

CONCRETO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO ATIVADA QUIMICAMENTE: MATERIAIS, PROPRIEDADES E AVALIAÇÃO AMBIENTAL¹

Maria Antonina Magalhães Coelho²
Maristela Gomes da Silva³
Fernando Lordêllo dos Santos Souza⁴
Robson Sarmiento⁵
Eliana Zandonade⁶
Tsutomu Morimoto⁷
José Luiz Helmer⁸

Resumo

O objetivo deste trabalho é produzir blocos para estrutura hidráulica do tipo quebra-mar em concreto utilizando escória de alto-forno ativada quimicamente em substituição ao cimento, escória granulada de alto-forno como agregado miúdo e escória bruta de alto-forno, como agregado graúdo. O concreto deve atender às solicitações de tensões internas de flexão e de torção e à facilidade de produção, deve ter propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade adequadas ao seu uso e ser ambientalmente correto. A forma dos blocos foi pesquisada entre várias formas utilizadas no mundo. Foram avaliadas as propriedades de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e por compressão diametral, massa específica, absorção de água e índice de vazios, absorção de água por capilaridade, módulo de deformação, retração por secagem, resistência ao ataque de sulfatos e resistência à penetração de íons cloreto. Blocos ficaram em ambiente marinho durante 1 ano para avaliação da durabilidade e contagem de número de organismos marinhos na sua superfície. Ao mesmo tempo, outros ficaram imersos em tanques com água do mar, para avaliação ambiental. A forma do bloco foi definida como *hydrus*, atendendo aos requisitos de projeto. A avaliação das propriedades do concreto mostrou melhores resultados, ou resultados equivalentes, para o concreto de escória de alto-forno ativada quimicamente, em comparação ao concreto de referência. A classificação e contagem de organismos marinhos na superfície dos blocos e a comprovação da qualidade da água, indicam que o material utilizado não prejudica o meio ambiente.

Palavras-chave: Concreto; Escória de alto-forno; Ativação química; Estrutura hidráulica.

ALKALI ACTIVATED SLAG CONCRETE: MATERIALS, PROPERTIES AND ENVIRONMENTAL EVALUATION

Abstract

The aim of this work is to produce blocks for hydraulic structure in concrete using alkali activated slag (AAS) as cement, granulated slag of blast furnace as fine aggregate and air-cooled blast furnace slag as coarse aggregate. The concrete compressive strength must absorb the stress caused by flexure and torsion from the locks between the units of the breakwater. The project was developed in order to comply with the physical, mechanical and durability requests according to Brazilian standards. Literature was consulted in order to select the shape and geometry to build the hydraulic structure. Mechanical, physical and durability concrete properties were investigated such as flexural strength, tensile splitting strength, absorption of water by capillary forces, water absorption and percentage of voids. Blocks had been in marine environment during 1 year for evaluation of the durability and counting of number of marine organisms in its surface. Mean while, samples were immersed in a tank simulating marine environment where the water pH was monitored. The evaluation of the properties of the concrete showed better results, or equivalents, for the alkali activated slag concrete, in comparison to the reference concrete. The classification and counting of marine organisms in the surface of the blocks and the evidence of the quality of the water indicate that the used material does not harm the environment.

Key words: Alkali-activated slag concrete; Blast furnace slag; Concrete armor; Marine environment.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Pesquisadora do NEXES, Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas do Centro Tecnológico da UFES, MCs, Profa. No curso de Arquitetura da UNIVIX e Profa. no curso de Eng. de Produção Civil da UCL,

³ Pesquisadora do NEXES; Doutora, Professora e Diretora do Centro Tecnológico da UFES,

⁴ Pesquisador do NEXES; MCs, Professor do Centro Tecnológico da UFES,

⁵ Pesquisador do NEXES; Doutor.

⁶ Pesquisadora do NEXES; Doutora, Professora do Departamento de Estatística da UFES

⁷ Especialista em Meio Ambiente da Companhia Siderúrgica de Tubarão.

⁸ Pesquisador do NEXES, Professor.

1 INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica gera escória de alto-forno como subproduto na fabricação do aço. A escória granulada de alto-forno, obtida após resfriamento rápido, tem hidraulicidade latente e sua energia interna é usada na formação de produtos hidratados muito semelhantes aos obtidos na hidratação do cimento Portland.

Nas últimas décadas, a maior conscientização das questões ambientais e as políticas estatais sobre preservação ambiental vêm fazendo com que surjam novas propostas de reciclagem de resíduos e de redução da quantidade de resíduos gerados. Dentre os benefícios ambientais, merecem destaque a redução do volume escavado de jazidas para a produção de cimento e agregados e, conseqüentemente, a diminuição da degradação da camada vegetal, redução da utilização de explosivos que geram partículas em suspensão no ar, diminuição de liberação de dióxido de carbono no ar atmosférico e diminuição de áreas necessárias ao descarte de resíduos industriais.^(1,2)

Neste estudo a escória de alto-forno foi usada sob suas diferentes apresentações, isto é, moída em substituição ao cimento Portland, na forma granulada como agregado miúdo e na forma bruta, devidamente britada, como agregado graúdo. A utilização de ativadores químicos para produção de concretos de escória vem sendo pesquisada apresentando resultados como boa resistência nas primeiras idades com baixo calor de hidratação e alta durabilidade dos concretos.⁽³⁻⁵⁾ O objetivo deste trabalho foi avaliar e selecionar um ativador químico para a escória de alto-forno moída. Este estudo abrange, também, a avaliação das propriedades físicas e mecânicas do concreto e do impacto no meio marinho do material utilizado na confecção dos blocos de estruturas hidráulicas de proteção contra a ação de ondas marinhas.

2 MATERIAIS E METODOLOGIA

2.1 Materiais

Os materiais cimentícios utilizados foram a escória granulada de alto-forno moída e o cimento Portland de alto-forno CP III - 32 RS. O teor de escória granulada de alto-forno no cimento CP III – 32 RS é de 66% (em massa).

O grau de vitrificação da escória granulada de alto-forno é igual a 96%, o índice de refração é igual a 1,65 e a sua natureza é básica. A composição química e as propriedades físicas da escória granulada de alto-forno são compatíveis com dados da literatura.⁽⁶⁻⁸⁾ As propriedades físicas estão de acordo com as prescrições das normas brasileiras e com estudos realizados por outros autores.^(6,8-11)

Como agregado miúdo foi empregada escória granulada de alto-forno, estando suas características físicas de acordo com os requisitos prescritos nas normas brasileiras para agregados miúdos e de acordo com dados da literatura, apresentando, no entanto, forma angulosa.^(6,8,10) Como agregado graúdo foi empregada escória bruta de alto-forno britada nas granulometrias da brita 1 e da brita 2. Apresenta estrutura porosa em alguns grãos o que torna o material heterogêneo.

Os materiais utilizados como ativadores são a cal hidratada CH I, a gipsita e o silicato de sódio, tendo sido a gipsita moída em moinho de bolas em laboratório e utilizada na finura menor que 0,075 mm.

2.2 Metodologia

Na seleção da geometria optou-se por uma forma robusta para os blocos que atenda às tensões internas de flexão e de torção e à facilidade de produção, como a moldagem e desforma.⁽⁹⁾ A geometria pertence à família de formas denominada bulky, e está mostrada na Figura 1.

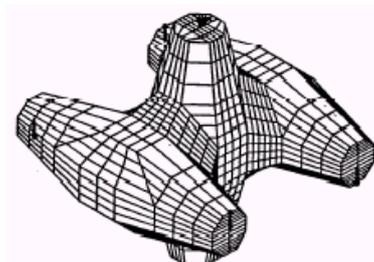


Figura 1 - Bloco da estrutura hidráulica de contenção de ondas.⁽⁹⁾

O projeto experimental foi desenvolvido para que a estrutura hidráulica atenda ao requisito de durabilidade, conforme as especificações da NBR 6118/2003.

A dosagem do concreto foi realizada pelo método do ACI (American Concrete Institute) e como parâmetro de resistência foi prevista, na dosagem, 46,6 MPa à idade de 28 dias, considerando um desvio padrão de 4 MPa. Os ativadores químicos utilizados foram selecionados em estudo prévio, dentre vários ativadores usados por diferentes autores.^(3,4,11-16)

Foram, então, confeccionadas 7 misturas com os ativadores selecionados, estando os teores dos materiais cimentícios e dos tipos de ativadores utilizados nestas misturas apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Teores de materiais cimentícios e de ativadores utilizados nas misturas.

Traço	Materiais cimentícios / Ativador (%)				
	CP III – 32 RS	Escória moída	Silicato de sódio	Cal CH I	Gipsita
A	50	50	-	-	-
B	23,5	68,5	-	8	-
C	29,4	70,6	-	10	-
D3 (3% de Na ₂)	-	78,5	16,5	5	-
D4 (4% de Na ₂)	-	71,4	23,6	5	-
D5 (5% de Na ₂)	-	67,5	27,5	5	-
E	-	92	-	2	6

O traço dosado foi utilizado em todas as 7 misturas sendo, então, realizados ensaios de abatimento do concreto e moldagem de corpos-de-prova cilíndricos (100x200)mm para realização de ensaios de resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias, sendo 4 corpos-de-prova para cada idade.

Para os traços selecionados foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com (100x200)mm para avaliação das propriedades aos 7 e 28 dias para os ensaios de resistência à compressão axial, massa específica, absorção de água, índice de vazios e resistência à tração por compressão diametral segundo os métodos preconizados pela ABNT. Os corpos-de-prova foram mantidos em cura úmida até completar 28 dias. Os ensaios foram realizados, também, aos 365 dias.

Para os ensaios realizados após 1 ano, além dos corpos-de-prova moldados, foram confeccionados 10 blocos da estrutura hidráulica de proteção contra a ação das ondas do mar, para cada tipo de mistura, e que ficaram em ambiente marinho, como mostra a Figura 2a. Corpos-de-prova foram colocados em tanque com água do mar, simulando o movimento de maré, mostrados na Figura 2b e outros corpos-de-prova ficaram em câmara úmida (Figura 2c) por 1 ano. Após este período, foram retirados testemunhos dos blocos para a realização dos ensaios.



Figura 2 – (a) Blocos em ambiente marinho; (b) corpos-de-prova em tanque simulando o ambiente marinho; (c) Corpos-de-prova na câmara úmida.

Para avaliação do impacto que a estrutura poderia causar ao meio ambiente marinho foram utilizados dois tanques dotados de sistema de bombeamento para simulação do efeito de marés, cada tanque com um bloco confeccionado com concreto diferente.

Foram medidos na água os parâmetros segundo as metodologias do Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater (American Public Health Association 1995) sendo comparados com os parâmetros recomendados pela Resolução 357/2005 do CONAMA. Estes parâmetros foram medidos na água dos dois tanques (Figura 3a) antes de receberem cada bloco e após um ano em contato com eles.

Como complementação, foi medido o pH da água semanalmente durante 1 ano.

A caracterização da incrustação biológica marinha foi feita nos 10 blocos da estrutura hidráulica de proteção contra a ação das ondas do mar que ficaram em ambiente marinho por 1 ano (Figura 3b). Esta caracterização foi realizada através da análise do nível taxonômico, sendo realizada uma listagem em uma ordem sistemática.



Figura 3 – a) Blocos em tanques simulando o ambiente marinho; b) blocos em ambiente marinho.

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

3.1 Seleção do Ativador Químico

Os resultados de abatimento do concreto fresco e de resistência à compressão são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1- Abatimento do concreto fresco e resistência à compressão dos concretos com diferentes tipos de ativadores.

No. Traço	Abatimento (mm)	Resistência à compressão (MPa)	
		7 dias	28 dias
A	110	28,5	36,1
B	50	18,0	25,1
C	70	17,6	24,8
D3	190	17,6	22,1
D4	70	41,4	48,4
D5	150	46,8	49,7
E	30	13,0	16,2

Observa-se na Tabela 1 que os resultados das resistências à compressão encontrados para as misturas produzidas com silicato de sódio + cal apresentaram valores maiores do que as resistências encontradas para as misturas que utilizaram clínquer + cal (misturas B e C) e cal + gipsita (mistura E) como ativadores, com exceção da mistura D3.

Para as resistências à compressão das misturas D3, D4 e D5 (silicato de sódio + cal), observa-se que as resistências encontradas para a mistura D3, isto é, com 3% Na₂O, apresenta valores mais baixos devido, provavelmente, à pequena ativação resultante do teor de sódio utilizado, estando, no entanto, de acordo com resultados encontrados na literatura.^(3,4,11,13,15,16)

A mistura A produzida com escória + clínquer em proporções iguais apresentou resultados de resistência à compressão bastante significativos.

Os valores de resistência à compressão encontrados para as misturas D4 e D5 atendem ao requisito de projeto, no entanto, a mistura D5, com 5% de sódio, apresentou resistência à compressão acima da resistência requerida, sendo, então, selecionada a mistura D4, com 4% de sódio, para ser utilizada na confecção de estruturas hidráulicas de proteção contra a ação de ondas marinhas. Esta mistura apresentou abatimento adequado à moldagem da estrutura.

3.2 Avaliação das Propriedades Físicas e Mecânicas do Concreto

Os melhores resultados de resistência à compressão, à idade de 28 dias, foram obtidos para a mistura D4 (4% Na₂O do silicato de sódio). Este fato pode ser devido à maior eficiência de ativação pelo silicato, neste tempo, quando comparado com a ativação pelo clínquer do cimento CP III - 32 RS da mistura A. Quando comparados no tempo, isto é, aos 28 dias com 1 ano, foi observado aumento de resistência à compressão para a mistura D4 nos corpos-de-prova que permaneceram no tanque e nos testemunhos retirados no comprimento no sentido transversal ao de moldagem (Figura 4). Para a mistura A, todos os resultados de resistência à compressão, para os vários ambientes estudados, apresentaram valores maiores a 1 ano de idade, quando comparados com a resistência à compressão aos 28 dias. Este fato pode ser justificado devido à mistura A (CP III - 32 RS + 50% escória) conter maior

quantidade de material cimentante sem hidratar aos 28 dias e, assim, desenvolver maior ganho de resistência à compressão, ao longo do tempo, através de uma hidratação mais lenta.

Para os valores encontrados de resistência à tração por compressão diametral, não houve diferenças significativas entre a mistura A (CP III – 32 RS + 50% escória) e mistura D4 (escória + silicato de sódio). Quando comparada a sua evolução no tempo, não foram observadas diferenças significativas para a mistura D4 (escória + silicato de sódio). Para a mistura A (50% escória + 50% CP III – 32 RS), foram observados aumentos para os corpos-de-prova que permaneceram no tanque e no mar, após 1 ano. Assim como a resistência à compressão evoluiu com o tempo para a mistura A (50% escória + 50% CP III – 32 RS), o mesmo ocorreu com a resistência à tração por compressão diametral, com exceção dos resultados encontrados com os corpos-de-prova que permaneceram em câmara úmida como pode ser observado na Figura 4.

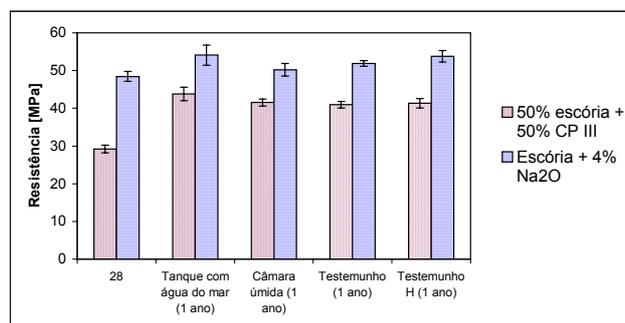


Figura 4 – Resistência à compressão aos 28 dias e a 1 ano em corpos-de-prova expostos em diferentes ambientes e o desvio padrão para cada caso.

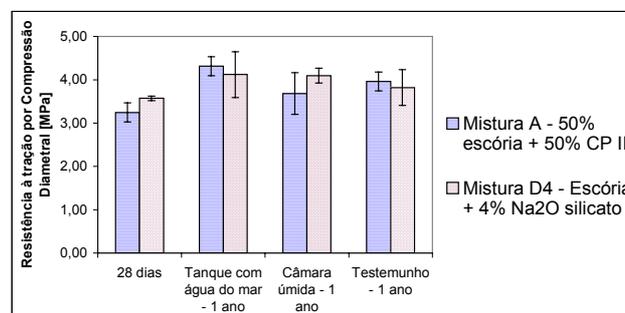


Figura 5 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias e a 1 ano em corpos-de-prova expostos em diferentes ambientes e o desvio padrão para cada caso.

Os valores de massa específica não apresentaram diferenças significativas entre as duas misturas pois foram confeccionadas com, praticamente, os mesmos materiais e mesmas proporções. Quando comparados os resultados de massa específica, obtidos após 1 ano, com os resultados aos 28 dias, verificou-se acréscimo para as duas misturas. Este fato pode ser à maior compactidade devido à continuação de hidratação da escória, como mostra a Figura 6.

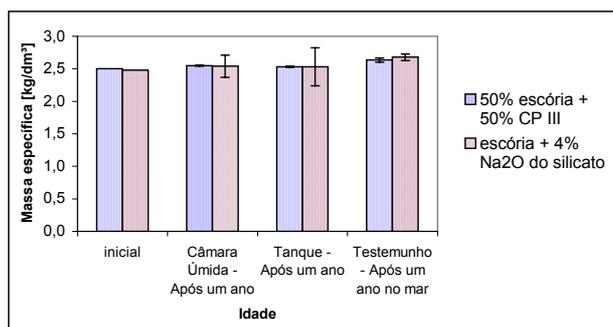


Figura 6 - Massa específica aos 28 dias e a 1 ano em corpos-de-prova expostos em diferentes ambientes e o desvio padrão para cada caso.

A absorção de água foi menor para a mistura D4 (4% Na₂O do silicato de sódio) devido, provavelmente, às propriedades na interface desta mistura que são excelentes, com baixos níveis de porosidade (4). Comparando a absorção após 1 ano com os resultados obtidos aos 28 dias, observou-se um aumento, somente, para a mistura D4 (escória + silicato de sódio), como se pode ver na Figura 7.

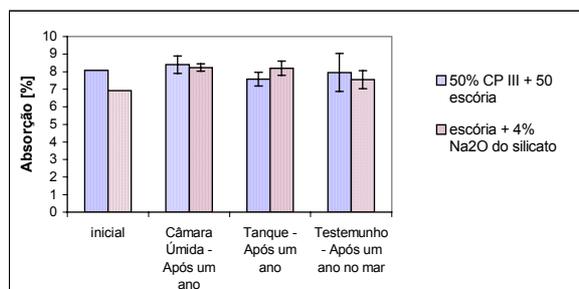


Figura 7 – Absorção aos 28 dias e a 1 ano em corpos-de-prova expostos em diferentes ambientes e o desvio padrão para cada caso.

O índice de vazios se apresentou maior aos 28 dias, para a mistura A (50% CP III – 32 RS + 50% escória) quando comparado com a mistura D4 (4% Na₂O do silicato de sódio). Este fato pode ser devido à menor hidratação da escória pelo clínquer para a mistura A. O índice de vazios aumentou, após 1 ano, para a mistura D4 (escória + silicato de sódio) e manteve-se constante para a mistura A (50% escória + 50% CP III – 32 RS), podendo ser observado na Figura 8.

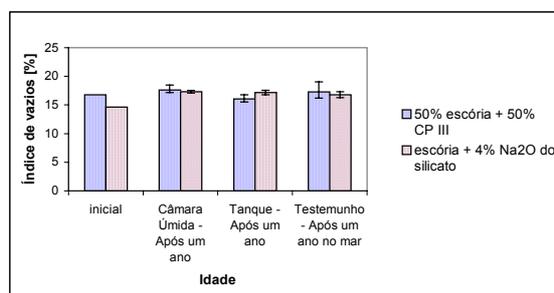


Figura 8 – Índice de vazios aos 28 dias e a 1 ano em corpos-de-prova expostos em diferentes ambientes e o desvio padrão para cada caso.

3.3 Avaliação do Impacto Ambiental

Na água onde se encontrava o bloco hidráulico confeccionado com a mistura D4 (escória + 4% de Na₂O do silicato) observou-se que cádmio, chumbo, cobre, níquel, zinco e manganês estão fora do limite CONAMA, porém, somente o níquel, o chumbo e o manganês apresentaram aumento em sua taxa, comparando a água inicial com a final, enquanto, para os outros parâmetros houve redução.

Os resultados do pH da água dos tanques contendo os blocos com a mistura D4 (escória + 4% de Na₂O do silicato) e o bloco com a mistura A (50% escória + 50% CP III 32-RS) através do pH estão apresentados na Figura 9.

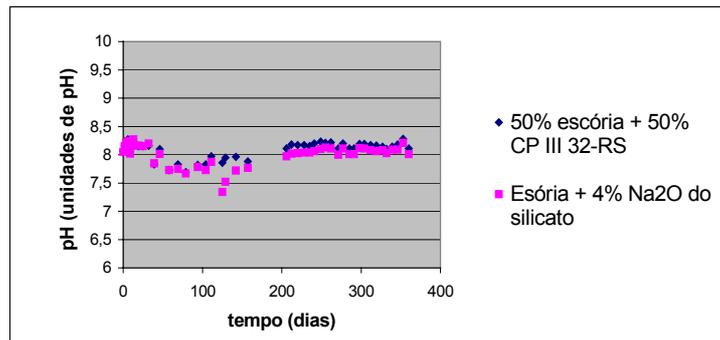


Figura 9 - Evolução do pH com o tempo, para a mistura A (50% escória + 50% CP III 32-RS) e mistura D4 (escória + 4% de Na₂O do silicato).

No início do experimento houve uma tendência de aumento de pH que não foi confirmada com o decorrer do tempo. As variações do pH parecem estar mais ligadas às incertezas do processo de medida do que à dissolução de compostos do bloco, não apresentando variações significativas ao longo do tempo. Assim, não irá alterar o pH do ambiente em que estiver, atendendo à Resolução 357/2005 do CONAMA.

3.4 Caracterização da Incrustação Biológica Marinha

Nos estudos de caracterização e fixação de invertebrados marinhos nos blocos da estrutura hidráulica foram encontrados vinte e quatro (24) táxons pertencentes a dois reinos e sete filos, sendo que três pertencem ao reino Plantae e cinco ao reino Animália.

A biota encontrada nos substratos da mistura A (50% CP III - 32 RS + 50% escória) apresentou um número de espécies variando entre 9 e 20 táxons e cuja média (11,8) foi significativamente ($P=0,005$) maior do que a encontrada nos substratos da mistura D4 (escória + 4% de Na₂O do silicato) onde a média de táxons foi 7 e os valores mínimos e máximos táxons encontrados foi de 5 e 13 respectivamente.

A análise de cluster mostrou que os blocos confeccionados com a mistura D4 (escória + 4% de Na₂O do silicato) se caracterizam por possuírem um menor número de táxons e os blocos confeccionados com a mistura A (50% CP III - 32 RS + 50% escória) possuem um maior número de táxons indicando que as espécies têm mais facilidade em se fixar nele ou, então, por estes blocos terem ficado, por mais tempo, submersos no mar, já que estes blocos ficaram em um nível ligeiramente inferior se comparado aos blocos da mistura D4 (escória + 4% de Na₂O do silicato).

A Figura 11 mostra alguns blocos retirados do ambiente marinho, após 1 ano. Pode-se observar a presença da biota marinha nestes blocos.



Figura 11 - Blocos retirados do ambiente marinho, após 1 ano.

Como os blocos confeccionados com a mistura D4 (escória + 4% de Na₂O do silicato) ficaram em nível mais alto, os dados observados podem refletir, apenas, a posição e não a propriedade para incrustação, pois quanto mais alta na região litorânea estiver um substrato duro, menor será o número de táxon que nele se fixará.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Seleção do ativador químico: Os resultados das resistências à compressão encontrados para as misturas produzidas com silicato de sódio + cal apresentaram valores maiores do que as resistências encontradas para as misturas que utilizaram clínquer + cal (misturas B e C) e cal + gipsita (mistura E) como ativadores, com exceção da mistura D3.

Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do concreto: Comparando a resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral das misturas estudadas verificou-se maiores valores para o concreto da mistura D4. Após 1 ano, a resistência à compressão da mistura A apresentou maior crescimento comparada à mistura D4.

A massa específica não apresentou diferenças significativas entre as duas misturas. A absorção de água foi menor para a mistura D4, porém, após 1 ano, a absorção da mistura D4 apresentou aumento. A absorção de água por capilaridade foi maior para a mistura D4.

Avaliação do impacto ambiental: Os resultados da análise química da água presente no bloco hidráulico confeccionado com a mistura D4 apresentaram cádmio, chumbo, cobre, níquel, zinco e manganês fora do limite CONAMA, porém, somente o níquel, o chumbo e o manganês apresentaram aumento em sua taxa, enquanto, para os outros parâmetros houve redução.

Os resultados do pH das águas onde se encontravam os blocos hidráulicos confeccionados com as duas misturas de concreto não apresentaram variações significativas ao longo do tempo, atendendo à Resolução 357/2005 do CONAMA.

Caracterização da incrustação biológica marinha: Pela avaliação da incrustação biológica marinha sobre os blocos, pode-se considerar que estes, independente se confeccionados com a mistura A ou mistura D4, podem ser usados como recifes artificiais onde a vida marinha se desenvolve naturalmente.

Agradecimentos

Agradecemos à Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST – Arcelos Brasil), à FINEP e ao CNPq por fomentar este trabalho. Agradecemos, também, à Fábrica de Cimento Nassau, à Diaton, à Ical, à Holcim e à Mizu por fornecer os materiais. À toda a equipe de CST.

REFERÊNCIAS

- 1 ALDASORO, Juan C. *Extracción y procesamiento de escórias*. In: Memória Técnica de las primeras Jornadas Técnicas de Escórias Siderúrgicas. SOMISA - Sociedad Mixta Siderurgia Argentina. Anais. Buenos Aires, 1985, p. 33-37.
- 2 JOHN, Vanderley M. Cimentos de Escória Ativada com Silicatos de Sódio. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.
- 3 BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B. *Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete*. Cement and Concrete Research, 2000, v. 30, p. 1367-1374.
- 4 BROUGH, A. R.; ATKINSON, A. *Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars Part I. Strength, hydration and microstructure*. Cement and Concrete Research, v. 32, p. 865-879, 2002.
- 5 SHI, C.; QIAN, J. *High performance cementing materials from industrial slag – a review*. Resources, Conservation and Recycling, Vol. 29, Junho 2000, p. 195-207.
- 6 CINCOTTO, M. A., BATTAGIN, A. F. & AGOPYAN, V. *Caracterização de escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado*. Boletim 65, IPT. São Paulo, 1992.
- 7 ESPER, MÁRIO WILLIAN. *Contribuição ao estudo de algumas propriedades do cimento de alto-forno*. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.
- 8 SCANDIUZZI, Luércio. BATTAGIN, Arnaldo F. *A Utilização da Escória Granulada de Alto Forno como Agregado Miúdo*. Estudo Técnico nº 95. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 1990.
- 9 MELBY, J. A.; TURK, G. F. *Core-Loc Concrete Armor Units*. US Army Corps of Engineers. Waterways Experimental Station. Technical Report CHL-97-4. 1997.
- 10 SILVA, Ernan; ALMEIDA, Carlos de. *Escória de Alto Forno Granulada como Agregado Miúdo para Argamassa e Concreto*. In: I Simpósio Nacional de Agregados. Anais. 1986.
- 11 SILVA, Maristela G. *Influência da cura térmica em pastas e argamassas de cimento de escória*. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- 12 COELHO, M. A. M. *Estudo da carbonatação e retração em concretos de alto desempenho com elevados teores de escória de alto-forno*. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2002. 180 p.
- 13 COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. *Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete*. Cement and Concrete Research, 1999, v. 29, p. 455-458.
- 14 ISAIA, et al. *Como diminuir a despassivação da armadura e aumentar o desempenho do concreto estrutural com altos teores de adições minerais e cal hidratada*. In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de concreto. Anais. 2003. São Paulo. SP. pp. 1-20.
- 15 JOHN, Vanderley M. *Pesquisa e Desenvolvimento de Mercado para Pesquisa*. In: Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Material de Construção Civil. 1996. Anais. 1996.
- 16 SHI, Caijun; DAY, Robert L. *A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements*. Cement and concrete Research, 1995, v. 25, n. 6, p. 1333-1346.