

BLOCO DE CONCRETO TIPO QUEBRA-MAR COM ESCÓRIA DE ALTO-FORNO ATIVADA QUIMICAMENTE

Maria Antonina Magalhães Coelho ¹
 Maristela Gomes da Silva ²
 Fernando Lordêllo dos Santos Souza ³
 Robson Sarmiento ⁴
 Eliana Zandonade ⁵
 Tsutomu Morimoto ⁶
 José Luiz Helmer ⁷

Resumo

O objetivo deste trabalho é discutir a produção de 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. A forma dos blocos utilizada neste trabalho foi selecionada por meio de pesquisas entre várias outras formas de estrutura hidráulica. São 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 um 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 monitoração do pH. A forma do bloco foi definida como *hydrus*, e atende aos requisitos de projeto. A avaliação das propriedades do concreto evidencia melhores resultados, ou resultados equivalentes, para o concreto de escória de alto-forno ativada quimicamente, em comparação ao concreto de referência. A classificação e a 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; Escórias; Estrutura hidráulica.

CONCRETE BREAKWATER ARMOUR BUILT USING ALKALI-ACTIVATED SLAG

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. Literature was consulted in order to select the shape and geometry to build the hydraulic structure. Mechanical, physical and durability concrete properties are investigated such as flexural strength, tense splitting strength, absorption of water by capillary forces water, absorption and percentage of voids. Blocks had stayed in marine environment during one 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 shape of the block was named as *hydrus*, and it meets the design requirements. The evaluation of the properties of the concrete show better results, or equivalent, 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 impact the environment.

Key words: Concrete; Slags; Hydraulic structure.

¹Pesquisadora do NEXES, Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas do Centro Tecnológico da UFES, M. C., Profa. no Curso de Engenharia de Produção Civil da UCL. Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras - 29075-910 - Vitória, ES, Brasil. E-mail: antonina@oi.com.br.

²Pesquisadora do NEXES; Doutora, Professora e Diretora do Centro Tecnológico da UFES. Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras - 29075-910 - Vitória, ES, Brasil. E-mail: margomes@npd.ufes.br.

³Pesquisador do NEXES; M. C., Professor do Centro Tecnológico da UFES. Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras - 29075-910 - Vitória, ES, Brasil. E-mail: fernalor@npd.ufes.br.

⁴Pesquisador do NEXES; Doutor. Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras - 29075-910 - Vitória, ES, Brasil. E-mail: robson.sarmiento@terra.com.br.

⁵Pesquisadora do NEXES; Doutora, Professora do Departamento de Estatística da UFES. Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras - 29075-910 - Vitória, ES, Brasil. E-mail: elianaz@cce.ufes.br

⁶Especialista em Meio Ambiente da Arcelor Mital Tubarão. Av. Brigadeiro Eduardo Gomes, 930, Jardim Limoeiro - 29163-970 - Serra, ES, Brasil. E-mail: morimoto@arcelor.com.br

⁷Pesquisador do NEXES, Professor. Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras - 29075-910 - Vitória, ES, Brasil. E-mail: jlhelmer@uol.com.br.

I INTRODUÇÃO

A escória granulada de alto-forno é um subproduto na fabricação do aço e é obtida após resfriamento rápido. Esta escória tem hidráulidade latente e forma 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.^(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 apresenta resultados como boa resistência nas primeiras idades com baixo calor de hidratação e alta durabilidade dos concretos.⁽³⁻⁵⁾ O objetivo deste trabalho é avaliar e selecionar um ativador químico para a escória de alto-forno moída, avaliar as propriedades físicas e mecânicas do concreto e o impacto no meio marinho de 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.⁽⁶⁻⁷⁾ 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, e suas características físicas estão de acordo com os requisitos prescritos nas normas brasileiras para agregados miúdos e de acordo com dados da literatura, apresentando, no entanto, forma angulosa.^(6,7,9) 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. A gipsita foi moída em moinho de bolas em laboratório e utilizada na granulometria menor que 0,075 mm.

2.2 Metodologia

Na seleção da forma geométrica, optou-se por uma forma robusta para os blocos e que atenda às tensões internas de flexão e de torção e à facilidade de produção, como a moldagem e desforma.⁽⁸⁾ A geometria adotada está mostrada na Figura 1. A dimensão utilizada nos estudos foi de 50 cm para a maior dimensão.

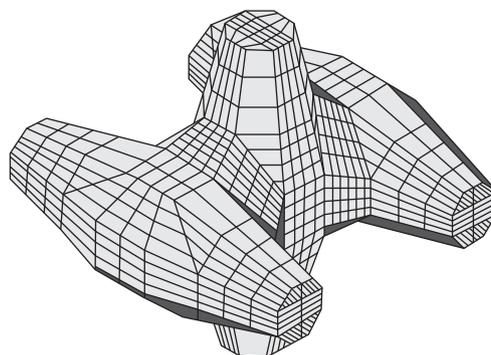


Figura 1. Bloco da estrutura hidráulica de contenção de ondas.⁽⁹⁾

A dosagem do concreto foi realizada pelo método do ACI (*American Concrete Institute*). Como parâmetro de resistência foi prevista, na dosagem, 46,6 MPa à idade de 28 dias, considerando um desvio-padrão de 4 MPa, desenvolvida para atender às especificações da NBR 6118/2003. Os ativadores químicos utilizados foram selecionados em estudo prévio, dentre vários ativadores usados por diferentes autores.^(3,4,10) Foram confeccionadas sete misturas com um mesmo traço. Os teores dos materiais utilizados nestas misturas apresentados na Tabela 1.

Tabela 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	50,0	50,0	-	-	-
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	-	92,0-	-	2	6

Foram realizados ensaios de abatimento do concreto e moldagem de corpos-de-prova cilíndricos (100 x 200 mm) para ensaios de resistência à compressão axial aos sete e 28 dias (quatro corpos-de-prova por idade).

Para os traços selecionados foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com (100 mm x 200 mm) para avaliação das propriedades aos sete dias, 28 dias e 365 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.

Após um ano, além dos corpos-de-prova moldados, foram confeccionados dez 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 um ano. Após este período, foram retirados testemunhos dos blocos para a realização dos mesmos ensaios realizados para os corpos-de-prova.

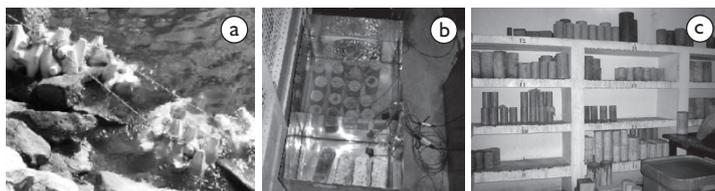


Figura 2. a) Blocos em ambiente marinho; b) corpos-de-prova em tanque simulando o ambiente marinho; c) corpos-de-prova na câmara úmida.

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 *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*⁽¹⁴⁾ sendo comparados com os parâmetros recomendados pela Resolução 357/2005 do CONAMA.⁽¹⁵⁾ 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, o pH da água foi medido semanalmente.

A caracterização da incrustação biológica marinha foi feita nos dez blocos que ficaram em ambiente marinho por 1 ano (Figura 3b). Esta caracterização foi realizada pela análise do nível taxonômico.

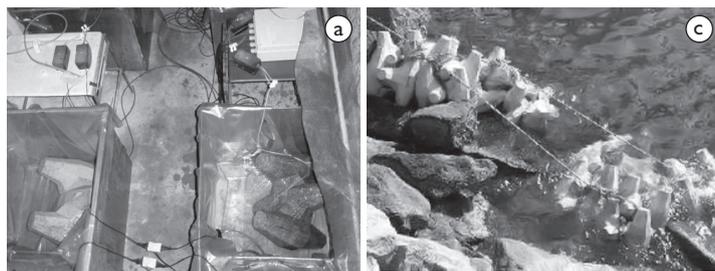


Figura 3. a) Blocos em tanques simulando o ambiente marinho; b) blocos em ambiente marinho.

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 2.

Tabela 2. Abatimento do concreto fresco e resistência à compressão dos concretos

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 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. A resistência à compressão encontrada para a mistura D3, isto é, com 3% Na₂O, quando comparada às misturas D4 e D5, apresenta valor mais baixo devido, provavelmente, à pequena ativação resultante do teor de sódio utilizado, estando, no entanto, de acordo com resultados encontrados na literatura.^(3,4,10,12)

A mistura A produzida com escória + clínquer, em proporções iguais, apresenta 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, apresenta resistência à compressão acima da requerida, sendo, então, selecionada a mistura D4, 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, são obtidos para a mistura D4. 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 um ano, observa-se 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, apresentam valores maiores a um ano de idade, quando comparados com a resistência à compressão aos 28 dias. Este fato pode ser justificado devido à mistura A 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 há diferenças significativas entre a mistura A e a mistura D4 (Figura 5). Quando comparada a sua evolução no tempo, não são observadas diferenças significativas para a mistura D4. Para a mistura A, são observados aumentos para os corpos-de-prova que permaneceram no tanque e no mar, após um ano. Assim como a resistência à compressão evoluiu com o tempo para a mistura A, 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.

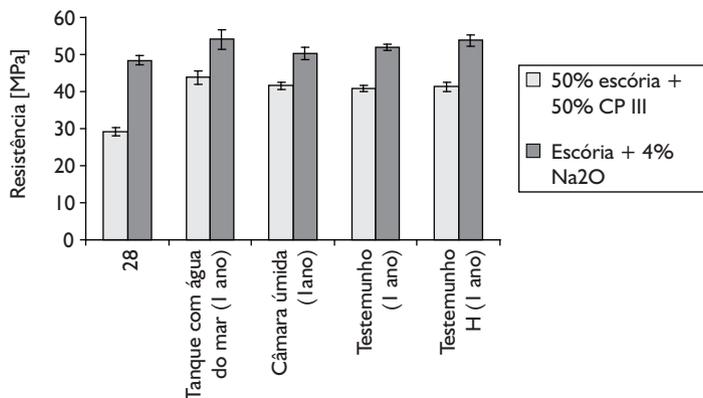


Figura 4. Resistência à compressão aos 28 dias e para um ano em corpos-de-prova expostos em diferentes ambientes e o desvio-padrão para cada caso.

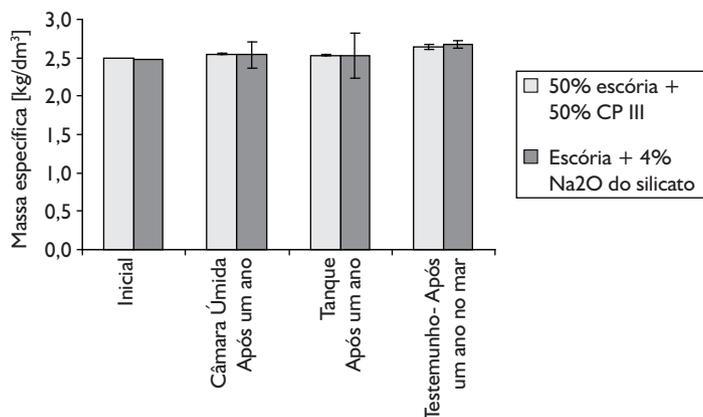


Figura 5. Massa específica aos 28 dias e para um ano em corpos-de-prova expostos em diferentes ambientes e o desvio-padrão para cada caso.

Os valores de massa específica não apresentam diferenças significativas entre as duas misturas pois foram confeccionadas com praticamente os mesmos materiais e mesmas proporções⁽¹³⁾ (Figura 5). Após um ano, verificou-se acréscimo para as duas misturas devido à continuação de hidratação da escória ficando com maior compactidade.

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 um ano com os resultados obtidos aos 28 dias, observa-se um aumento, somente para a mistura D4 (escória + silicato de sódio),⁽¹³⁾ como se pode verificar na Figura 6.

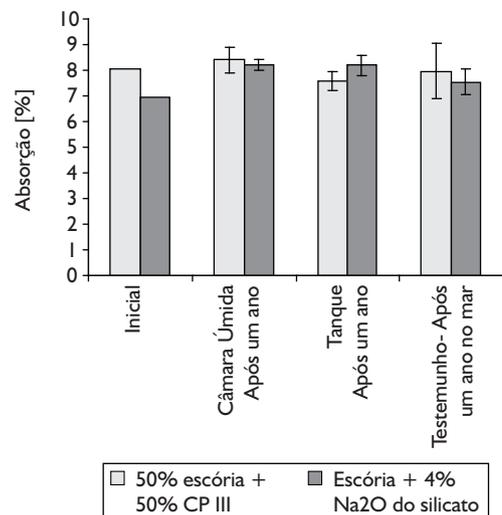


Figura 6. Absorção aos 28 dias e para um ano em corpos-de-prova expostos em diferentes ambientes e o desvio-padrão para cada caso.

O índice de vazios apresenta-se 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 um ano, para a mistura D4 (escória + silicato de sódio) e manteve-se constante para a mistura A (50% escória + 50% CP III - 32 RS),⁽¹³⁾ podendo ser observado na Figura 7.

3.3 Avaliação do Impacto Ambiental

Na água onde se encontrava o bloco confeccionado com a mistura D4 (escória + 4% de Na₂O do silicato) observou-se que cádmio, chumbo, cobre, níquel, zinco e manganês estão

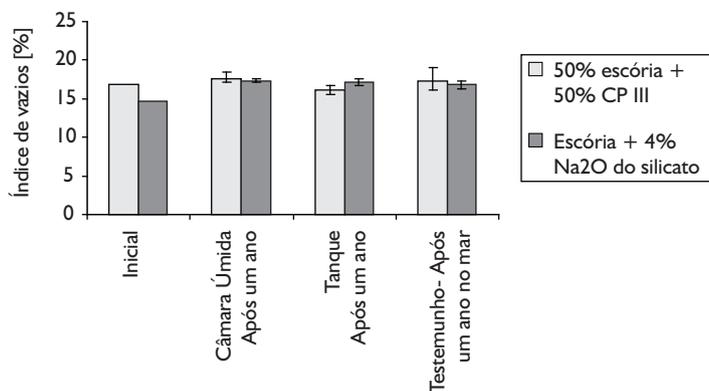


Figura 7. Índice de vazios aos 28 dias e para um ano em corpos-de-prova expostos em diferentes ambientes e o desvio-padrão para cada caso.

fora dos limites estabelecidos pelo CONAMA;⁽¹⁴⁾ porém, somente o níquel, o chumbo e o manganês apresentam aumento em sua taxa, comparando a água inicial com a final, enquanto para os outros parâmetros há redução.

Os valores do pH medidos nas águas dos tanques contendo os diferentes blocos estão apresentados na Figura 8. Pode-se verificar que não ocorrem variações significativas com o tempo.

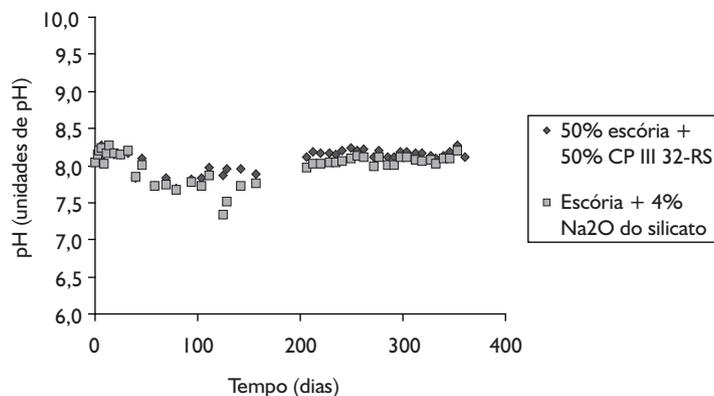


Figura 8. Evolução do pH com o tempo, para a mistura A (50% escória + 50% CP III 32-RS) e mistura D4 (escória + 4% de Na₂O do silicato).

Nos estudos de caracterização e fixação de invertebrados marinhos nos blocos da estrutura hidráulica foram encontrados vinte e quatro táxons pertencentes a dois reinos e sete filos, sendo que três pertencem ao reino Plantae e cinco ao reino Animalia. A biota encontrada nos substratos da mistura A (50% CP III - 32 RS + 50% escória) apresentou um número de espécies maior do que a encontrada nos substratos da mistura D4 (escória + 4% de Na₂O do silicato).

A análise de cluster mostra que 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). Estes dados 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 táxons que nele se fixará. As Figuras 9a e 9b mostram a presença da biota marinha em blocos retirados do ambiente marinho, após um ano.

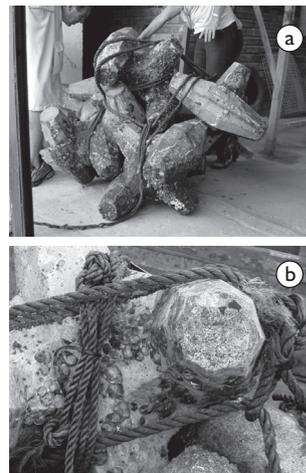


Figura 9. a) Blocos retirados do ambiente marinho, após 1 ano; b) Detalhe da presença da biota marinha incrustada no bloco.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No estudo do ativador químico foram selecionadas as misturas A e D4.

Após um ano, a resistência à compressão da mistura A apresenta maior crescimento comparada à mistura D4.

A massa específica não apresenta diferenças significativas entre as duas misturas.

A absorção de água foi menor para a mistura D4; porém, após um ano, apresentou aumento. A absorção de água por capilaridade foi maior para a mistura D4.

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 dos limites CONAMA,⁽¹⁴⁾ 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 não apresentaram variações significativas, atendendo à Resolução 357/2005 do CONAMA.⁽¹⁴⁾ Pela avaliação da incrustação biológica marinha dos blocos, pode-se considerar que estes, independentes se confeccionados com a mistura A ou mistura D4, podem ser usados como recifes artificiais onde a vida marinha se desenvolve naturalmente.

Agradecimentos

À Arcelor Mital Tubarão, FINEP, CNPq, Diaton, Ical, Holcim e Mizu.

REFERÊNCIAS

- 1 SILVA, M.G. Cimentos Portland com adições minerais. In: Isaia, C.G. (ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. p. 761- 93.
- 2 JOHN, V.M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. 200 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de 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**, v. 30, n. 9, p. 1367-74, Sept., 2000.
- 4 BROUGH, A.R.; ATKINSON, A. Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars Par I. Strength, hydration and microstructure. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 6, p. 865-79, June 2002.
- 5 SHI, C.; QIAN, J. High performance cementing materials from industrial slag – a review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 29, n. 2, p. 195-207, June 2000.
- 6 CINCOTTO, M.A.; BATTAGIN, A.F.; AGOPYAN, V. **Caracterização de escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado**. São Paulo: IPT, 1992. (Boletim 65).
- 7 SCANDIUZZI, L. ;BATTAGIN, A. F. **A utilização da escória granulada de alto forno como agregado miúdo**. São Paulo: ABCP, 1990. (Estudo técnico, 95).
- 8 MELBY, J.A.; TURK, G.F. **Core-loc concrete armor units**. Vicksburg, Miss.: US Army Corps of Engineers, Waterways Experimental Station, 1997. (Technical report CHL-97-4).
- 9 SILVA, E.; ALMEIDA, C. Escória de alto forno granulada como agregado miúdo para argamassa e concreto. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, I., 1986, São Paulo. ABNT CB-18 **Anais...** [S.n.t.]. p. 255-73.
- 10 SILVA, M. G. **Influência da cura térmica em pastas e argamassas de cimento de escória**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.
- 11 COELHO, M. A. M. **Estudo da carbonatação e retração em concretos de alto desempenho com elevados teores de escória de alto-forno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.
- 12 COLLINS, F; SANJAYAN, J.G. Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 3 , p. 455-8, Mar. 1999.
- 13 COELHO, M.A.M.; SILVA, M.G.; SOUZA, F.L.S.; SARMENTO, R.; ZANDONADE, E.; MORIMOTO, T.; HELMER, J.L. Concreto de escória de alto-forno ativada quimicamente: materiais, propriedades e avaliação ambiental In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 62., Vitória, ES. **Anais...** São Paulo: ABM, 2007. p.1945-54.
- 14 APHA, AWWA and WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 18th Ed: American Public Health Association. Washington DC. 1992.
- 15 Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução N°. 357/2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 10 dez 2008.

Recebido em: 20/03/2008

Aprovado em: 11/03/2009

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM - INTERNACIONAL, 62., 2007, Vitória, ES. São Paulo: ABM, 2007.