

EFEITOS NA DURABILIDADE DE ELEVADOS TEORES DE ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO COMO ADIÇÃO MINERAL NO CONCRETO ¹

Kátia Maria Brunoro Grilo Bourguignon²
Maristela Gomes da Silva³
Milton Paulino da Costa Junior⁴
Sayonara Maria de Moraes Pinheiro⁵
Fernando Lordêllo dos Santos Souza⁶
Eliana Zandonade⁷
Tsutomu Morimoto⁸

Resumo

A escória de alto-forno é um sub-produto da indústria siderúrgica utilizada essencialmente como aglomerante em adição ao clínquer de cimento Portland, sendo uma alternativa para tornar a microestrutura da matriz do concreto endurecido mais densa e mais resistente, além de contribuir com a redução do consumo de clínquer cuja quantidade de produção equivale a uma similar quantidade de emissões na atmosfera. Atualmente, a utilização da escória granulada de alto-forno moída, como aglomerante em substituição ao clínquer, principalmente em elevados teores, se justifica uma vez que as indústrias produtoras se preocupam em atender às novas legislações ambientais que as responsabilizam pelos impactos ambientais provocados pelos seus resíduos e essa aplicação é uma forma de aproveitá-los com eficiência e eficácia. Assim sendo, neste trabalho faz-se uma avaliação da influência da adição de escória granulada de alto-forno diretamente na mistura de concreto na durabilidade do concreto. Para essa finalidade avalia-se a profundidade de carbonatação natural em ambiente com e sem controle da umidade e temperatura e a resistência ao ataque de cloretos para uma mesma classe de resistência. Nos resultados obtidos, observou-se que o menor consumo de clínquer das misturas com maior teor de escória granulada de alto-forno, para uma mesma classe de resistência, proporcionaram similares profundidades de carbonatação e uma maior resistência ao ataque de cloretos ocasionados, provavelmente, pela melhora na estrutura dos poros.

Palavras-chave: Escória de alto forno; Íons cloreto; Carbonatação.

Abstract

The blast furnace slag is a by-product of the steel industry mainly used as binder in addition to Portland cement clínquer. It's an alternative to improve the microstructure of the concrete matrix making it denser and more strength, besides contributing for a reduction of the clinker consumption whose amount of production is equivalent to a similar amount of emissions in the atmosphere. The use of the granulated slag blast furnace as binder replacing in clínquer, mainly in high contents, is justified by the steel industries concern about the new environment laws that make responsible them for the ambient impacts provoked by its residues and this application is a form to use to advantage them with efficiency and effectiveness. This work evaluates the influence of the direct addition of grown granulated blast furnace slag, in the concrete mixture, in the durability of the concrete. For this purpose, natural carbonation depth in a controlled (humidity and temperature) and no controlled environment is measured and the chloride attack strength for one same class of strength. The results, showed that the low clinker content and the high content of granulated blast furnace slag for the same class of strength, provides to similar carbonation depths and better chloride attack strength, probably, for the improvement in the pores structure.

Key words: Blast furnace slag; Chloride ion; Carbonation

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Eng. Civil, Mestre em Engenharia Civil; Pesquisadora do NEXES - Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). e-mail: kátia.bourguignon@terra.com.br

³ Eng. Civil, Mestre, Doutora em Engenharia Civil, Professora do Departamento de Engenharia Civil coordenadora do NEXES, Diretora do Centro Tecnológico da UFES E-mail margomes@npd.ufes.br

⁴ Eng. Civil, Mestre em Engenharia Civil; Pesquisador do NEXES - Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). e-mail: miltonpcj@uol.com.br

⁵ Eng. Civil, Mestre em Engenharia Civil; Professora do Departamento de Engenharia Civil - UNIVASF. e-mail: sayonarammp@uol.com.br

⁶ Eng. Civil, Mestre em Engenharia Civil, Pesquisador do NEXES, e-mail fernador@npd.ufes.br

⁷ Doutora em Estatística, Professora do Departamento de Estatística – UFES, Pesquisador do NEXES. e-mail elianaz@rural.com.br

⁸ Engenheiro especialista em Meio Ambiente, Companhia Siderúrgica de Tubarão. e-mail: morimoto@cst.com.br

INTRODUÇÃO

Os problemas ambientais decorrentes da maior geração de resíduos que normalmente não são dispostos adequadamente, advém do crescimento populacional que demanda mais e mais energia e recursos naturais.

Uma contribuição importante para o aproveitamento desses resíduos, pode ser dada pela indústria da construção civil, uma vez que participa de cerca de 14% do Pib brasileiro na produção de bens e serviços.⁽¹⁾

Nesse sentido, destacam-se as crescentes pesquisas visando a substituição de matérias-primas por outros materiais com propriedades similares.

Assim sendo, insere-se o uso da escória granulada de alto-forno moída, em substituição ao clínquer de cimento Portland ou como adição ao concreto diretamente nas misturas. A geração brasileira de escória de alto-forno pode ser estimada a partir da produção de ferro-gusa, na ordem de 6 200 -10 200 milhões de toneladas no ano de 2005.⁽²⁾ A maior parte dessa escória de alto-forno é destinada à indústria cimenteira que a utiliza, parcialmente, em substituição do clínquer, agregando como benefícios ambientais a redução do volume escavado de jazidas, para a produção de cimento e, por conseguinte, a diminuição da degradação da camada vegetal; a redução da utilização de explosivos que geram partículas em suspensão no ar; a diminuição de liberação de dióxido de carbono no ar atmosférico e a diminuição de áreas necessárias ao descarte de resíduos industriais.

No que diz respeito à sua composição química, a escória de alto-forno é similar ao cimento Portland e aliada à sua atividade hidráulica, quando finamente moída e ativada quimicamente, é utilizada em substituição parcial ao clínquer de cimento Portland ou como adição ao concreto.

1.1 Concreto com Escória de Alto-forno

A produção do concreto demanda um grande consumo energético uma vez que utiliza o cimento Portland como aglomerante. Uma opção para diminuir a maior necessidade de matérias-primas na fabricação do cimento é utilizar a escória granulada de alto-forno moída, substituindo parte do clínquer e também como adição mineral, sendo adicionada diretamente às misturas de concreto.

Aliado aos benefícios ambientais, a escória de alto-forno, quando utilizada como adição mineral no concreto, proporciona, ao material, propriedades que aumenta o seu desempenho e a sua durabilidade, pois proporciona um concreto com microestrutura mais densa e com baixa permeabilidade.

A porosidade capilar do concreto produzido com cimento Portland comum e escória, em geral, é menor do que à do concreto no qual se utilizou em sua produção apenas cimento Portland comum como aglomerante.⁽³⁾ Isso acontece 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 pelo refinamento dos poros.

O ataque dos cristais grandes e orientados de hidróxido de cálcio sobre o grão de escória tem o efeito de reduzir o tamanho desses cristais. Os produtos hidratados são transportados para fora do grão, deixando espaços vazios anteriormente ocupados pelas partículas da escória não hidratada e, por isso uma porosidade residual é acumulada no grão, resultando em uma redistribuição da porosidade, dispersando os poros, por toda a matriz. Esse efeito é denominado, com base nas pesquisas de Glasser⁽⁴⁾ e Mehta e Monteiro,⁽⁵⁾ de refinamento do grão.

O refinamento dos poros e do grão torna as pastas de cimento menos permeáveis e, no concreto, aumenta a resistência da zona de transição, o que reduz a microfissuração, a permeabilidade e a porosidade capilar.⁽⁵⁾

Vários resultados de pesquisas têm constatado essa diminuição da porosidade capilar. As misturas com escória de alto-forno, apesar de serem mais densas, no mecanismo da carbonatação, de acordo com Isaia et al.⁽⁶⁾ e Matala,⁽⁷⁾ o fator preponderante é a menor alcalinidade dessas misturas e a estrutura dos poros da matriz.

Quanto a durabilidade desses concretos, no mecanismo da carbonatação do concreto com escória de alto-forno, para Matala,⁽⁷⁾ inicialmente, é muito similar àquela do cimento Portland comum, diferindo na quantidade de carbonatos que se precipitam da reação com o Ca(OH)_2 , porém, a diferença de composição do C-S-H e do teor de Ca(OH)_2 afetam o mecanismo de carbonatação. Assim, a carbonatação das misturas com escória de alto-forno, quando comparada à carbonatação das misturas com cimento Portland comum é mais dependente da carbonatação do C-S-H, em decorrência da menor quantidade de hidróxido de cálcio, além da menor relação Ca/Si do C-S-H dessas misturas. A carbonatação do C-S-H depende do grau de carbonatação da pasta, da quantidade inicial de Ca(OH)_2 , do teor de umidade da pasta e da estrutura dos poros.

Deve-se considerar, também, na análise dos resultados das pesquisas, as condições dos ensaios como, por exemplo, o tempo de cura, uma vez que as misturas contendo escória granulada de alto-forno moída, segundo Matala,⁽⁷⁾ proporcionam uma estrutura mais porosa para curto período de cura.

Assim, pode-se concluir, de acordo com Matala,⁽⁷⁾ que as misturas que contêm escória granulada de alto-forno como aglomerante, para ter uma maior resistência a carbonatação, necessitam de um tempo maior de cura úmida, no mínimo 28 dias e, essa menor resistência ao mecanismo da carbonatação das misturas com adições de escória pode ser compensado de acordo com Houst e Wittmann,⁽⁸⁾ com uma diminuição da relação água/material cimentício, que proporciona uma menor profundidade de carbonatação.

De outra maneira, a resistência ao ataque de cloretos no concreto com escória aumenta porque essa adição modifica a estrutura e a composição dos poros. Nesses concretos, os íons cloreto permanecem quimicamente combinados, em meios de elevada alcalinidade entretanto, no concreto carbonatado, o pH é menor quando comparado com o concreto não carbonatado, aumentando a solubilidade do cloroaluminato de cálcio. Assim, nas misturas adição de escória de alto-forno, carbonatadas, com pH ainda menor, a solubilidade do cloaluminato de cálcio aumenta ainda mais.⁽⁹⁻¹²⁾

Helene⁽¹³⁾ salienta que essa maior solubilização do cloroaluminato de cálcio pode ser compensada com um maior tempo de cura úmida, proporcionando uma redução da porosidade e da permeabilidade do concreto dificultando a difusão do CO_2 .

Assim sendo, o objetivo desse trabalho é analisar durabilidade dos concretos com classes de resistência à compressão de 20, 30, 35 e 40 MPa, utilizando teores de escória granulada de alto-forno moída iguais a 30, 66 e 83%, produzidos por Bourguignon,⁽¹⁴⁾ Costa Junior et al.⁽¹⁵⁾ e Silva.⁽¹⁶⁾

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste trabalho, avalia-se a resistências à compressão axial, a profundidade de carbonatação natural sob duas condições de cura e a resistência ao ataque de cloretos.

2.1 Materiais

Os materiais caracterizados e utilizados na produção dos concretos são o cimento Portland composto CII E-32, o cimento Portland de alto-forno CP III-32-RS, a escória granulada de alto-forno moída, a areia, a pedra britada n.º 0 e pedra britada n.º 1.

A análise química, as características físicas e químicas e teor de escória de alto-forno dos cimentos; a composição química, os teores dos óxidos, o grau de vitrificação, a microestrutura e a difração de raios-X da escória de alto-forno moída (proveniente da CST - Companhia Siderúrgica do Tubarão) utilizada na produção dos concretos; as características físicas do agregado miúdo e dos agregados graúdos encontram-se nos trabalhos de Bourguignon,⁽¹⁴⁾ Costa Junior et al.⁽¹⁵⁾ e Silva.⁽¹⁶⁾

2.2 Metodologia

Os ensaios e técnicas empregados são os ensaios de resistência à compressão de acordo com a NBR 5739/1994, a determinação da profundidade de carbonatação natural por aspersão de fenolftaleína e a resistência ao ataque de cloretos de acordo com a metodologia da norma ASTM C1202/97.

2.2.1 Dosagem do concreto

A dosagem do concreto é estabelecida em concordância com a metodologia de Helene e Terzian.⁽¹⁷⁾ Os traços foram obtidos para abatimento igual a (70 ± 10) mm, utilizando-se como aglomerantes o cimento CP II E-32, o cimento CP III-32-RS e a mistura de cimento CP III-32-RS mais escória de alto forno (CP III-32-RS+e) (proporção de 1:1 em massa), com classes de resistência de 20 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa. O desvio padrão adotado é igual a 4 MPa.

Quadro 1. Traços, em massa, dos concretos em estudo ⁽¹⁴⁾

Diagramas	Traços em massa (mat. cimentício: areia: brita 0:brita 1: a/mat. cim)			
CP II E-32	T1	T4	T7	T10
	1:2,99:1,63:1,63:0,63	1:2,10:1,27:1,27:0,49	1:1,74:1,12: 1,12:0,44	1: 1,43: 0,99: 0,99: 0,39
CP III-32-RS	T2	T5	T8	T11
	1:3,57:1,87:1,87:0,75	1:2,88:1,59:1,59:0,61	1:2,60: 1,47: 1,47:0,56	1: 2,35: 1,37: 1,37: 0,52
CP III-32-RS+ e	T3	T6	T9	T12
	1:3,07:1,66:1,66:0,63	1:2,14:1,28:1,28:0,49	1: 1,76:1,13: 1,13:0,44	1: 1,43: 0,99: 0,99:0,39

2.2.2 Resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão axial, foram moldados 4 corpos-de-prova de concreto, dimensão 10 cm x 20 cm, para cada idade, com os traços estabelecidos pela curva de dosagem. Após a moldagem, os corpos-de-prova permaneceram nas formas até a idade de um dia, depois foram desmoldados e submetidos à cura úmida até a idade de 28 dias.

2.2.3 Carbonatação natural

Para os ensaios de carbonatação, foram efetuadas 72 medições da profundidade de carbonatação natural para cada traço e idade na **etapa 1** e 32 medições para cada traço e idade na **etapa 2**. Após a moldagem, os corpos-de-prova permaneceram nas formas até a idade de 1 dia. Nesta idade, foram desmoldados e submetidos imediatamente a duas condições de cura:

Etapa 1 - cura úmida até a idade de 15 dias.⁽¹⁴⁾

Etapa 2 - cura úmida até a idade de 28 dias.⁽¹⁶⁾

Após a cura úmida, os corpos-de-prova foram submetidos à cura ao ar nas seguintes condições:

Etapa 1 - os corpos-de-prova submetidos à cura úmida de 15 dias foram colocados em ambiente controlado de laboratório (câmara seca), umidade da ordem de 50% e temperatura $(26 \pm 5)^\circ\text{C}$, Com 63, 77, 91 e 365 dias de idade, cada corpo-de-prova foi removido da câmara seca, seccionado transversalmente, e retirada uma seção com espessura aproximada de 5 cm. Na seção recém fraturada foi medida a profundidade de carbonatação pela aspersão da solução de 1% de fenolftaleína em 100 ml de etanol.

Etapa 2 - os corpos-de-prova submetidos à cura úmida até a idade de 28 dias foram colocados em ambiente de laboratório sem controle da umidade e temperatura. Com 365 dias de idade, cada corpo-de-prova foi seccionado transversalmente, e retirada uma seção com espessura aproximada de 5 cm e procedeu-se o ensaio de carbonatação igual ao da etapa 1. Difusão de íons cloreto

O ensaio consiste em submeter uma amostra de 50 mm de espessura à passagem de uma corrente elétrica por um período de 6h submetida a uma diferença de potencial de 60V. Esta amostra é extraída do terço médio de um corpo-de-prova cilíndrico com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento. As amostras de concreto são dispostas em células, de forma que uma de suas extremidades fique imersa em solução de hidróxido de sódio e a outra em uma solução de cloreto de sódio.

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

3.1 Carbonatação Natural

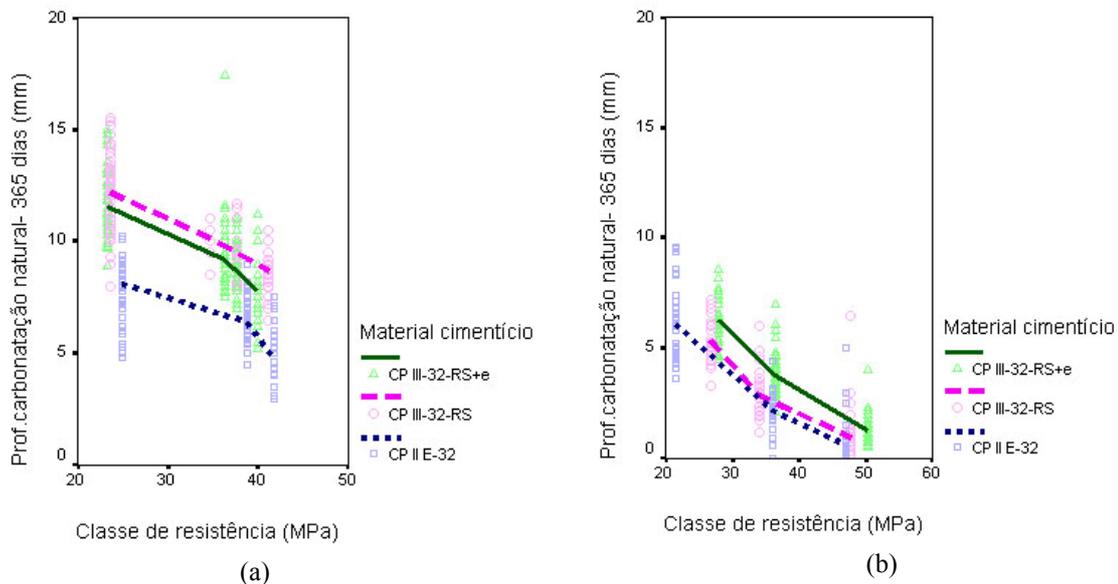
Os resultados encontram-se na Tabela 1.

Com os resultados de resistência à compressão média e o desvio padrão da Tabela 1 calcula-se as respectivas classes de resistência para cada concreto e traça-se os gráficos da Figura 1.

Tabela 1. Resultados de carbonatação natural (365 dias) e resistência à compressão (28 dias).

Concreto	a/mat cim.	Etapa 1		Etapa2	
		Prof. carb. (mm)*	Resistência (MPa)*	Prof. carb. (mm)*	Resistência (MPa)*
T1	0,632	7,9(1,2)	26,17(0,73)	6,296(1,69)	23,08(0,90)
T2	0,750	12,2(1,5)	26,41(1,68)	5,38(1,02)	28,40(1,02)
T3	0,630	11,6(1,38)	25,16(1,12)	6,32(1,12)	29,33(0,82)
T4	0,496	6,0(0,68)	39,68(0,58)	2,17(0,83)	36,98(0,58)
T5	0,619	10,1(1,82)	37,78(1,89)	3,00(1,06)	37,45(2,05)
T6	0,495	9,2(1,45)	38,08(1,04)	3,91(1,07)	38,53(1,25)
T7	0,441	6,0(0,68)	39,37(1,30)	-	-
T8I	0,56	9,0(0,84)	40,01(1,46)	-	-
T9	0,440	8,8(0,84)	40,75(2,03)	-	-
T10	0,392	4,8(1,37)	44,74(1,81)	0,77(1,05)	48,73(1,06)
T11	0,52	8,4(1,08)	43,46(1,37)	1,21(1,99)	51,78(2,44)
T12	0,39	7,8(1,54)	43,76(2,27)	1,33(0,72)	53,65(2,02)

*média (desvio padrão)

**Figura 1.** Carbonatação natural aos 365 dias em função da classe de resistência: (a) etapa 1; (b) etapa 2.

Inicialmente, na análise destes resultados, deve-se considerar que em ambientes internos e protegidos dos ciclos de molhagem e secagem, de acordo com os resultados de diversas pesquisas,⁽¹⁸⁻²⁰⁾ a profundidade de carbonatação do concreto é cerca de 1,69 a 3 (três) vezes maior do que em ambientes externos.

Deve-se ressaltar a importância da umidade interna, que segundo as diversas pesquisas,⁽²¹⁻²³⁾ não pode ser avaliada com base na umidade relativa do ambiente, devido à sua constante variação.

Assim sendo, nos ensaios de carbonatação natural, no ambiente controlado de laboratório deste projeto experimental, com cerca de 50% de umidade relativa e temperatura variando na faixa de 21°C a 27°C, foram estabelecidas condições que favoreceram o mecanismo da carbonatação.

Nesse sentido, esperavam-se medidas das profundidades de carbonatação natural que superassem àquelas em condições reais de serviço do concreto como as

profundidades de carbonatação encontradas por Silva.⁽¹⁶⁾ Assim as profundidades de carbonatação natural com ambiente controlado de Bourguignon⁽¹⁴⁾ foram cerca de 1,25 a 6,23 vezes para o cimento CP II E-32, de 2,26 a 6,94 vezes para o cimento CP III-32-RS e 1,8 a 5,86 vezes para a mistura de cimento CP III-32-RS + escória maior do que em ambiente natural sem controle de umidade e temperatura. Deve-se observar que os concretos com maior resistência têm uma melhora sensível na resistência ao ataque de CO₂ quando se aumenta o tempo de cura úmida e com a cura ao ar em ambiente natural sem controle de umidade e temperatura.

Por outro lado, observa-se que o menor tempo de cura úmida da etapa 1 e com a cura ao ar em ambiente controlado de umidade e temperatura, provavelmente, proporcionou maior secagem e menor hidratação do cimento CP III-32-RS das misturas com somente esse cimento e que tinham maior relação água/ material cimentício, propiciando maiores profundidades de carbonatação que as outras misturas.

Entretanto, quando se aumentou o tempo de cura úmida e com a cura ao ar em ambiente de laboratório sem controle de umidade e temperatura, observou-se uma tendência de profundidades de carbonatação crescentes com o teor de escória das misturas. Assim, nessas condições, nas misturas com somente o cimento CP III-32-RS, apesar da maior relação água/ material cimentício, proporcionaram maior hidratação do cimento. Além disso, as diferenças de profundidades são muito pequenas, variando na ordem de 1mm.

3.2 Difusão de Íons Cloreto

Os valores médios obtidos para a difusão de íons cloretos para cada traço de concreto em estudo são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultado médio da difusão de íons cloretos para os concretos em estudo.

Traço	Carga passante + desvio padrão (C) – 63 dias			
	T1	T4	T7	T10
CP II E-32	2328 (399,41)	1359 (253,82)	2983 (376,29)	2446 (169,36)
CP III-32-RS	T2	T5	T8	T11
	2051 (414,38)	1352 (173,40)	2185 (87,16)	1818 (167,57)
CP III-32-RS + e	T3	T6	T9	T12
	850 (89,27)	522 (108,96)	1201 (105,53)	

O comportamento das diferentes classes de concreto estudadas, em função dos três tipos de materiais cimentícios utilizados (CP II E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS+escória é apresentado na Figura 2.

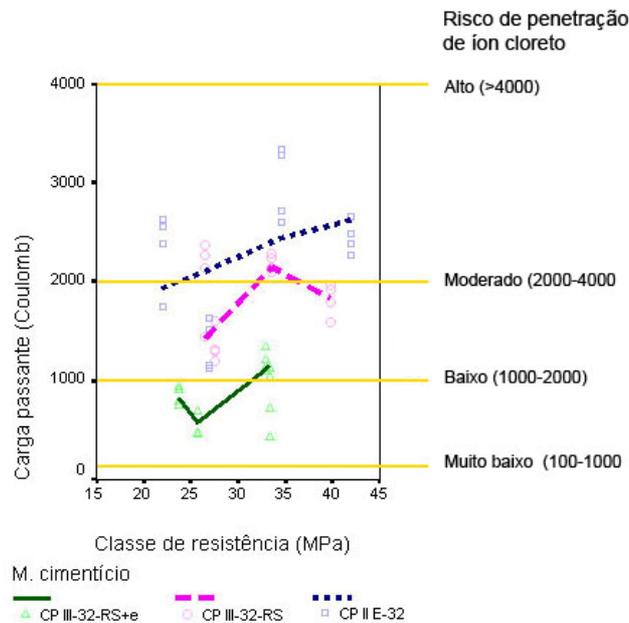


Figura 2. Carga passante aos 63 dias, para as classes de concretos estudadas, para os três diferentes tipos de materiais cimentícios.

Os resultados de Costa Junior et al.⁽¹⁵⁾ analisados com base no risco de penetração de íons cloreto da norma ASTM C 1202 para todas as classes de resistência utilizando material cimentício CP III-32-RS+escória apresentaram um risco de penetração do íon cloreto de muito baixo a baixo, caracterizando-os como mais resistente à penetração de cloretos ou que possuem baixa permeabilidade aos íons cloreto.

Segundo Costa Junior et al.⁽¹⁵⁾ os demais concretos apresentaram um moderado risco de penetração de cloretos, variando os valores médios em função da classe de resistência, material cimentício e relação água / materiais cimentícios.

Desta forma, verifica-se que quanto maior o teor de escória mais resistente é o concreto a penetração de cloretos.⁽²⁴⁻²⁷⁾

4 CONCLUSÕES

A produção do concreto com elevados teores de escória granulada de alto-forno revelou-se viável do ponto de vista técnico uma vez que estes concretos apresentam excelente resistência ao ataque de íons cloreto além das profundidades de carbonatação poderem ser minimizadas por meio do aumento do tempo de cura e da menor relação água/ material cimentício.

Do ponto de vista ambiental, o aproveitamento da escória minimiza os problemas ambientais decorrentes da produção do clínquer de cimento Portland.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), à FINEP e ao CNPq por fomentar este trabalho. Agradecem, também, à Fábrica de Cimento Nassau, a Mizu por fornecer os materiais.

REFERÊNCIAS

- 1 JOHN, V. M. **Cimentos de Escória Ativada com Silicatos de Sódio**, Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- 2 IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia. Disponível em: <<http://www.ibs.org.br/estatisticas2.asp>> acesso em 10 de fevereiro de 2006.
- 3 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 1974-2000**. Gothenburg, 1997.
- 4 GLASSER, F. P. *Chemical, Mineralogical, and Microstructural Changes Occurring in Hydrated Slag-Cement Blends*. In: Materials science of concrete. Ed. Skalny, **American Ceramic Society**. 1989. v. II, p.41-81.
- 5 METHA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.
- 6 ISAIA, Geraldo Cechella *et al.* Como diminuir a despassivação da armadura e aumentar o desempenho estrutural com altos teores de adições minerais e cal hidratada. In Simpósio Epusp sobre estruturas de concreto. **Anais**. USP. São Paulo. 2003.
- 7 MATALA, S. Carbonation mechanism in the granulated blast furnace slag concrete. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 10 th. **Proceedings**, Detroit, p.1-30, 1994.
- 8 HOUST, Y. F., WITTMANN, F. H. Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation. **Cement and Concrete Research**. V32, p. 1923 –1930, 2002.
- 9 HÄKKINEN, Tarja. *The influence of slag content on the microstructure, permeability and mechanical properties of concrete*. Part 2.. **Cement and Concrete Research**, 1993, v. 23, p. 518-530.
- 10 BAUER, Elton. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- 11 SURYAVANSHI, A. K.; SWAMY, R. NARAYAN. **Stability of Friedel's salt in carbonated concrete structural elements**. **Cement and Concrete Research**, v.26, n.5, p.729-741, 1996.
- 12 COELHO, Maria Antonina Magalhães. **Contribuição ao estudo da carbonatação e retração em concretos com elevados teores de escória de alto forno**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. Vitória, 2002.
- 13 HELENE, P. R. do L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1993.
- 14 BOURGUIEGNON (2004)
- 15 COSTA JUNIOR, M. P. da; SILVA; M. G.; PINHEIRO, S. M.de M.; SOUZA, F.L.dos S.; COELHO, M. A. M.; MORIMOTO, T. Concretos com altos teores de escória de alto-forno: Avaliação da carbonatação e da difusão de íons cloreto. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Recife, 2005.
- 16 SILVA, Maristela Gomes. Concreto de alto desempenho com elevados teores de escória de alto-forno: Estratégia para consolidar e ampliar o mercado da escória de alto-forno. Relatório técnico (em conclusão). NEXES - Núcleo de excelência em escórias siderúrgicas. Universidade Federal do Espírito Santo. 2006.
- 17 HELENE, P. TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo. Pini. 1º Ed. 1993. 349 p.

- 18 LITVAN, G.G., MEYER, A. Carbonation of granulated blast-furnace slag cement concrete during twenty years of field exposure. In: Second International Conference of the Use of Fly ash, Silica Fume, and Slag & Other By-products in Concrete. V. M. Malhotra Editor. **Proceedings**. Madri, Espanha, p 1445-1462, 1986.
- 19 RICHARDSON, Mark G. **Carbonation on Reinforced Concrete**, CITIS LTD, Dublin, 1988.
- 20 STEFFENS, Alexander; DINKLER, Dieter; AHRENS, Hermann. Modeling carbonation for corrosion risks prediction of concrete structures. *Cement and Concrete Research*, v. 32, p. 935-941, 2002.
- 21 AL-KADHIMI, T. K. H.; BANFILL, P. F. G.; MILLARD, S. G.; BUNGEY, J. H. An accelerated carbonation procedure for studies on concrete. **Advances in Cement Research**, v. 8, n. 30, p. 47-59, 1995.
- 22 ANDRADE, C.; SARRÍA, J.; ALONSO, C. Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering, *Cement and Concrete Research*, v.29, 1249–1259, 1999.
- 23 ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M. A. GASTALDINI, A. L. Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar. In: 43º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Foz de Iguaçu, 2001.
- 24 SINVASUNDARAM, V.; MALHOTRA, V. M. Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of ground granulated slag. **ACI Materials Journal**, 1992, Nov-Dez, p. 554-563
- 25 ASHBY, J. B. **Slag Cement and Slag Aggregate in High-Performance Concrete**. Symposium International Sur Les Bétons à Haute Performance Et de Poudres Réactives. Canadá, p. 63-65. 1998.
- 26 REGATTIERI, C. E.. **Contribuição ao estudo da influência da dosagem do concreto na absorção capilar e penetração de íons cloreto**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- 27 LUO, R. *et al.* **Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete**. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 2003, p. 1-7.

BIBLIOGRAFIA

- 1 BOURGUIGNON, K. M. B. G; SILVA; M.G.; SOUZA. **Influência da resistência à compressão na carbonatação de concretos com diferentes teores de escória de alto-forno**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. Vitória, 2002.
- 2 CASTRO, A., FERREIRA, R., LOPES, A., CASCUDO, O., CARASEK, H. Durabilidade de concretos com adições minerais frente a carbonatação e ao ataque por cloretos. In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Volume VI - Projeto de Estruturas de Concreto, pg. VI.662 - VI.680. Florianópolis-SC, 14 a 18 de agosto de 2004.
- 3 MALHOTRA, V. M. Properties of fresh and hardened concrete incorporating ground, granulated blast-furnace slag. In: Supplementary Cementing Materials for Concrete. **Proceedings**. Ottawa, p. 291-333, 1987.
- 4 MEUSEL, J. W.; ROSE, J. H. Production of granulated blast furnace slag at Sparrows Point, and the workability and strength potential of concrete incorporating the slag. In: First International Conference on The use of Fly ash, Silica Fume, Slag and other Mineral By-Products in Concrete. SP-79. American Concrete Institute. Proceedings. Detroit, 1983. p. 867-890.