INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, FÍSICAS E DE DURABILIDADE DO CONCRETO

BONATO, M. M. B.[1], PORTELLA, K. F.[2], BRAGANÇA, M. O. G. P.[3], BRONHOLO, J. L.[4], SANTOS, J. C. M.[5]

[1] UFPR/ LACTEC, doutoranda, Mestre em Ciências, e-mail: marcelle158@yahoo.com.br
[2]LACTEC, Pesquisador, Doutor em Ciências, e-mail: portella@lactec.org.br
[3]LACTEC, Pesquisador, Mestre em Ciências, e-mail: mariana.portella@lactec.org.br
[4]LACTEC, Tecnólogo, Tecnólogo em Construção Civil, e-mail: jeferson.luiz@lactec.org.br
[5]Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia, Pesquisador, e-mail: jmonteiro@coelba.com.br

RESUMO

Diversas pesquisas estão sendo desenvolvidas com adição de diferentes insumos, entre eles a escória de alto forno, a fim de prevenir e/ou reduzir a corrosão do concreto armado em regiões marinha e industrial. A utilização de escória de alto forno em argamassas e concretos propicia uma maior durabilidade e resistência a ambientes quimicamente mais agressivos, evidenciado por uma microestrutura mais fina e homogênea desenvolvida pelo refinamento dos poros, os quais reduzem a percolação de fluidos e, portanto, a corrosão das armaduras. As características física, química, microestrutural e mecânica dos insumos utilizados na produção de argamassas/concretos podem, porém, interferir no desempenho e qualidade do produto final. Assim, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho de concretos com escória de alto forno de diferentes procedências, em substituição ao cimento na proporção de 50% em massa. A análise comparativa com o concreto sem adições foi realizada quanto a ensaios físicos, mecânicos e de durabilidade em ambiente marinho e industrial. Os resultados obtidos, com variações de até 58% na resistência mecânica, indicam a necessidade de uma análise criteriosa dos insumos prévia a execução de concretos, para que manifestações patológicas possam ser evitadas, ou retardadas.

Palavras chave: concreto com escória de alto forno, potencial de corrosão, durabilidade, resistência mecânica.

ABSTRACT

Several researches are ongoing with the addition of different inputs, including the blast furnace slag, in order to prevent and/or reduce corrosion of reinforced concrete in marine and industrial regions. The use of blast furnace slag in mortars and concrete provides greater durability and resistance to aggressive chemically environments, as evidenced by a more homogeneous and fine microstructure developed by refining the pores, which reduces the fluids percolation and thus, the reinforcement corrosion. The physical, chemical, microstructural and mechanical features of inputs used in the production of mortars/concrete can interfere, however, in the performance and quality of the final product. Therefore, this research aimed to evaluate the concrete performance with blast furnace slag from different sources, 50% of cement replacement by mass. A comparative analysis with the concrete without additions has done as the physical, mechanical and durability tests in marine and industrial environment. The results obtained with variations of up to 58 % in strength, indicate the need for a careful analysis of the inputs prior to implementation of concrete, so that distress maybe avoided or retarded.

Keywords: concrete with blast furnace slag, corrosion potential, durability, strength.

1. INTRODUÇÃO

O concreto apresenta inicialmente pH > 13,5, o que confere a formação de uma película protetora e passiva no aço; no entanto, a entrada de agentes agressivos, propiciada pela porosidade intrínseca do material, promove a diminuição do pH e deflagra o processo de corrosão (AHMAD, 2003).

A utilização de adições minerais como matéria-prima na fabricação de cimento ou na produção de concreto é uma das alternativas para minimizar esta grande preocupação com estruturas de concreto armado expostas em regiões marinha e industrial (TOPÇU & BOGA, 2010).

As adições mais empregadas no cimento e/ou concreto são as pozolanas, que reagem com a cal proveniente das reações de hidratação ou a escória granulada de alto forno, que possui propriedades pozolânicas e cimentícias devido ao alto teor de cálcio. A substituição do cimento Portland por adições minerais é possível devido a sua composição similar. O primeiro é constituído de silicatos, aluminatos e ferro-aluminatos de cálcio, enquanto estas apresentam compostos sílico-cálcico-aluminosos (SONG & SARASWATHY, 2006).

A escória de alto-forno é um subproduto da manufatura do ferro-gusa, gerado nos fornos elétricos e panela de produção do aço, onde se reduzem os óxidos contidos nos minerais de ferro e se separam as impurezas que os acompanham. A escória é formada pela fusão das impurezas do minério de ferro com a adição de fundentes (calcário e dolomita) e as cinzas do coque (CST, 2014).

Em 2013, a produção brasileira de ferro-gusa foi cerca de 26.000.000 t, segundo o Instituto Aço Brasil. Considerando que, para cada tonelada de ferro-gusa produzido, entre 210 e 310 kg de escória de alto forno é gerada (ABM, 2008), estima-se uma produção média de 6.760.000 t de escória de alto forno no Brasil.

Vários pesquisadores já expuseram vantagens técnicas, econômicas e ambientais da utilização de escória de alto forno em argamassas e concretos. As principais características são: maior durabilidade e resistência a ambientes quimicamente mais agressivos, além da redução de emissões de CO_2 no ar atmosférico quando substitui o cimento, diminuição de áreas necessárias ao descarte de resíduos industriais e redução do volume escavado de jazidas de calcário, preservando as paisagens naturais e conservando os recursos minerais (MALHOTRA, 1999; JAUL & TSAY, 1998; YEAU & KIM, 2005 e PAL *et al*., 2002).

Segundo Lang & Geiseler (1997), em geral, a porosidade capilar do concreto produzido com cimento Portland comum e escória de alto forno moída é menor do que à do concreto no qual se utilizou em sua produção apenas cimento Portland comum. Isto ocorre porque os produtos de hidratação das pastas de cimento com adição de escória de alto forno se precipitam nos

poros e canais existentes na pasta, aumentando a densidade da pasta pela redistribuição da porosidade por toda a matriz, efeito este denominado de refinamento do grão por Glasser (1989) e Metha & Monteiro (2008). Os refinamentos dos poros e do grão tornam as pastas de cimento menos permeáveis, aumentando a resistência da zona de transição no concreto, o que propicia uma redução da microfissuração, percolação de fluidos, permeabilidade e porosidade capilar, reduzindo também a corrosão das armaduras (METHA & MONTEIRO, 2008).

A composição química da escória de alto forno pode variar, segundo Dal Molin (2011), com a composição química da matéria-prima, o tipo de ferro que está sendo produzido, a eficiência de operação do forno, o método de resfriamento e o tipo de revestimento. Portanto, a composição química da escória bem como a sua cristalinidade, definem o seu possível emprego na construção civil, como agregado ou substituição ao cimento. Nesta área, é importante observar a concentração dos teores de óxido de cálcio (CaO) e de óxido de magnésio (MgO), pois são expansivos e, portanto, acima dos valores usualmente utilizados são inviáveis para serem utilizados em concretos.

Assim, esta pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de avaliar o desempenho físico, mecânico e de durabilidade em ambiente marinho e industrial de concretos com escória de alto forno procedente de diferentes regiões do país, em substituição a 50% de cimento em massa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados na produção do concreto convencional foram: cimento CP II-Z 32, areia natural lavada como agregado miúdo e rocha britada com dimensão máxima de 9,5 mm como agregado graúdo, além da água potável proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Curitiba – PR.

As escórias de alto forno (EAF) empregadas na produção de concreto, em substituição ao cimento, foram obtidas na forma granulada e provenientes de indústria do estado de São Paulo (EAF-SP) e do estado da Bahia (EAF-BA). Para obtenção da finura similar ao cimento, as escórias passaram por moagem em máquina de abrasão do tipo Los Angeles, seguido de moinho de bolas e quarteamento para homogeneização.

A caracterização física das escórias foi feita pelo ensaio de finura com o método de permeabilidade ao ar segundo a NM 76 (ABNT, 1998); a massa específica conforme NM 23 (ABNT, 2001); a composição química pela técnica de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) e os índices de atividade pozolânica (IAP) com a cal e o cimento foram obtidos de acordo com a NBR 5751 (ABNT, 1992) e NBR 5752 (ABNT, 1992), respectivamente.

2.1 Dosagens de concreto

O traço do concreto convencional (REF) foi definido como 1: 1,48: 2,52: 0,50 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo: fator água/cimento), segundo o método de dosagem do módulo de finura dos agregados (ANDRADE *et. al*, 1981), considerando dados de resistência à compressão, fator água/cimento e consumo de cimento.

A dosagem do concreto com EAF foi executada a partir do REF, substituindo 50% do cimento em massa pela escória de alto forno, sem considerar a massa específica.

A moldagem e cura dos corpos de prova (CPs) para os ensaios mecânicos e de durabilidade foram realizadas segundo a NBR 5738 (ABNT, 2003).

2.2 Caracterização do concreto

2.2.1. Propriedades físicas

A massa específica, o teor de absorção de água por imersão e o índice de vazios foram medidos segundo recomendações da norma NBR 9778 (ABNT, 2005).

2.2.2. Resistência mecânica

Os testes envolvidos na caracterização mecânica foram: resistência à compressão axial simples, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. Os CPs de concreto foram ensaiados na máquina universal de ensaios marca EMIC, modelo DL 30.000, de acordo com as normas técnicas NBR 5739 (ABNT, 2007), NBR 7222 (ABNT, 2011) e NBR 8522 (ABNT, 2008).

2.2.3. Durabilidade

A durabilidade foi investigada pela técnica de potencial eletroquímico de corrosão em um sistema eletroquímico da marca Ecochemie, modelo Autolab – PGSTAT-100, interfaciado com um micro-computador para aquisição e registro de dados. Os CPs de concreto foram submetidos à envelhecimento acelerado em câmaras de intemperismo com atmosfera agressiva de névoa salina e gás anidrido sulfuroso (SO_2), em ciclos de molhagem, secagem e temperatura de até 40 °C, simulando condições do meio marinho e industrial, segundo as normas G 87 (ASTM, 2007) e B 117 (ASTM, 2011). Na Figura 1 estão apresentados os CPs prismáticos utilizados, com dimensões de (9,1 x 4,9) cm de base e 10 cm de altura e com barras nervuradas de aço carbono CA 50 de 6,3 mm de diâmetro nominal e 12,5 cm de comprimento. Estas barras foram polidas em esmeril, e encapadas com fita de auto fusão para padronização, ou seja, eliminou-se a camada de óxido passivante já existente e delimitou-se a área central de 6,43 cm² como região a ser exposta. Os CPs foram curados inicialmente ao ar livre por 24 h protegidos com filme plástico, após mantidos 28 dias em cura úmida com umidade relativa superior a 95% e temperatura controlada em (23 ± 2) ºC.

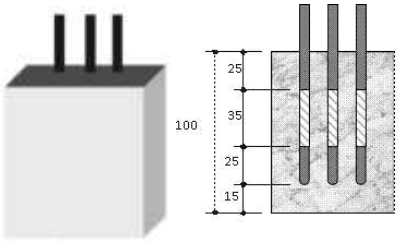


Figura 1: Desenho esquemático do CP prismático para o ensaio de durabilidade, com detalhamento interno das barras com as dimensões de exposição em milímetros (BONATO *et al.*, 2012)

O sistema utilizado para medição, ilustrado na Figura 2, consistiu do CP de concreto úmido com a barra metálica como eletrodo de trabalho (ET), o eletrodo de cobre/sulfato de cobre – $Cu|CuSO_4$ (CSE) como eletrodo de referência (sendo este colocado na superfície do concreto sobre uma esponja umedecida com água de modo a melhorar o contato elétrico) e o contraeletrodo de grafite. Os parâmetros utilizados nas medições foram: intervalo de frequência entre 100 kHz e 5 mHz, amplitude de 25 mV, 10 pontos por década; e tempo inicial de 60 s para medição do potencial de circuito aberto (OCP).

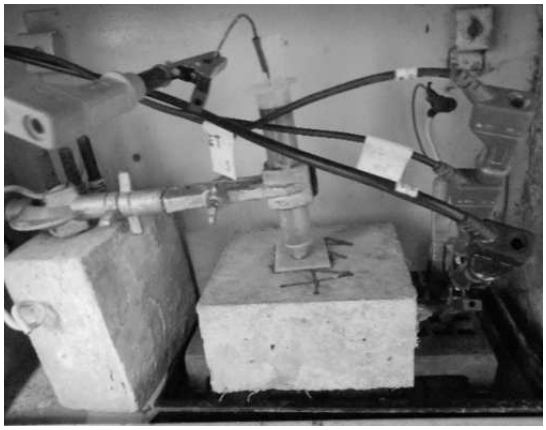


Figura 2: Sistema de medição de potencial de corrosão da armadura

2.2.4. Microestrutura

Após acompanhamento dos OCPs, os CPs envelhecidos foram rompidos para caracterização microestrutural dos concretos pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com análise química elementar por sonda de energia dispersiva (EDS). Os equipamentos utilizados foram o microscópio eletrônico de varredura da marca JEOL modelo JSM-6360LV, um detector de Si(Li) da marca Thermo e o programa Noran System Six. As superfícies das amostras foram metalizadas com ouro.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Matéria-prima

Os resultados físicos e mecânicos obtidos para as escórias de alto forno constam na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização física e mecânica das escórias de alto forno

Propriedades	**Escória de alto forno**	
	EAF-SP	EAF-BA
Massa específica, g/cm^3	2,850	2,850
Finura, m^2/kg	226	372
IAP com cal, MPa	7,1	2,8
IAP com cimento, %	77,2	22,1

A área específica da EAF-SP atingiu menor valor (226 m^2/kg) do que à obtida para EAF-BA (372 m^2/kg), sendo 13,1% inferior ao valor mínimo (260 m^2/kg) estabelecido na NBR 11578 (ABNT, 1991) para a fabricação do CP II-Z, já que o cimento foi substituído pela EAF. Considerando apenas a área específica, valores maiores tendem a facilitar o processo de hidratação do material, propiciando a obtenção de concretos com resistências mecânicas maiores, especialmente nos primeiros dias.

O IAP com a cal aos 7 dias para a EAF-SP atingiu 7,1 MPa, acima do mínimo de 6,0 MPa da norma, que determina que o material apresenta reatividade pozolânica; e o IAP com o cimento aos 28 dias foi de 77,2%, também alcançou o mínimo de 75% exigido pela norma brasileira. Já os IAP obtidos para a EAF-BA foram bem aquém dos valores estabelecidos nas NBR 5751 e NBR 5752. Desta forma, a EAF-SP pode ser considerada um material pozolânico com reatividade, possibilitando a sua substituição pelo cimento; enquanto a EAF-BA não apresenta este comportamento. A composição química das escórias de alto forno e do cimento estão na Tabela 2. As concentrações dos compostos MgO e CaO para a EAF-SP encontram-se dentro dos limites preconizados na literatura, já a EAF-BA apresentou teores inadequados para ser utilizada como substituta do cimento.

Tabela 2: Composição química das escórias de alto forno e cimento

	Teor em massa dos componentes (%)			
Componentes	EAF-SP	EAF-BA	Cimento	CP II-Z
CaO	**41,9**	**1,9**	54,8	
SiO_2	38,1	38,3	21,5	
Al_2O_3	11,6	17,7	4,7	
MgO	**2,6**	**22,3**	5,4	
Fe_2O_3	2,1	5,5	2,9	
SO_3	1,8	0,4	2,7	
MnO	0,7	0,3	0,03	
TiO_2	0,6	0,3	0,2	
K_2O	0,2	0,3	1,0	
SrO	0,2	-	-	
Na_2O	0,1	0,2	0,2	
BaO	0,1	-	-	
NiO	-	0,1	-	
P_2O_5	-	-	0,10	
Cr_2O_3	-	12,8	-	

3.2 Concreto

Os valores das propriedades físicas investigadas de absorção de água, massa específica e índice de vazios dos concretos estudados estão na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades físicas dos concretos produzidos com 0 e 50% de escória de alto forno

Propriedades	**Absorção, %**		**Massa específica, kg/l**				**Índice de vazios, %**	
Concreto	após imersão	após imersão e fervura	real	seca	após saturação	após saturação e fervura	após saturação	após saturação e fervura
REF	6,39	6,57	2,577	2,204	2,343	2,349	14,07	14,47
EAF-SP	4,71	5,00	2,545	2,257	2,362	2,370	10,63	11,28
EAF-BA	6,88	7,14	2,633	2,210	2,365	2,371	16,09	16,68

A adição/substituição da EAF-SP no concreto propiciou a redução da absorção e índice de vazios, quando comparado ao REF. Isto se deve, provavelmente, a uma menor porosidade. O comportamento da EAF-BA no concreto foi inversa, possivelmente pela sua caracterização química, valores estes que não ultrapassam 8% em relação ao REF.

Os valores obtidos para o índice de vazios para todas as dosagens indicam similaridade nos métodos após saturação e saturação com fervura.

Na Tabela 4 a Tabela 5 estão apresentados os resultados obtidos acerca do desempenho mecânico das dosagens preparadas com 0 e 50% de substituição de EAF.

Tabela 4: Dados de resistência à compressão axial em função do tempo de cura das dosagens REF e com substituição de 50% de EAF

Resistência à compressão, MPa	**Concreto**		
	REF	EAF-BA	EAF-SP
1 dia	7,0 ± 0,00	1,9 ± 0,08	6,0 ± 0,07
7 dias	28,0 ± 1,28	8,6 ± 0,23	23,2 ± 0,42
28 dias	35,1 ± 1,57	12,6 ± 0,57	29,8 ± 1,77
91 dias	41,0 ± 2,06	17,6 ± 0,42	36,8 ± 0,21

Os resultados obtidos indicam que o desempenho quanto à resistência à compressão axial das misturas com EAF foram discrepantes, variando de aproximadamente 36 a 85% em relação ao REF, aos 28 dias. Considerando o limite mínimo de resistência à compressão axial das dosagens estabelecido em 25 MPa aos 28 dias, a dosagem EAF-SP atendeu o valor determinado, enquanto a EAF-BA ficou bem abaixo, atingiu somente metade deste valor.

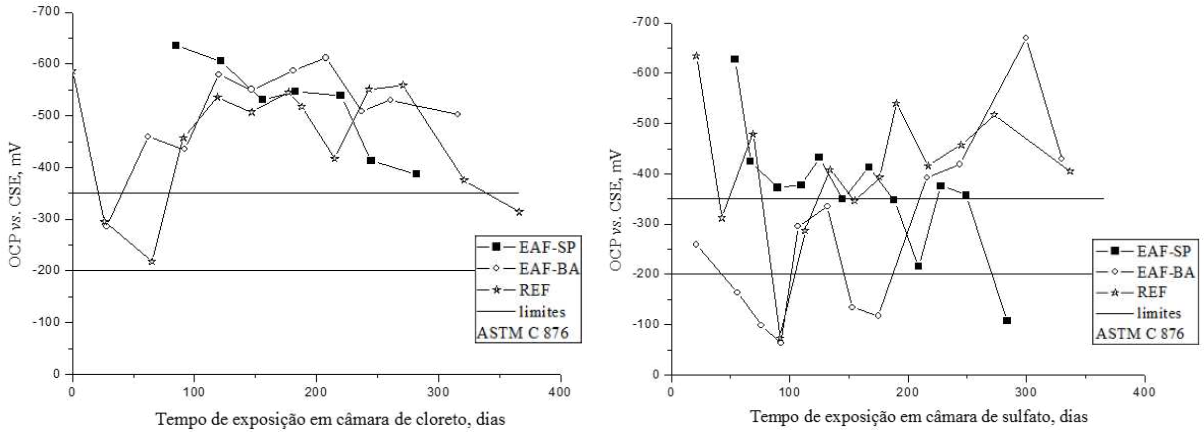
Tabela 5: Dados de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de cura das dosagens REF e com substituição de 50% de EAF

Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, MPa	**Concreto**		
	REF	EAF-BA	EAF-SP
	3,24 ± 0,42	1,44 ± 0,06	3,13 ± 0,06

Os dados de resistência à tração por compressão diametral indicam similaridade para as dosagens REF e EAF-SP, considerando o desvio obtido. No entanto, a dosagem EAF-BA apresentou novamente características inferiores em até 55%.

O módulo de elasticidade para o concreto EAF-BA atingiu (24,0 ± 1,43) e o valor para o REF foi de (31,25 ± 0,49) GPa.

Os valores obtidos de OCP foram representados graficamente em função do tempo de envelhecimento, e estão apresentados na Figura 3. O comportamento das dosagens estudadas foram avaliadas de forma qualitativa segundo a norma ASTM C876 (ASTM, 2009), indicando a probabilidade do concreto armado estar em processo de corrosão; sendo que, quando o OCP relativo ao eletrodo de referência de CSE for mais negativo que -350 mV o material tem 90% de probabilidade de estar sob processo de corrosão, enquanto que, se este for mais positivo que -200 mV a probabilidade é de cerca de 10% e, que no seu intervalo, entre -200 e -350 mV há probabilidade incerta de corrosão da armadura de concreto.



(a) (b)

Figura 3: Gráfico de potencial de corrosão ao longo do tempo para amostras de concreto com 0 e 50% de EAF (a) com envelhecimento em câmara de névoa salina (b) com envelhecimento em câmara de SO_2

Os CPs com envelhecimento acelerado em câmara de névoa salina obtiveram potenciais *vs.* CSE mais negativos que -350 mV; encontram-se na região de probabilidade de corrosão superior a 90%. Este fato ocorreu com um tempo inferior a 100 dias de envelhecimento para todas as dosagens.

O gráfico de OCP para as amostras de concreto com envelhecimento acelerado em câmara de SO_2 não demonstra uma definição da região de probabilidade de corrosão, com tendência para a probabilidade incerta de corrosão da armadura até os 250 dias.

Para os concretos produzidos com EAF não foi observado melhoria no comportamento quanto à corrosão; os resultados de EAF encontram-se na mesma região que o REF, sugerindo uma redução da permeabilidade e da entrada de agentes agressivos não tão efetiva. Isto pode ter sido ocasionado pelas características mineralógicas e microestrutural das EAF.

A utilização de EAF em concretos e argamasas, conforme apresentado, reduz a porosidade, diminuindo a quantidade e o tamanho dos poros. As micrografías obtidas por MEV comprovam este efeito de refinamento dos poros quando da utilização de EAF, comparando a Figura 4a e 4b, concretos produzidos com EAF e Figura 4c, sem adição de EAF.

As análises da técnica de EDS indicaram a presença de cristais a base de enxofre para a câmara de dióxido de enxofre e de cloro para a de névoa salina.

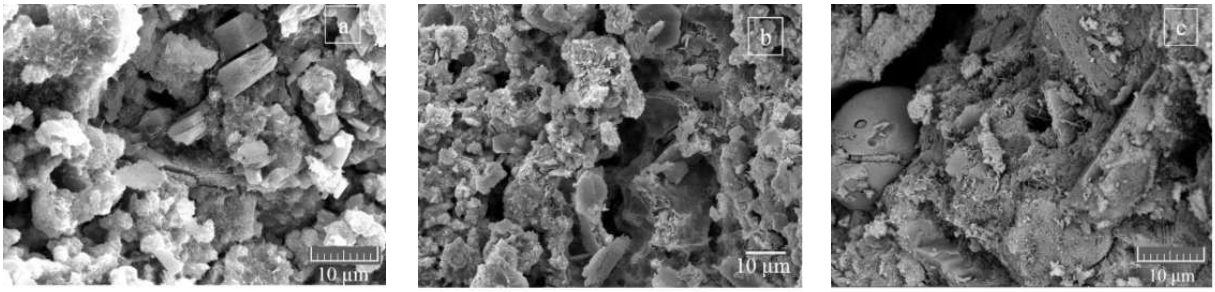


Figura 4: Micrografias dos CPs de concreto envelhecidos em câmara de névoa salina:
(a) EAF-BA; (b) EAF-SP; (c) REF

4. CONCLUSÃO

As características física, química e mecânica da EAF influenciam no comportamento pozolânico destas quando adicionadas em concretos e argamassas. Portanto, é de suma importância a execução de uma análise prévia criteriosa e completa da EAF a ser utilizada, a fim de que não interfira negativamente no desempenho e qualidade das argamassas e concretos.

Nesta pesquisa, os concretos produzidos com 50% de EAF de diferentes procedências apresentaram comportamentos distintos.

- Os resultados obtidos para a EAF-SP indicam a sua utilização como material cimentante, com propriedades pozolânicas. O efeito do refinamento dos poros desta foi verificado em vários ensaios, como resistência mecânica, microestrutura, absorção e índice de vazios. A resistência à compressão axial foi até 58% superior ao concreto com EAF-BA.
- A EAF-BA não apresentou resultados compatíveis para a sua utilização em concretos e argamassas; valores mecânicos e físicos aquém dos exigidos nas normas brasileiras e/ou comparados ao concreto REF. Também, foi verificada a presença excessiva de óxido de magnésio, expansivo e, portanto, deletério ao produto final.
- O comportamento quanto à corrosão dos materiais com envelhecimento em câmaras de névoa salina e de SO_2 foram similares; não foi possível identificar um melhor desempenho quanto à probabilidade de ocorrência de corrosão.

A substituição parcial do cimento Portland por EAF possibilita ganhos técnicos, econômicos e ambientais, desde que se tenha a responsabilidade de executar previamente análise do insumo EAF. Se a composição química da EAF for adequada assegura uma estrutura da pasta de cimento mais densa, evitando ou retardando manifestações patológicas em concretos e argamassas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio fornecido pelas entidades que viabilizaram o desenvolvimento deste trabalho: LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, COELBA – Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia, UFPR - Universidade Federal do Paraná (Programa de pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Microscopia e Laboratório de Minerais e Rochas) e CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico/PIBITI/Bolsa PQ/Lei 8010/90.

6. REFERÊNCIAS

AHMAD, S. **Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction - a review**. Cement& Concrete Composites, v. 25, p. 459–471, 2003.

ANDRADE, W. P.; FONTOURA, J. T.; GUERRA, E. A.; BITTENCOURT, R. M. **Um método de dosagens para concreto massa**. São Paulo, IBRACON, 1981.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS – American Society for Testing and Materials. **ASTM B 117**. Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. USA, 2011.

_____. **ASTM C 876**. Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. USA, 2009.

_____. **ASTM G 87-02**. Standard Practice for Conducting Moist SO_2 Tests. USA, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. Gestão de Coprodutos. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: 2008**. Brasília, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008. (Nota técnica). 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de janeiro, 2003,

_____. **NBR 5739**. Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 5751**. Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 5752**. Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 7222**. Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8522**. Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR NM 23**. Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 76**. Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

BONATO, M. M.; PORTELLA, M. O. G.; PORTELLA, K. F.; BRONHOLO, J. L.; ESCOBEDO, M. L.; PEREIRA, P. A. M.; BRAMBILLA, K. J. C.; ZALPA, J. C.; VIEIRA, M. E.; SANTOS, J. C. M.; CERQUEIRA, D. P. **Resistência mecânica e corrosão de concreto com adição de fibras de coco em ambiente salino**. Revista Espaço Energia, v. 17, p. 27-33, 2012.

COMPANHIA SIDERÚRGICA DE TUBARÃO. Disponível em: <http://www.cst.com.br>. Acesso em 10 fev 2014.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: Isaia, G. C (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª ed., v. I. São Paulo: Ed. IBRACON, 2011. p. 261-309.

GLASSER, F. P. **Chemical, mineralogical and microestructural changes occurring in hydrated slag - cement blends**. In: SKALNY, J. & MINDESS, S. Ed. Materials Science of Concrete II Westerville: The American Ceramic Society Inc., 1989.

JAUL, W.-C.; TSAY, D.-S. **A study of the basic engineering properties of slag cement concrete and its resistance to seawater corrosion**. Cement and Concrete Research, v. 28, p. 1363–1371, 1998.

LANG, E.; GEISELER, J. Utilization of high slag blast furnace cement for high-performance concrete - Influence of pore structure and permeability. In: **10th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC)**. Iron and Steel Slags - Reports from p. 1974-2000. Gothenburg, 1997.

MALHOTRA, V. M. **Making concrete "greener" with fly ash**. Concrete International, Farmington Hills, v. 21, n. 5, p. 61-66, 1999.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estruturas, Propriedades e Materiais.** São Paulo: Pini, 2008.

PAL, S. C.; MUKHERJEE, A..; PATHAK, S. R. **Corrosion behavior of reinforcement in slag concrete**. ACI Mater, v. 99, p. 1– 7, 2002.

SONG, H. W.; SARASWATHY, V. **Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag – An overview.** Hazardous Materials B, v. 138, p. 226–233, 2006.

TOPÇU, I. B.; BOGA, A. R. **Effect of ground granulate blast-furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete**. Materials and Design, v. 31, p. 3358–3365, 2010.

YEAU, K. Y.; KIM, E. K. **An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag**. Cement and Concrete Research, v. 35, p. 1391– 1399, 2005.