

Estudo das propriedades e avaliação ambiental de estrutura hidráulica confeccionada com escória de alto-forno ativada quimicamente

Maria Antonina Magalhães Coelho¹, Maristela Gomes da Silva², Fernando Lordêllo dos Santos Souza³, Robson Sarmiento⁴, Eliana Zandonade⁵, Tsutomu Morimoto⁶, José Luiz Helmer⁷

¹NEXES, Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas do Centro Tecnológico da UFES, Prof. no curso de Arquitetura da UNIVIX e no curso de Eng. de Produção Civil da UCL - antonina@oi.com.br

²NEXES; Professora e Diretora do Centro Tecnológico da UFES - margomes@npd.ufes.br

³Pesquisador do NEXES; Prof. do Centro Tecnológico da UFES - fernador@npd.ufes.br

⁴Pesquisador do NEXES - robson.sarmiento@terra.com.br

⁵Pesquisadora do NEXES; Profa. do Departamento de Estatística da UFES - elianaz@cce.ufes.br

⁶CST – Arcelor Brasil - morimoto@arcelor.com.br

⁷Pesquisador do NEXES, jhelmer@uol.com.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre concreto utilizando escória de alto-forno ativada quimicamente em substituição ao cimento para a produção de estruturas hidráulicas do tipo quebra-mar. Blocos ficaram em ambiente marinho durante 1 ano para avaliação da durabilidade e, ao mesmo tempo, outros blocos ficaram imersos em tanques com água do mar, com simulação do movimento das marés, para avaliação da qualidade da água. Estudos complementares de classificação e de contagem de número de organismos marinhos na superfície dos blocos e a comprovação da qualidade da água, indicam que o material utilizado não prejudica o meio ambiente. A avaliação das propriedades do concreto mostraram melhores resultados, ou resultados equivalentes, para o concreto de escória de alto-forno ativada quimicamente, em comparação ao concreto de referência.

PALAVRAS-CHAVE: concreto, escória de alto-forno, ativação química, estrutura hidráulica.

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 ref. [1] e ref.[10].

A Construção Civil, dentre os setores industriais, é um dos que mais tem possibilidades de aproveitamento de grandes quantidades de resíduos, devido ao número de insumos e volume de matéria-prima que consome. O *deficit* habitacional e os altos custos dos insumos básicos incentivam os estudos de materiais e tecnologias alternativas ref.[10].

Neste estudo procurou-se utilizar altos teores de escória de alto-forno que 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 ref.[2], ref.[3], ref.[] e ref.[15].

O objetivo deste trabalho foi avaliar e selecionar um ativador químico para a escória de alto-forno moída e aplicá-lo como material cimentante em concreto para desenvolvimento de estrutura hidráulica de proteção contra a ação de ondas marinhas. 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). A composição química da escória granulada de alto-forno e do cimento CP III – 32 RS está apresentada no Quadro 1 e suas características físicas no Quadro 2.

Quadro 1 : Análise química dos materiais cimentícios.

Oxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	S	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	CO ₂
Escória	33,02	12,64	0,68	42,83	7,71	1,06	0,17	0,31	0,60	-	-
CP III	29,88	9,92	1,43	50,95	5,78	0,62	0,09	0,36	0,38	0,69	0,15

Quadro 2: Caracterização física dos materiais cimentícios.

Características físicas	Escória	CP III – 32 RS
Finura (NBR 11579) - Resíduo na peneira de 0,075 mm (%)	0,4	0,6
Superfície específica Blaine (NBR NM 76) (cm ² /g)	4100	4220
Massa específica (NBR 6474) (kg/m ³)	2,906	2,986

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 ref.[4], ref.[7] e ref.[13]. As propriedades físicas estão de acordo com as prescrições das normas brasileiras e com estudos realizados por outros autores ref.[4], ref.[12], ref.[13], ref.[16] e ref.[17].

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 ref.[4], ref.[12], ref.[13] e ref.[16]. A Figura 1 mostra micrografia da escória granulada de alto-forno.

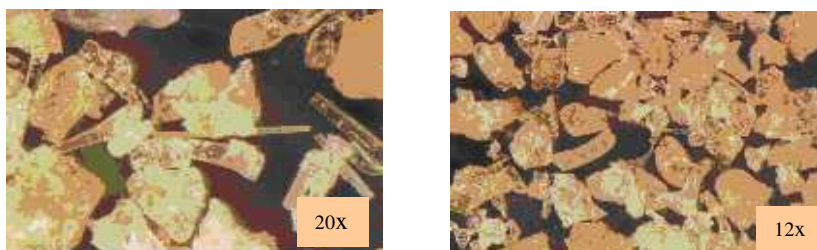


Figura 1 – Micrografias da escória granulada.

Como agregado gráudo foi empregada escória bruta de alto-forno britada nas granulometrias da brita 1 (material passando na peneira 25 mm) e da brita 2 (material passando na peneira 32 mm). Apresenta estrutura porosa em alguns grãos o que torna o material heterogêneo. A Figura 2 mostra foto da escória bruta de alto-forno.



Figura 2 – Foto da escória bruta de alto-forno.

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. A características físicas da cal hidratada CH I estão no Quadro 3 e a análise química da cal hidratada CH I e da gipsita estão no Quadro 4.

Quadro 3– Características físicas da cal hidratada.

Determinação	CH I
Material retido na peneira no. 30 (NBR 9289) (%)	0
Material retido na peneira no. 200 (NBR 9289) (%)	0,36
Massa específica (NBR 6474) (kg/m ³)	2,32

Quadro 4: Análise química da cal hidratada CH I.

Composição Química	Cal hidratada CH I (% em massa)	Gipsita (% em massa)
Dióxido de silício SiO ₂	0,93	5,36
Óxido de alumínio Al ₂ O ₃	0,27	0,47
Óxido de ferro Fe ₂ O ₃	0,36	0,38
Óxido de cálcio CaO	72,48	37,55
Anidrido sulfúrico SO ₃	0,14	47,30
Óxido de sódio Na ₂ O	-	0,05
Óxido de potássio K ₂ O	0,07	0,26
Perda ao fogo	25,28	8,85

As propriedades químicas e físicas do silicato de sódio foram fornecidas pelo fabricante e estão apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5: Propriedades físicas e químicas do silicato de sódio.

Ítem analisado	Resultado	Ítem analisado	Resultado
Na ₂ O (%)	16,217	Módulo de Silica (SiO ₂ / Na ₂ O)	1,70
SiO ₂ (%)	27,662	Densidade 25° C (g/l)	1,522
Partículas sólidas	43,879	Viscosidade 25° C (cP)	199
Água	56,121	° Be	49,50

2.2 Metodologia

Na seleção da geometria mais adequada foram levadas em consideração as características de projeto de estruturas hidráulica de proteção contra a ação de ondas marinhas, a facilidade de produção dos blocos e de montagem da estrutura e a eficiência estrutural proporcionada pela geometria. Optou-se por uma forma robusta para os blocos que compõem a estrutura hidráulica, que atende às tensões internas de flexão e de torção e à facilidade de produção, como a moldagem e desforma ref.[12]. A geometria pertence à família de formas denominada bulky, e está mostrada na Figura 3.

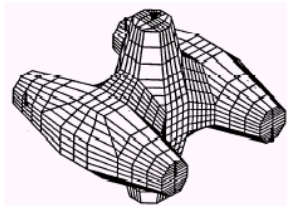


Figura 3 - Bloco da estrutura hidráulica de contenção de ondas ref.[12].

O projeto experimental foi desenvolvido para que a estrutura hidráulica atenda ao requisito de durabilidade, conforme as especificações da NBR 6118/2003, e, tomando-se como referência a região costeira da grande Vitória, a classe de agressividade ambiental, segundo a referida norma, é muito forte, o concreto deve ter fck igual a 40 MPa e a relação água/materiais cimentícios igual a 0,45, parâmetros estes considerados, mesmo não sendo o bloco armado. Esta resistência é suficiente para o concreto absorver as tensões devidas aos esforços de flexão e torção decorrentes dos encaixes dos blocos da estrutura hidráulica de proteção contra a ação de ondas marinhas.

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, mostrados no Quadro 6, foram selecionados em estudo prévio, dentre vários ativadores usados por diferentes autores. ref.[2], ref.[3], ref.[5], ref.[6], ref.[8], ref.[9], ref.[14] e ref.[17].

Quadro 6 – Autores e ativadores usados como referência.

Autor	Ativadores
BROUGH & ATKINSON ref.[4]	Silicato de sódio
ISAIA ref.[8]	Cal
COELHO ref.[5]	Clínquer
BAKHAREV <i>et al.</i> ref.[2]	Silicato de sódio
COLLINS & SANJAYAN ref.[6]	Silicato de sódio + cal + gipsita
SILVA ref.[17]	Silicato de sódio + cal
SHY & DAY ref.[14]	Silicato de sódio
JOHN ref.[9]	Silicato de sódio

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 7.

Quadro 7 - 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 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 avaliadas propriedades às primeiras idades (7 e 28 dias), sendo, então, moldados corpos-de-prova cilíndricos com (100x200)mm para os ensaios de resistência à compressão axial, massa específica, absorção de água, índice de vazios e resistência à tração por compressão diametral. Os corpos-de-prova foram mantidos em cura úmida até completar 28 dias quando da primeira idade da realização dos ensaios. Todos os ensaios foram realizados, também, aos 365 dias, e utilizou-se 4 corpos-de-prova para cada idade. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados, segundo a NBR 5739. Os ensaios de massa específica, absorção de água e índice de vazios foram realizados, segundo a NBR 9778. Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram realizados, segundo a NBR 7222.

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 4a. Corpos-de-prova foram colocados em tanque com água do mar, simulando o movimento de maré, mostrados na Figura 4b e outros corpos-de-prova ficaram em câmara úmida (Figura 4c) por 1 ano. Após este período, foram retirados testemunhos dos blocos para a realização dos ensaios, juntamente com os corpos-de-prova citados anteriormente.



Figura 4 – (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, também, dois tanques dotados de sistema de bombeamento para simulação do efeito de marés. Em cada tanque foi colocada água do mar e no primeiro tanque foi colocado um bloco moldado com a mistura D4 (D4 (4% Na₂O do silicato de sódio), enquanto o outro tanque continha um bloco moldado com a mistura A (50% escória + 50% de CPIII 32-RS).

Foram medidos na água os parâmetros segundo as metodologias do Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater (American Public Healthly Association 1995) sendo comparados com os parâmetros recomendados pela Resolução 357/2005 do CONAMA. Estes parâmetros foram medidos na água dos dois tanques (Figura 5a) antes de receberem cada bloco e após um ano em contato com eles.

Como complementação, foi medido o pH da água, três vezes por semana, durante as duas primeiras semanas, passando, então, o pH a ser medido semanalmente, tendo sido medido 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, como mostra a Figura 5b). Esta caracterização foi realizada através da análise do nível taxonômico, sendo realizada uma listagem em uma ordem sistemática de acordo com Brands (2005).



Figura 5 – a) Blocos em ambiente marinho; b) blocos em tanques simulando o 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 que apresentou valores similares aos anteriores.

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 sódio utilizado, estando, no entanto, de acordo com resultados encontrados na literatura ref.[2], ref.[3], ref.[6], ref.[9], ref.[14], ref.[17].

A mistura A produzida com escória + clínquer em proporções iguais apresentou resultados de resistência à compressão bastante significativos, entretanto, não alcançando os valores requeridos no projeto, isto é, 46,6 MPa.

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.

O abatimento apresentado pela mistura D4, com 4% de sódio, está dentro da faixa de valores de abatimento considerados adequados à moldagem da estrutura.

3.2 Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do concreto

A Tabela 2 apresenta os resultados das propriedades avaliadas da mistura D4 (escória + silicato de sódio) e mistura A (50% escória + 50% CP III – 32 RS) aos 28 dias e após 1 ano de exposição nos diferentes ambientes.

Tabela 2 - Resultados das propriedades avaliadas na mistura D4 (escória + silicato de sódio) e mistura A (50% escória + 50% CP III – 32 RS) aos 28 dias e após 1 ano.

Propriedades	Mistura D4 (escória de alto-forno + silicato de sódio)					Mistura A (50% escória de alto-forno + 50% CP III – 32 RS)				
	28 dias	384 dias				28 dias	384 dias			
		1	2	3	4		1	2	3	4
Resist. compressão (MPa)	48,4	54,1	50,2	51,9	53,8	29,2	43,8	41,5	41,0	41,3
Resist. tração por comp. diametral (MPa)	3,60	4,12	4,10	3,82	-	3,25	4,32	3,68	3,97	-
Massa específica (g/cm ³)	2480	2530	2540	2680	-	2500	2530	2550	2640	-
Absorção (%)	6,93	8,20	8,23	7,54	-	8,07	7,57	8,40	7,95	-
Índice de vazios (%)	14,6	17,1	17,3	16,8	-	16,8	16,1	17,6	17,3	-

- 1- Corpos-de-prova imersos em tanque com água do mar simulando o movimento de maré.
- 2- Corpos-de-prova mantidos em câmara úmida (umidade relativa maior que 95%).
- 3- Testemunhos retirados dos blocos Hydrus após 365 dias de exposição no mar (retirado no comprimento no sentido de moldagem).
- 4- Testemunhos retirados dos blocos Hydrus após 365 dias de exposição no mar (retirado no comprimento no sentido transversal ao de moldagem).

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 retirado no comprimento no sentido transversal ao de moldagem (ver 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 evolução de resistência à tração por compressão diametral, 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 5.

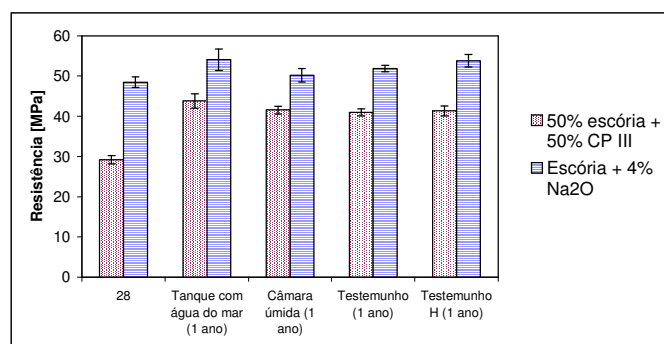


Figura 4 – Resistência à compressão aos 28 dias e a 1 ano em corpos-de-prova expostos em diferentes ambientes e o desvio padrão para cada caso.

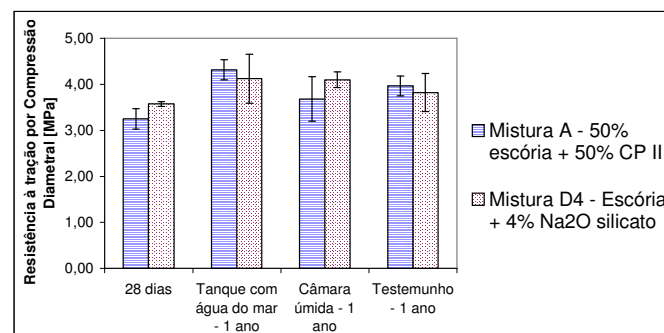


Figura 5 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias e a 1 ano em corpos-de-prova expostos em diferentes ambientes e o desvio padrão para cada caso.

Os valores de massa específica não apresentaram diferenças significativas entre as duas misturas. As duas misturas 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. Pode-se

supor que com o ganho em resistência houve maior compacidade devido à continuação de hidratação da escória, como ostra a Figura 6.

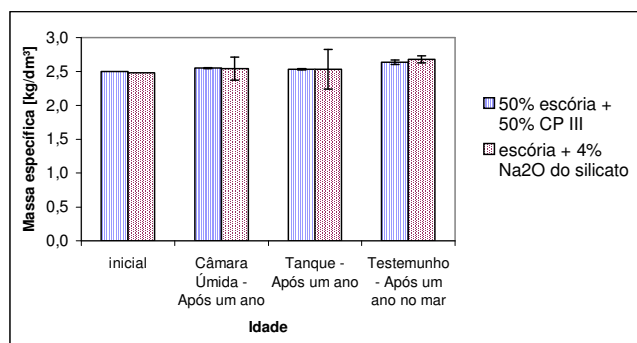


Figura 6 - Massa específica aos 28 dias e a 1 ano em corpos-de-prova expostos em diferentes ambientes e o desvio padrão para cada caso.

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 (BROUGH, A. R.; ATKINSON, 2002). 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.

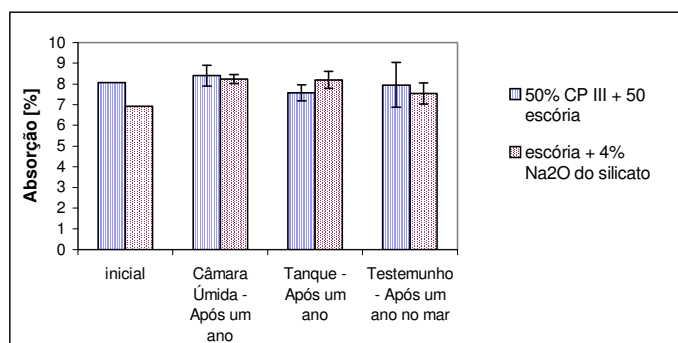


Figura 7 – Absorção aos 28 dias e a 1 ano em corpos-de-prova expostos em diferentes ambientes e o desvio padrão para cada caso.

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.

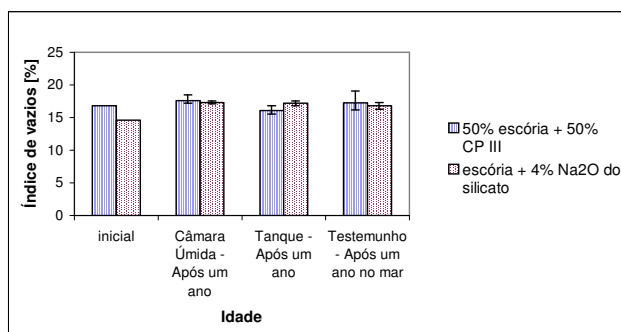


Figura 8 – Índice de vazios aos 28 dias e a 1 ano em corpos-de-prova expostos em diferentes ambientes e o desvio padrão para cada caso.

3.3 Avaliação do impacto ambiental

As concentrações de metais e não metais tóxicos avaliadas estão mostradas no Quadro 6.

Quadro 6 - Análise química da água e comparação com a Resolução 357/2005 do CONAMA.

Parâmetros	Limite Classe 2	CPIII		Silicato	
		Início	Final	Início	Final
Alumínio total	–	< 0,2 mg/L	0,23 mg/L	< 0,2 mg/L	0,25 mg/L
Arsênio total	0,069 mg/L	< 0,05 mg/L	< 0,01 mg/L	< 0,05 mg/L	< 0,01 mg/L
Cádmio total	0,04 mg/L	0,242 mg/L	0,125 mg/L	0,247 mg/L	0,122 mg/L
Cálcio total *		401,39 mg/L	589,612 mg/L	397,14 mg/L	688,033 mg/L
Chumbo total	0,21 mg/L	< 0,02 mg/L	0,059 mg/L	< 0,02 mg/L	0,025 mg/L
Cobre total	7,8 µg/L	0,140 mg/L	0,064 mg/L	0,116 mg/L	0,059 mg/L
Cromo hexavalente **	1,1 mg/L	< 0,05 mg/L	< 0,05 mg/L	< 0,05 mg/L	< 0,05 mg/L
Magnésio total *		181,51 mg/L	920,678 mg/L	185,31 mg/L	817,789 mg/L
Manganês total	–	0,061 mg/L	0,068 mg/L	0,105 mg/L	0,121 mg/L
Níquel total	0,074 mg/L	0,510 mg/L	0,676 mg/L	0,512 mg/L	0,731 mg/L
Sódio total *		10043,75 mg/L	3562,292 mg/L	10166,25 mg/L	3929,337 mg/L
Zinco total	0,12 mg/L	0,103 mg/L	0,067 mg/L	0,114 mg/L	0,034 mg/L
Dureza (mg CaCO ₃ /L)*		1749,73	5263,61	1754,77	5085,67

* São parâmetros sem limites estabelecidos pela resolução 357/2005 do CONAMA.

** Nesta versão da resolução somente existe limite para Cromo total e não Cromo hexavalente.

Cádmio, Cobre, Sódio e Zinco, apresentam valores finais menores do que os encontrados no início do projeto.

É apresentada a seguir as análises individuais dos parâmetros:

Alumínio – não houve mudanças significativas, sendo que as amostras finais excederam pouco os limites estabelecidos pela resolução CONAMA 357/2005.

Arsênio – manteve-se abaixo do limite de detecção da análise.

Cádmio – houve diminuição em ambos os blocos, para aproximadamente a metade do valor inicial, sendo que as amostras excederam em muito os limites estabelecidos pela resolução CONAMA 357/2005.

Cálcio – houve aumento, esperado por haver grande quantidade desse elemento nos blocos.

Chumbo – mais presente no bloco confeccionado com a mistura A (50% escória + 50% de CPIII 32-RS) do que no bloco confeccionado com a mistura D4 (D4 (4% Na₂O do silicato de

sódio), sendo que as amostras finais excederam os limites estabelecidos pela resolução CONAMA 357/2005. O chumbo ainda é utilizado em soldas de aço inox, sendo possível ser proveniente disso.

Cobre – houve diminuição em ambos os blocos, para aproximadamente a metade do valor inicial, porém, mesmo assim, as amostras excederam em muito os limites estabelecidos pela resolução CONAMA 357/2005.

Cromo hexavalente – manteve-se abaixo do limite de detecção da análise.

Magnésio – houve aumento significativo nas concentrações, esse parâmetro não tem limite estabelecido na legislação, este parâmetro foi estabelecido para que dos resultados deste e do cálcio fosse calculada a dureza. Novamente houve um maior aumento no bloco ativado pelo CPIII.

Manganês – novamente os blocos causaram impactos diferentes, no bloco confeccionado com a mistura A (50% escória + 50% CP III 32-RS) manteve-se aproximadamente igual e abaixo do limite estabelecido na legislação, enquanto que no bloco confeccionado com a mistura D4 (4% Na₂O do silicato de sódio) houve um pequeno acréscimo na concentração final, e ambas amostras ultrapassaram o limite estabelecido na resolução CONAMA 357/2005.

Níquel – houve aumento significativo nas concentrações e todas as amostras excederam em muito os limites estabelecidos pela resolução CONAMA 357/2005. O aumento pode ser explicado pela presença do níquel como elemento de liga no aço utilizado na fabricação dos tanques.

Sódio – houve diminuição significativa nas concentrações, esse parâmetro não tem limite estabelecido na legislação. A diminuição pode ser explicada pela formação de sal nas paredes dos tanques, causado pela simulação de marés.

Zinco – as concentrações de ambos os blocos atingiu valores abaixo do limite estabelecido na resolução CONAMA 357/2005, sendo mais significativas no bloco ativado pelo silicato de sódio. Pode ter sido absorvido pelos blocos na forma de silicato básico de zinco, isso explicaria a maior diminuição no bloco ativado pelo silicato de sódio.

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. No entanto, cádmio e cobre, mesmo com a redução, ainda ultrapassaram o limite do CONAMA.

Os resultados do monitoramento 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.

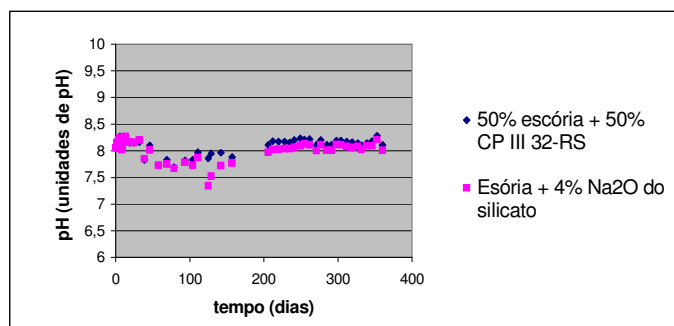


Figura 9 - Evolução do pH com o tempo, para a mistura A (50% escória + 50% CP III 32-RS) e mistura D4 (escória + 4% de Na₂O do silicato).

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 filios, sendo que três pertencem ao reino Plantae e cinco ao reino Animalia, e são apresentados no Quadro 7

Quadro 7 - Caracterização e fixação de invertebrados marinhos nos blocos.

Reino Animalia	Reino Plantae
Filo Porifera	Filo Glaucophyta
Classe Desmospongiae	Classe Ulvophyceae
Morfoespécie 01	Ordem Caulerpales
Morfoespécie 02	Familia Udoteaceae
Filo Cnidária	<i>Halimeda</i> sp
Classe Hydrozoa	Filo Rhodophyta
Ordem Hydroida	Classe Florideophyceae
Subordem Leptomedusae	Ordem Cryptonemiales
Familia Serpulariidae	Familia Corallinaceae
Dinamena sp	<i>Corallina</i> sp
Filo Mollusca	<i>Lithothamnion</i> sp
Classe Gastropoda	
Subclasse Prosobranchia	
Ordem Archaeogastropoda	
Familia Fissurellidae	
Fissurela clenchi	
Familia Acmaeidae	
Collisella	
Ordem Mesogastropoda	
Familia Vermitidae	
Dendropoma anulatus	
Serpulorbis decussatus	
Familia Calypteraeidae	
Crepidula sp	
Classe Pelecypoda	
Subclasse Pteriomorphia	
Ordem Ostreoida	
Familia Ostreidae	
Crassostrea rhizophorae	
Ordem Mytiloidea	
Familia Mytilidae	
Brachidontes sp	
Perna perna	
Filo Annelida	
Classe Polychaeta	
Ordem Sabellida	
Familia Spirorbidae	
Spirorbis spirorbis	
Sabela sp	
Filo Bryozoa	
Classe Gymnolaemata	
Ordem Cheilostomata	

Subordem Ascophora
Família Schizoporellidae
Schizoporella sp
Família Watersiporidae
Watersipora sp
Subordem Anasca
Família Bugulidae
Scrupullaria sp
Filo Artropoda
Classe Cirripedia
Família Chthalamidae
Chthalamus sp
Balamus sp
Tetraclita sp

A presença de cada táxon, em cada substrato, está apresentada no Quadro 8 onde se observa, no final do mesmo, o número de táxons correspondente a cada substrato.

Quadro 8 - Ocorrência dos diversos táxons da biota marinha encontrados nos blocos submersos na região marinha costeira.

Táxons	Blocos com mistura D4 (4% de Na ₂ O do Silicato)										Blocos com mistura A (50%CP III 32-RS + 50% escória)									
	15	16	2	4	17	5	6	3	7	18	9	10	11	12	13	14	19	20	21	22
Desmospongiae 01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Desmospongiae 02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Dynamena sp	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
Crassostrea rhizophorae	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1
Ostrea sp	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fissurela clenchi	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Collisela sp	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Dendropoma annulatus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0
Serpulorbis decussatus	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
Perna perna	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Crepidula sp	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sabella sp	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Spirorbis spirorbis	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Schizoporella sp	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Watersipora sp	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Scrupocellaria sp	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
Crisia sp	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tetraclita sp	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0
Balanus sp	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
Megabalanus sp	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1
Didemnum sp	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Halimeda sp	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Lithothamnion sp	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Coralina sp	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Táxons (S)	5	5	6	6	5	4	13	10	11	5	20	15	8	11	13	9	9	13	10	10

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 Na_2O do silicato) onde a média de táxons foi 7 e os valores mínimos e máximos táxons encontrados foi de 5 e 13 respectivamente.

Pode-se observar na Figura 10 a análise de cluster que mostra que os blocos confeccionados com a mistura D4 (escória + 4% de Na_2O 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 na mar, já que estes blocos ficaram em um nível ligeiramente inferior se comparado aos blocos da mistura D4 (escória + 4% de Na_2O do silicato).

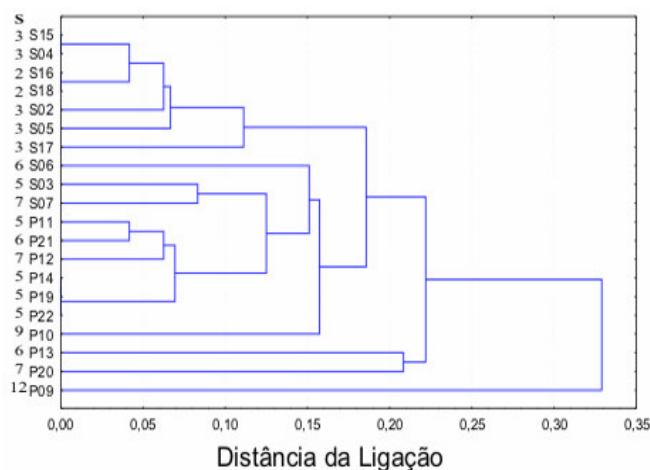


Figura 10 - Análise de cluster dos blocos de substrato com escória + 4% Na_2O do silicato e com 50% escória + 50% CP III 32-RS submersos na região marinha costeira. Os números alinhados verticalmente, à esquerda sob a letra S, mostram o número de espécies encontradas em cada substrato.

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 Na_2O 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 que apresentou valores similares aos anteriores. Considerando que os valores encontrados para a Mistura D5 (5% de sódio + cal) foi maior do que a resistência requerida no projeto e que os valores encontrados para a mistura D4 (4% de sódio + cal) atendem a este requisito, foi definida esta mistura para ser utilizada para a continuação dos estudos.

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 (4% Na₂O do silicato de sódio). Este fato pode ter sido devido à maior eficiência de ativação pelo silicato quando comparado com a ativação pelo clínquer do cimento CP III - 32 RS da mistura A. Após 1 ano, a resistência à compressão da mistura A (50% escória + 50% CP III - 32 RS) apresentou maior crescimento comparada à mistura D4 (4% Na₂O do silicato de sódio).

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

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, porém, após 1 ano, a absorção da mistura D4 (4% Na₂O do silicato de sódio) apresentou aumento. A absorção de água por capilaridade foi maior para a mistura D4 (4% Na₂O do silicato de sódio) devido, provavelmente, à estrutura dos poros.

Avaliação do impacto ambiental: Os resultados da análise química da água presente no bloco hidráulico confeccionado com a mistura D4 (escória + 4% de Na₂O do silicato) 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, comparando a água inicial com a final, enquanto, para os outros parâmetros houve redução. No entanto, cádmio e cobre, mesmo com a redução, ainda ultrapassaram o limite do CONAMA.

Os resultados do monitoramento, através do pH das águas presentes nos blocos hidráulicos confeccionados com as duas misturas de concreto apresentaram, no início do experimento, 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.

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% escória + 50% CP III - 32 RS) 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.

Como os blocos confeccionados com a Mistura D4 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.

Assim, pela avaliação da incrustação biológica marinha sobre os blocos, pode-se considerar que estes, independente se confeccionados com a mistura A (50% escória + 50% CP III – 32 RS) ou mistura D4 (escória + 4% de Na₂O do silicato), podem ser usados como recifes artificiais onde a vida marinha se desenvolve naturalmente.

5 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. 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.
3. BROUGH, A. R.; ATKINSON, A. *Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars Par I. Strength, hydration and microstructure*. Cement and Concrete Research, v. 32, p. 865-879, 2002.
4. 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.
5. 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.
6. COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. *Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete*. Cement and Concrete Research, 1999, v. 29, p. 455-458.
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. 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.
9. JOHN, Vanderley M. *Cimentos de Escória Ativada com Silicatos de Sódio*. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.
10. JOHN, Vanderley M. *Pesquisa e Desenvolvimento de Mercado para Pesquisa*. In: Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Material de Construção Civil. 1996. Anais. 1996.
11. 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.
12. RIBEIRO, C. C. et al.. *Estudo do aproveitamento da escória de alto-forno como agregado miúdo na produção de argamassa e concreto*. Projeto de pesquisa da Escola de Engenharia Civil da Universidade de Minas Gerais, 1990.
13. 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.
14. 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.
15. SHI, C.; QIAN, J. *High performance cementing materials from industrial slag – a review*. Resources, Conservation and Recycling, Vol. 29, Junho 2000, p. 195-207.
16. 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.

17. 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.

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.