – 85 EGAF
<b>México NMX-C414-ONNCCE</b>	CPC Cimento portland com escória de alto forno Cimento portland composto Cimento com escória de alto forno	5 6 – 60 6 – 35 61 – 80
<b>Estados Unidos (ASTM C595, 2000; AASHTO M240)</b>	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%
<b>Canadá CSA A362, CSA A23.5 CAN/CSA-A3001-03</b>	Cimento portland com escória de alto forno Cimento portland modificado com escória	25 a 40% de escória 25 – 70%
<b>Austrália AS/NZS 2350.1; AS 3582.2; AS 3972,</b>	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	Hadjasad ok, 2012.	0	0.65	36	42
	20	0.28	95	104		15	0.65	33	36
	40	0.28	88	99		30	0.65	28	40
	60	0.28	87	98		50	0.65	16	33
Lübeck, 2012	0	0.30	60	72		0	0.42	62	65
	50	0.30	59	68		15	0.42	61	63
	70	0.30	40	42		30	0.42	60	65
	0	0.42	48	59		50	0.42	53	62
	50	0.42	42	55		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  $a/mc$

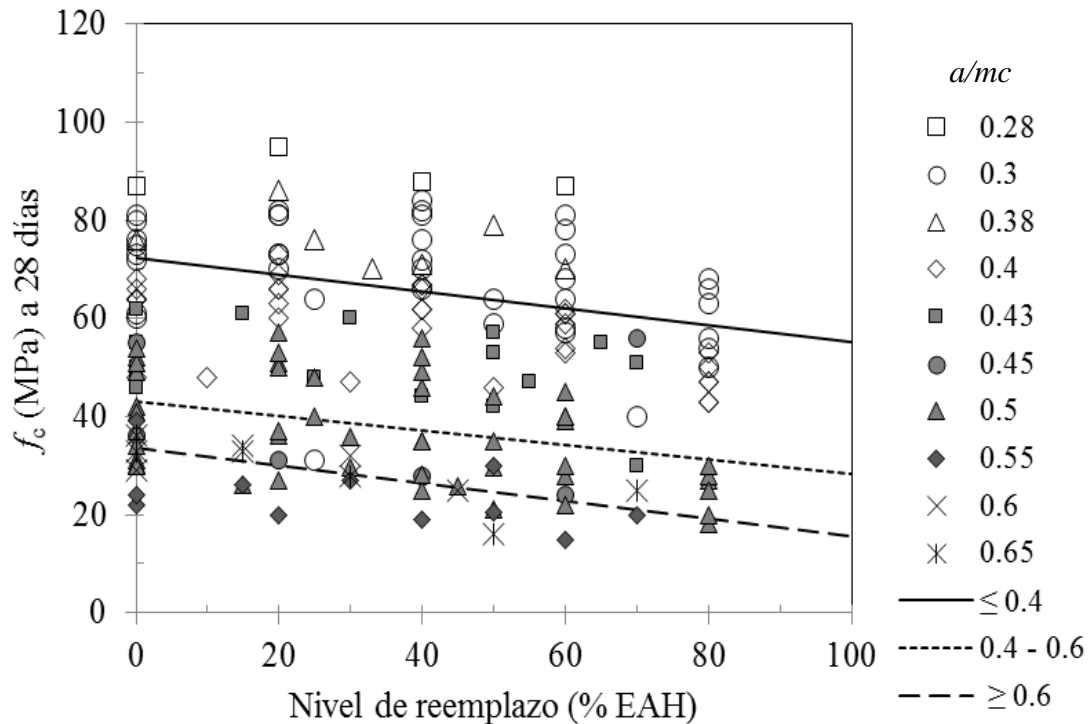


Figura 2. Dados reportados na literatura (tabela 2) de resistência à compressão real ( $f_c$ ) dos concretos com escória e ensaiados aos 28 dias.

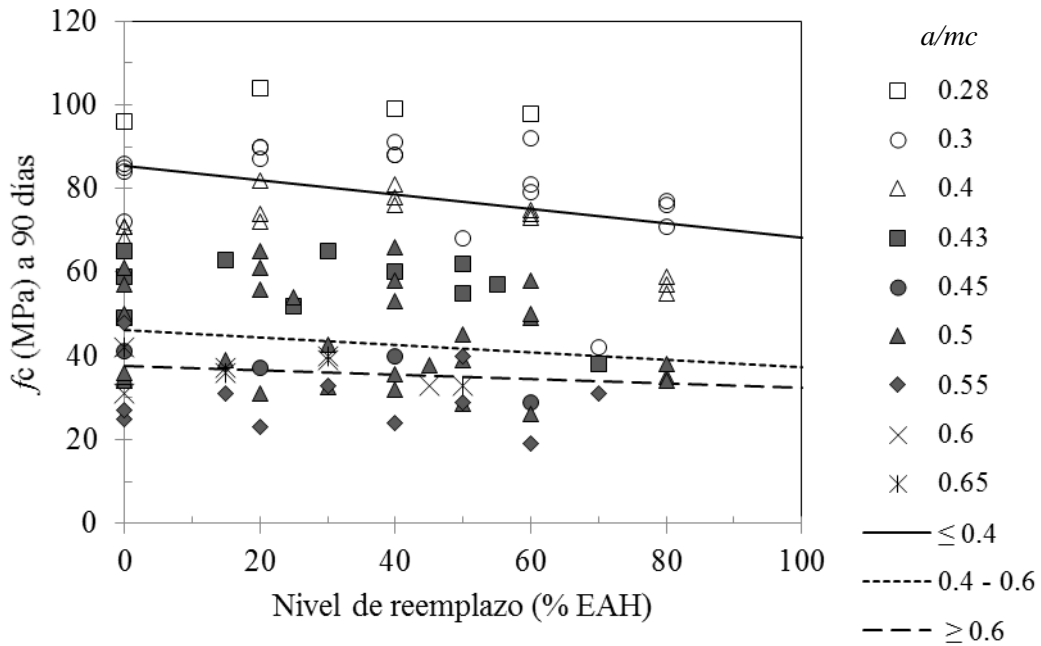


Figura 3. Dados relatados na literatura (Tabela 2) de resistência à compressão real ( $f_c$ ) dos concretos com escória e ensaiados aos 90 dias.

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.

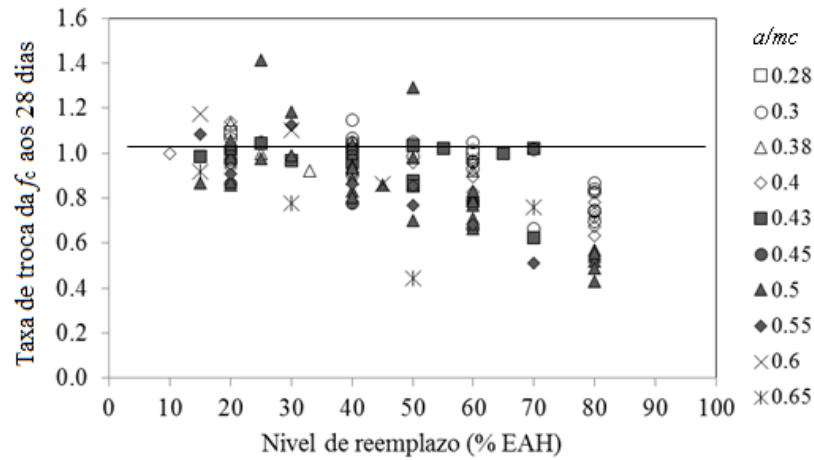


Figura 4. Taxa de troca (eficiência) da resistência à compressão real  $f_c$  dos concretos com escória, aos 28 dias.

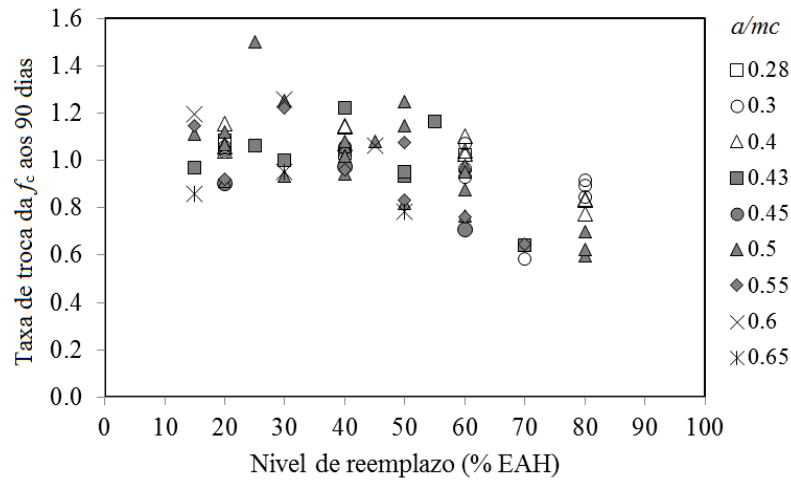


Figura 5. Taxa de troca (eficiência) da resistência à compressão real  $f_c$  dos concretos com escória, aos 90 dias.

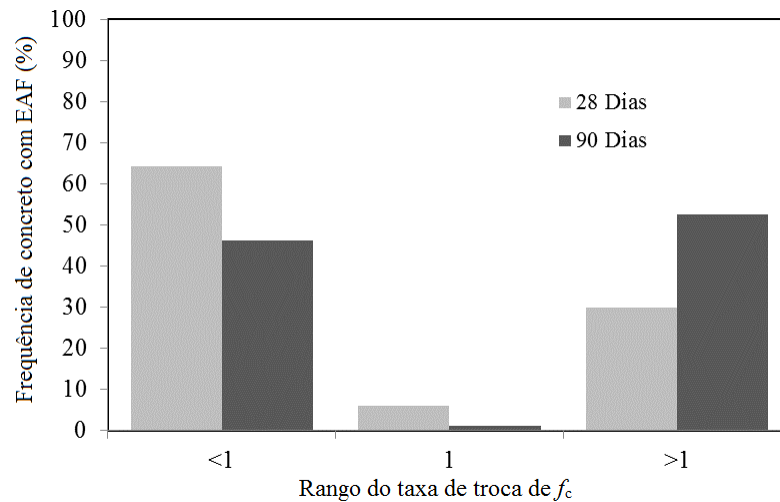


Figura 6. Frequência do número de amostras de concreto com EAF relacionadas com a taxa de troca (eficiência) de  $f_c$  com relação ao concreto de referência.

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 Ramezaniapour e Malhotra (Ramezaniapour, 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., and Karim, E. (2010), “*Efficiency of granulated blast furnace slag replacement of cement according to the equivalent binder concept*”, *Cement and Concrete Composites*, 32: pp. 226-231.
- Aguilar, O. A. M., Castro-Borges, P., and Escalante-García, J. I. (2010), “*Hydraulic binders of Fluorgypsum–Portland cement and blast furnace slag, stability and mechanical properties*”, *Construction and Building Materials*, 24: pp. 631-639.
- Amrane, A. and Kenai, S. (1994). “*Propriétés mécaniques et durabilité du béton au laitier en climat chaud*”, in *Proceedings of the international seminar on the quality of concrete in hot climate*. (Ghardaia, Algeria).
- Arezoumandi, M. and Volz, J. S. (2013), “*Effect of fly ash replacement level on the shear strength of high-volume fly ash concrete beams*”, *Journal of Cleaner Production*, 59: pp. 120-130.
- AS-3972. (2010), *General purpose and blended cements*, (Australia).
- Ashtiani, M. S., Scott, A. N., and Dhakal, R. P. (2013), “*Mechanical and fresh properties of high-strength self-compacting concrete containing class C fly ash*”, *Construction and Building Materials*, 47: pp. 1217–1224.
- ASTM-C-989-99. (1999), *Standard specification for ground granulated blast-furnace slag for use in concrete and mortars*.
- ASTM-C595-00. (2000), *Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*. (USA)
- Atis, C. D. and Bilim, C. (2007), “*Wet and dry cured compressive strength of concrete containing ground granulated blast-furnace slag*”, *Building and Environment*, 42: pp. 3060–3065.
- Atis, C. D. (2003), “*Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash*”, *Construction and Building Materials*, 17: pp. 147–152.

- Bagheri, A. (2013), “*Comparing the performance of fine fly ash and silica fume in enhancing the properties of concretes containing fly ash*”, *Construction and Building Materials*, 47: pp. 1402–1408.
- Berndt, M. L. (2009), “*Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate*”, *Construction and Building Materials*, 23: pp. 2606-2613.
- Bilim, C., et al. (2009), “*Predicting the compressive strength of ground granulated blast furnace slag concrete using artificial neural network*”, *Advances in Engineering Software*. 40: pp. 334–340.
- Bouikni, A., Swamy, R. N. and Bali, A. (2009), “*Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag*”, *Construction and Building Materials*, 23: pp. 2836–2845.
- Cassgnabere, F., Mouret, M. and Escadeillas, G. (2009), “*Early hydration of clinker-slag-metakaolin combination in steam curing conditions, relation with mechanical properties*”, *Cement and Concrete Research*, 39,1: pp. 1164-1173.
- Chidiac, S. E. and Panesar D. K. (2008), “*Evolution of mechanical properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28 days*”, *Cement and Concrete Composites*, 30: pp. 63-71.
- Council, U. S. G. B. (2014), *LEED For New Construction Fact Sheet*. <http://www.usgbc.org>].
- Day, K. W. (2006), *Concrete Mix Design, Quality Control and Specification*. (NY, EE.UU). p. 7.
- Feret, R. (1982), “*Sur la Compacité des mortiers hydrauliques*”, *Annales des ponts et Chaussées*, 4,7: pp. 155-164. .
- Gambhir, M. L. (2009), *Concrete Technology, Theory and Practice*. (U.K): p. 3.
- GjØrv, O. E. and Sakai, K. (2000), *Concrete technology for a sustainable development in the 21st century*. (London: E & FN Spon). P. 281.
- Hadjasadok, A. et al. (2012), “*Durability of mortar and concretes containing slag with low hydraulic activity*”, *Cement and Concrete Composites*, 34: pp. 671-677.
- Hooton, R. D. (2000), “*Canadian use of ground granulated blast-furnace slag as a supplementary cementing material for enhanced performance of concrete*”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27: pp. 754 - 760.
- Hwang, C. L. and Shen, D. H. (1991), “*The effects of blast furnace slag and fly ash on the hydration of Portland cement*”, *Cement and Concrete Research*, 21: pp. 410-425.
- IRAM-5000-0. (2000), *Cemento. Cemento para uso general. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción*, (Argentina).
- IRAM-5000-1. (2000), *Cemento. Cemento con propiedades especiales*, (Argentina).
- Johari, M. A. M., et al. (2011), “*Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete*”, *Construction and Building Materials*. 25: pp. 2639–2648.
- Kosmatka, S. H. (2004), “*Diseño y control de mezclas de concreto*”, *Portland Cement Association (PCA)*, (México). P. 25.
- Kriker, A. (1992), “*Durabilité du béton à base de laitier*”, (Francia: ENP Alger): p.
- Lea, F. M. (1971), “*The Chemistry of Cement and Concrete*”. (N.Y. USA): p 414.
- Lee, N. K. and Lee, H. K. (2013), “*Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperatura*”, *Construction and Building Materials*, 47: pp. 1201-1209.
- Li, Q., Li, Z., and Yuan, G. (2012), “*Effects of elevated temperatures on properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag as cementitious material*”, *Construction and Building Materials*, 35: pp. 687–692.
- Li, Y. (2011), “*Microstructure and properties of high performance concrete with steel slag powder*”, *Materials Science Forum*, 675-677: pp. 503-506.

- Lübeck, A., et al. (2012), “*Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag*”, *Cement and Concrete Composites*, 34: pp. 392–399.
- Malhotra, V. M. and Mehta, P. K. (1996), “*Pozzolanic and cementitious materials*”. *Advances in Concrete Technology*. (UK): p. 102.
- Mostafa, N. Y., et al. (2001), “*Characterization and evaluation of the hydraulic activity of water-cooled slag and air-cooled slag*”, *Cement and Concrete Research*, 31: pp. 899 - 904.
- NCh148.Of68. (1968), *Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales*, (Chile).
- Nedi, M. (2001), “*Ternary and quaternary cements for sustainable development*”. *American Concrete Institute*, 23,4: pp. 34-42.
- NMX-C414-ONNCCE. (1999), *Industria de la construcción. Cementos hidráulicos – Especificaciones y métodos de prueba*, (México).
- NTC-30. (1996), *Cemento portland. Clasificación y nomenclatura*, (Colombia).
- Oner, A. and Akyuz, S. (2007), “*An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete*”, *Cement and Concrete Composites*, 29: pp. 505 - 514.
- Osborne, G. J. (1999), “*Durability of Portland blast furnace slag cement concrete*”, *Cement and Concrete Composites*, 21: pp. 11-21.
- Pal, S. C., Mukherjee, A. and Pathak, S. R. (2003), “*Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete*”, *Cement and Concrete Research*, 33: pp. 1481 - 1486.
- Polder, R. B. (1996), “*The influence of blast furnace slag, fly ash and silica fume on corrosion of reinforced concrete in marine environment*”, *Heron*, 41,4: pp. 287-300.
- Puertas, F. (1993), “*Escoria de alto horno: composición y comportamiento hidráulico*”, *Materiales de Construcción*, 43,229: pp. 37 - 48.
- Ramezani-pour, A. A. and Malhotra, V. M. (1995), “*Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume*”, *Cement and Concrete Composites*, 17: pp. 125-133.
- Sánchez, R., Palacios, M. and Puertas, F. (2011), “*Cementos petroleros con adición de escoria de horno alto, características y propiedades*”, *Materiales de Construcción*, 61, 302: pp. 185-211.
- Shariq, M., Prasad, J. and Masood, A. “*Effect of GGBFS on time dependent compressive strength of concrete*”, *Construction and Building Materials*, 24: pp. 1469–1478.
- Shetty, M. S. (2013), *Concrete technology - Theory and practice*. (India: S. Chand): p. 201.
- Siddique, R. (1971), *Waste Materials and Byproducts in concrete*, (Berlin, Alemania): p 36.
- Siddique, R. and Bennacer, R. (2012), “*Use of iron and steel industry by-product (GGBS) in cement paste and mortar*”, *Resources, Conservation and Recycling*, 69: pp. 29– 34.
- Slag Cement Association. LEED-NC 2.1, (2005). *Guide: Using slag cement in sustainable construction*. Available from: [www.slagcement.org](http://www.slagcement.org).
- SP43. Australian Technical Infrastructure Committee. (2012), *Cementitious materials for concrete*, (Australia).
- Topç, I. B. and Boga, A. R. (2010), “*Effect of ground granulate blast furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete*”, *Materials and Design*, 31: pp. 3358-3365.
- UNE-EN-197-1. (2013), *Cemento. Parte I: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes*. (España)
- Walker, R. and Pavia, S. (2011), “*Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime-pozzolan pastes*”, *Materiales and Structures*, 4,6: pp. 1139-1150.
- Wan, H., Shui, Z. and Lin, Z. (2004), “*Analysis of geometric characteristics of GGBS particles and their influences on cement properties*”, *Cement and Concrete Research*, 34: p. 133-137.

Wang, L.K., Hung, Y.-T. and Shamma, N. K. (2010), *Handbook of Advanced Industrial and Hazardous Wastes Treatment*, (E. U.: CRC Press Taylor & Francis Group): p. 170.

Yeau, K. Y. and Kim, E. K. (2005), “*An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast furnace slag*”, *Cement and Concrete Research*, 35: pp. 1391-1399.