

Influência da adição de escória de cobre em características relacionadas à durabilidade do concreto

Influence of copper slag admixture in concrete durability properties

Washington Almeida Moura
Denise Carpena Coutinho Dal Molin

Resumo

A preocupação com o grave problema da geração de resíduos vem, cada vez mais, despertando a conscientização da necessidade de estudos com vistas a melhorar o ciclo de produção e adequar a destinação dos resíduos gerados. Nesse sentido, a reciclagem se apresenta como uma grande alternativa. Nesta pesquisa, avalia-se a possibilidade de reciclagem da escória de cobre, partindo-se da hipótese de que é viável sua utilização como adição para concreto. Foi realizada caracterização química, física, mineralógica e atividade pozolânica da escória de cobre. Mediante avaliação do risco ambiental (ensaios de lixiviação e solubilização), foi constatado que a escória de cobre não apresenta risco à saúde humana nem ao meio ambiente, sendo classificada como não inerte. Neste trabalho, é estudada a influência da adição de escória de cobre sobre as características relacionadas com a durabilidade do concreto (absorção por imersão, absorção por sucção capilar, carbonatação e resistência ao ataque por sulfato). A análise dos resultados permite concluir que a adição de 20% de escória de cobre ao concreto proporciona melhor desempenho em relação a todas as características estudadas.

Palavras-chave: escória de cobre; resíduo; aditivo mineral; concreto.

Abstract

The concern with the serious problem of waste generation has led to a higher social consciousness of the need of further studies aiming to improve the production lifecycle and proper disposal of waste. In this context, recycling is a very important alternative. This research assesses the possibility of recycling copper slag, considering the feasibility of using it as an admixture to concrete. The physical, chemical and mineralogical characterization of copper slag, as well as the pozzolanic activity of copper slag were determined. An environmental risk assessment (leaching and solubilization tests) showed that copper slag does not pose any risks to human health or to the environment, thus being classified as non-inert. This work studies the influence of copper slag admixture on the durability properties of concrete (water absorption by immersion, water absorption by capillary suction, carbonation rate and sulfate attack resistance). The analysis results showed that the use of 20% of copper slag admixture improves the performance of the concrete properties that were assessed.

Keywords: copper slag, mineral admixture, concrete.

Washington Almeida Moura
Departamento de Tecnologia
Universidade Estadual de Feira de
Santana
BR 116, Km 03
Campus Universitário
CEP 44031-460 - Feira de
Santana, BA -
Brasil
Tel.: (75) 224 8299
E-mail: wam@uefs.br

Denise Carpena Coutinho
Dal Molin
Núcleo Orientado para a Inovação
da Edificação
Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 90 -
3º Andar, Centro
CEP 90035-190 - Porto Alegre, RS
- Brasil
Tel.: (51) 3316 3518
E-mail: dmolin@ufrgs.br

Recebido em 16/03/04

Aceito em 21/08/04

Introdução

O avanço tecnológico, a evolução industrial, o aumento da população e o conseqüente aumento do consumo vêm provocando, nos últimos anos, uma exploração desordenada de recursos não-renováveis, além do maior consumo de energia e da geração de um grande volume de resíduos urbanos e industriais.

Apesar de a construção civil ser um grande agente impactante, pelo grande consumo de recursos naturais e energia, e por ser um grande gerador de resíduos, o setor tem ao mesmo tempo um elevado potencial de utilização de resíduos de diferentes setores. Nesse contexto, têm sido desenvolvidos estudos para utilização de resíduos para produção de novos materiais na construção civil.

A utilização de resíduos sólidos urbanos e industriais para produção de materiais cimentícios pode contribuir para a redução do impacto ambiental causado, a partir da diminuição do consumo de recursos naturais, da redução da poluição gerada e do consumo de energia para sua produção. Estudos desenvolvidos por Yamamoto et al. (1997)¹ apud JOHN (2000) demonstram que a substituição de parte do clínquer por cinzas volantes e escórias possibilitou uma redução de 28% no consumo de combustível na indústria cimenteira. Além dos aspectos ambientais, o uso de resíduos na produção de argamassas e concretos pode proporcionar ganhos no seu desempenho, tanto no estado fresco como no estado endurecido, incrementando suas propriedades mecânicas e durabilidade.

O estudo do aproveitamento de resíduos de escórias metalúrgicas no Brasil vem se desenvolvendo há algum tempo. As escórias de alto-forno, por exemplo, já são amplamente utilizadas na fabricação de cimento e como agregado miúdo. Pesquisas realizadas com escórias de aciaria e de cobre têm apontado boas perspectivas de utilização desses resíduos.

Em âmbito mundial, são gerados cerca de 13 milhões de toneladas de escória de cobre. No Brasil, são geradas, no processo de produção do cobre eletrolítico, em média, 230 mil toneladas de escória por ano, que são depositadas no pátio da metalúrgica.

Estudos desenvolvidos na Universidade Federal do Rio Grande do Sul mostraram a influência da utilização de escória de cobre, como adição, nas propriedades mecânicas e parâmetros de durabilidade de concretos (MOURA, 2000). Neste trabalho são apresentados os resultados das

características relacionadas à durabilidade do concreto contendo escória de cobre.

Programa experimental (materiais e métodos)

Caracterização da escória de cobre

Coleta da amostra

A amostra da escória de cobre foi coletada de uma empresa beneficiadora de cobre chamada Caraíba Metais, localizada no Pólo Petroquímico de Camaçari, na Bahia.

Do volume de escória gerado ao longo da semana na Caraíba Metais, foi coletada uma amostra, de acordo com a NBR 10007 (ABNT, 1987e), de 2.500 kg de escória granulada. Depois da coleta, a amostra foi acondicionada em recipientes plásticos, que foram enviados para os laboratórios da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Características físicas e químicas

A escória de cobre é gerada em grãos, com módulo de finura de 3,4. Para sua utilização como aditivo mineral foi necessário um estudo experimental relacionando tempo de moagem, diâmetro médio e sua atividade pozolânica avaliada em argamassas (MOURA, 2000). A partir deste estudo, verificou-se que o tempo ótimo de moagem foi de 60 minutos, tendo a escória apresentado um diâmetro médio de 27,2 μm , atendendo aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 1992c) para uso como material pozolânico. A escória de cobre possui uma massa específica de 3,87 g/cm³.

A composição química da escória está apresentada na Tabela 1. A composição química da escória de cobre indica que este possui um teor de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ de cerca de 84,3%, atendendo aos limites da NBR 12653 (1992c) para o uso como material pozolânico em misturas com cimento Portland.

Para identificação do grau de amorfização dos compostos presentes na composição química, utilizou-se a difração de raios X (DRX). A Figura 1 apresenta o difratograma de raios X de uma amostra de escória de cobre. Observa-se grande incidência de picos, o que indica que a estrutura da escória é, predominantemente, cristalina. O difratograma mostra a presença de compostos do grupo das olivinas (faialita e faialita magnesiana) e magnetita. De acordo com Bittencourt (1992), a escória de cobre é composta de silicatos muito estáveis, formados em altas temperaturas, principalmente faialita (Fe_2SiO_4),

¹ YAMAMOTO, J. K. et al. Environmental impact reduction on the production of blended Portland Cement in Brazil. *Environmental Geosciences*, v. 4, n. 4, p.192-206, 1997.

faialita magnesiana ($(FeMg)_2SiO_4$) e magnetita (Fe_3O_4). Observa-se que esse difratograma é bastante semelhante ao da escória gerada nos Estados Unidos, estudada por Ariño e Mobasher (1999).

Foram realizadas análises por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV) por elétrons secundários para avaliar a morfologia das partículas que compõem a escória de cobre. Nas Figuras 2 (a) e (b) são apresentadas duas imagens de microscopia da escória. Observa-se que os grãos, originalmente, possuem a forma esférica, com superfície lisa e sem poros. A imagem (b) mostra que, após a moagem, muitas partículas permanecem com a forma esférica.

Lixiviação e solubilização

Foi realizada a avaliação do risco ambiental da escória por meio de ensaios de lixiviação e solubilização, de acordo com a NBR 10005 (ABNT, 1987c) e NBR 10006 (ABNT, 1987d). Os resultados estão apresentados na Tabela 2 e na Tabela 3, respectivamente.

Verificou-se que não foi lixiviada nem solubilizada nenhuma substância considerada tóxica, acima dos limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 1987b). Porém, como ocorreu a solubilização do ferro acima dos limites da norma, o resíduo é classificado como Classe II – não inerte.

Composto (%)	Porcentagem
SiO ₂	26,0
Fe ₂ O ₃	55,0
Fe ₃ O ₄	7,0
CaO	2,0
MgO	2,7
Al ₂ O ₃	3,3
Na ₂ O	1,1
K ₂ O	0,6
TiO ₂	0,5
Cr ₂ O ₃	0,1
MnO	0,1
CuO	1,4
ZnO	1,0
As ₂ O ₃	0,1
SnO ₂	0,1
MoO ₃	0,4
PbO	0,1

Tabela 1- Composição química da escória de cobre

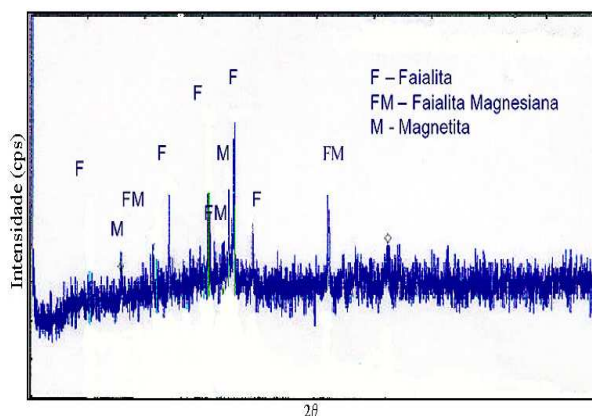


Figura 1 - Difratograma da escória de cobre

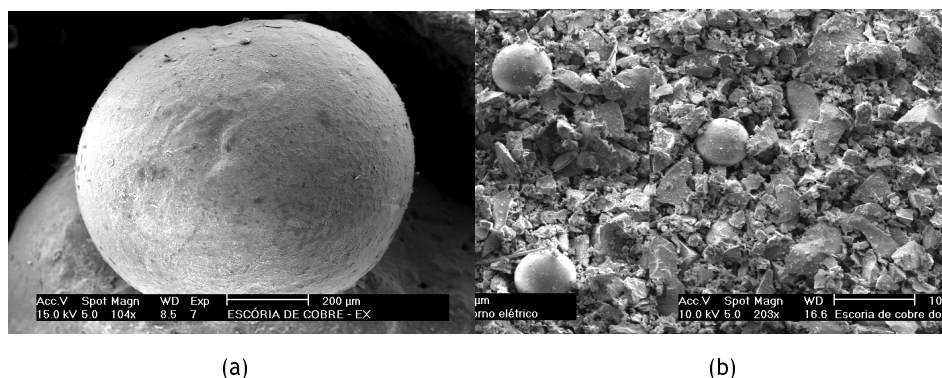


Figura 2 - Micrografia eletrônica de varredura por elétrons secundários da escória de cobre: (a) - um grão original (ampliação 104x); (b) vários grãos após moagem (ampliação 208x)

Elemento	Quantidade	Limite (NBR 10004, 1987)
Fenóis (mg/l)*	0,05	-
Fluoreto (mg/l)*	0,16	150,0
Arsênio (mg/l)*	< 0,002	5,0
Cádmio (mg/l)*	< 0,01	0,5
Chumbo (mg/l)*	< 0,01	5,0
Cobre (mg/l)	0,69	-
Cromo total (mg/l)*	< 0,05	5,0
Mercúrio (mg/l)*	< 0,0001	0,1
Prata (mg/l)	< 0,05	5,0
Vanádio (mg/l)	0,04	-
pH inicial	5,6	-
pH final	5,0	-

* Substância considerada tóxica

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de lixiviação

Elemento	Quantidade	Limite (NBR 10004, 1987)
Cloreto (mg/l)*	< 1	250
Nitrogênio nitrato (mg/l)	0,05	10
Cianeto (mg/l)*	< 0,01	0,1
Dureza (mgCaCC3/l)	16	500
Fenóis (mg/l)*	< 0,001	0,001
Fluoreto (mg/l)*	0,22	1,5
Sulfato (mg/l)	11	400
Alumínio (mg/l)	< 1	0,2
Arsênio (mg/l)*	< 0,002	0,05
Bário (mg/l)*	<1	1,0
Cádmio (mg/l)*	< 0,001	0,005
Chumbo (mg/l)*	< 0,01	0,05
Cobre (mg/l)	0,5	1,0
Ferro (mg/l)	0,75	0,3
Mercúrio (mg/l)*	< 0,0001	0,001
Manganês	< 0,05	0,1
Zinco (mg/l)	0,62	5
Prata*	< 0,05	0,05

* Substância considerada tóxica

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de solubilização

Determinação da atividade pozolânica

A atividade pozolânica da escória de cobre moída foi avaliada por meio do método de atividade pozolânica com cimento, NBR 5752 (ABNT 1992a) e pelo método químico, NBR 5753 (ABNT, 1991). Na Tabela 4 estão apresentados os resultados do ensaio de determinação da atividade pozolânica da escória de cobre com cimento Portland. Os resultados dos ensaios indicam que a escória de cobre atende às especificações de uma pozolana classe E, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1992c).

Foi realizado, também, o ensaio de determinação da pozolanidade baseado no método químico de determinação da pozolanidade de cimento pozolânico, NBR 5753 (ABNT, 1991), cujos resultados estão apresentados na Tabela 5. Os resultados do ensaio confirmam que a escória de cobre possui atividade pozolânica, podendo ser utilizada para a produção de materiais cimentícios.

Cimento

Foi utilizado cimento Portland comum (CPI S), classe 32, já que esse tipo de cimento apresenta, no máximo, 5% de adição. Assim, a influência dos possíveis efeitos filer e pozolânico da escória de cobre foi preservada. Agregado miúdo

Trata-se de uma areia quartzosa, procedente do Rio Jacuí/RS, cujas características estão apresentadas na Tabela 6.

Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi de origem basáltica, classificado de acordo com a sua granulometria como brita 1, com dimensão máxima característica de 25 mm, segundo a NBR 7211 (ABNT, 1983). As características físicas estão apresentadas na Tabela 7.

Água

A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento local.

Argamassa	Água requerida (%)	Consistência (mm)	a/(c+esc)	Resistência Média (MPa)	Índice de Atividade (%)
65% CP I S + 35% escória cobre	98	227	0,45	31,2	87
CP I S	100	226	0,50	35,8	100
Especificações NBR 12653 (1992)	< 110	225 ± 5		-	≥ 75

Tabela 4 - Resultados do ensaio de atividade pozolânica da escória de cobre com cimento Portland

Amostra	Milimoles (OH/L)	Milimoles (CaO/L)	Pozolanidade
45% CP I S + 55% escória cobre	40,3	8,3	SIM
100% CP I S	53,7	10,2	NÃO

Tabela 5 - Resultados do ensaio de determinação da pozolanidade da escória de cobre (ABNT, 1991)

Característica	Valor
Dimensão máxima característica (mm)	2,4
Módulo de finura	2,45
Massa específica (g/cm ³)	2,624
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,51

Tabela 6 - Características físicas da areia

Característica	Valor
Dimensão máxima característica (mm)	25
Módulo de finura	6,89
Massa específica (g/cm ³)	3,060
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,50

Tabela 7 - Características físicas do agregado graúdo

Mistura	água/ cimento	Cimento	Escória de cobre	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Consumo cimento (kg/m ³)
Referência	0,40	1	-	1,363	2,459	480
	0,50			2,039	3,164	372
	0,60			2,716	3,867	304
Com escória	0,41	1	0,20	1,363	2,459	468
	0,50			2,039	3,164	365
	0,60			2,716	3,867	299

Foi adotado o teor de 2% de ar no concreto para o cálculo do consumo de cimento

Tabela 8 - Traços em massa utilizados para produção dos concretos

Mistura	Água/cimento	Abatimento (mm)
Referência	0,40	75
	0,50	80
	0,60	70
(20%) Escória de cobre	0,41	80
	0,50	75
	0,60	60

Tabela 9 - Abatimentos obtidos nos traços dos concretos

Mistura	Água/cimento	Massa específica (kg/dm ³)
Referência	0,40	2,590
	0,50	2,570
	0,60	2,510
(20%) Escória de cobre	0,41	2,620
	0,50	2,600
	0,60	2,540

Tabela 10 - Massa específica do concreto no estado fresco

Dosagem dos concretos

Estudos realizados por Moura (2000) em argamassas, para avaliação do melhor teor de adição de escória de cobre para produção dos concretos, constatou que o teor de 20% apresentou melhor desempenho.

Para a dosagem dos concretos utilizou-se a metodologia de dosagem do IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992). Os traços foram determinados levando-se em consideração três diferentes relações entre água e cimento (0,40, 0,50 e 0,60). Como fator de controle adotou-se a trabalhabilidade de (70 ± 10) mm, medida por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone, NBR 7223 (ABNT, 1992b). O teor de argamassa seca foi de 49% para os concretos de referência e de 50% para os demais. Os traços unitários, em massa, empregados estão apresentados na Tabela 8.

As misturas foram realizadas numa betoneira de eixo vertical, num tempo de 3 minutos. Foram moldados corpos-de-prova para os ensaios de carbonatação, absorção por sucção capilar, absorção por imersão e ataque por sulfatos, para cada um dos traços. O número de corpos-de-prova variou de acordo com cada tipo de ensaio, conforme apresentado a seguir.

O processo de adensamento foi feito com vibrador de imersão. Após a moldagem, os corpos-de-prova foram cobertos e mantidos no ambiente de laboratório por aproximadamente 24 horas. Ao serem retirados das formas, os corpos-de-prova foram colocados na câmara úmida, com umidade relativa superior a 95% e temperatura de (23 ± 2) °C, até a data de realização de cada um dos ensaios.

Apresentação e análise dos resultados

Propriedades do Concreto no Estado Fresco

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de determinação da trabalhabilidade e massa específica dos concretos produzidos.

Trabalhabilidade

A trabalhabilidade foi controlada por meio do ensaio de abatimento, *slump test*, NBR 7223 (ABNT, 1992b). O abatimento foi considerado como um fator de controle no concreto e fixado na faixa de (70 ± 10) mm. Os resultados dos ensaios de abatimento estão apresentados na Tabela 9.

Apesar de a adição de escória de cobre no concreto implicar um maior volume de finos na mistura, não houve influência na trabalhabilidade para o teor utilizado, provavelmente devido à forma das suas partículas ser bastante esférica e a superfície ser lisa.

Massa específica

Considerando que a massa específica da escória de cobre é bastante elevada ($3,87 \text{ kg/dm}^3$), avaliou-se a sua influência na massa específica do concreto fresco. A Tabela 10 apresenta os resultados da massa específica, para todas as misturas, determinada de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 1987a).

A massa específica aumenta com a adição de escória, já que esta possui massa específica maior do que os demais componentes do concreto. Esse aumento foi pequeno (no máximo 1,2%).

Foi verificada a influência da escória de cobre nas propriedades mecânicas do concreto (resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e tração na flexão), tendo os concretos com adição de 20% de escória de cobre apresentado desempenho bastante superior aos concretos de referência (sem adição) em todas essas propriedades (MOURA, 2000). Entretanto, neste artigo não discutimos esses resultados, por ser o seu foco as características relacionadas com a durabilidade.

Propriedades do Concreto Relacionadas com a sua Durabilidade

Além das propriedades mecânicas, é de fundamental importância avaliar o desempenho do concreto com adições, no que se refere à sua durabilidade. Para avaliar a influência da adição de escória de cobre ao concreto, quanto à durabilidade, foram realizados ensaios de absorção por imersão e por sucção capilar, carbonatação e ataque por sulfato de sódio.

A influência da adição da escória de cobre nas propriedades dos concretos e a interação entre as variáveis relacionadas foram avaliadas estatisticamente por análise de variância (ANOVA), com a utilização do software *Statistica*.

Absorção por imersão

No ensaio de absorção por imersão, mede-se o volume de poros no concreto, e não a facilidade com que um fluido pode penetrar. Os ensaios de absorção dos corpos-de-prova de concreto foram realizados com base na NBR 9778 (ABNT, 1990). A determinação foi feita a frio, em três corpos-de-

prova por traço de concreto. Os resultados de absorção média estão apresentados na Tabela 11.

Pela ANOVA foi avaliada a influência do teor de adição de escória de cobre e da relação entre água e concreto sobre a absorção por imersão, cujos resultados estão apresentados na Tabela 12.

A ANOVA mostra que há influência significativa do teor de adição de escória de cobre e da relação entre água e cimento nos resultados de absorção. Verifica-se, também, que há interação entre esses fatores.

Os resultados mostram que houve melhor desempenho dos concretos com adição de escória de cobre. A forma e textura dos grãos associadas à massa específica mais elevada possibilitam maior densificação do concreto. O índice de vazios, determinado com base na NBR 9778 (ABNT, 1990), é menor nos concretos com adição de escória de cobre, para todas as relações entre água e cimento. Esse fato confirma que há maior influência da adição de escória na redução dos poros, principalmente para maiores relações entre água e cimento, chegando a reduzir a absorção por imersão em 13,5%, para relação entre água e cimento de 0,60.

Absorção por sucção capilar

A absorção de água por capilaridade foi determinada com base no ensaio desenvolvido por Kelham (1988). Esse ensaio foi realizado nos concretos com e sem adição de escória de cobre para as diferentes relações entre água e cimento.

Após 28 dias de cura em câmara úmida, os corpos-de-prova prismáticos (100 x 100 x 150) mm foram serrados em fatias de (100 x 100 x 25) mm. Foram selecionadas duas fatias para cada traço de concreto, sendo uma de cada corpo-de-prova. Foi adotada a sugestão de Gopalan (1996), no que se refere à espessura dos corpos-de-prova, reduzindo-a de 50 mm para 25 mm. Dessa forma, o ensaio é realizado num menor período de tempo. As fatias foram retiradas da extremidade, para levar em consideração o efeito parede, reproduzindo, dessa forma, o que ocorre nos elementos estruturais (pilares, vigas, etc.).

Após os procedimentos de impermeabilização, os corpos-de-prova são imersos e são medidos os acréscimos de massa ao longo do tempo.

Os valores de acréscimo acumulado de massa são plotados num gráfico em função da raiz quadrada do tempo. Verifica-se, no gráfico, um ponto de inflexão, a partir do qual são ajustadas duas retas: uma na fase de absorção inicial e a outra na fase de saturação. O ponto de inflexão corresponde ao tempo necessário para que ocorra a saturação

efetiva do corpo-de-prova. As retas foram traçadas segundo os critérios de regressão linear simples.

Nas Figuras 3 (a) e (b) está apresentado o tipo de gráfico de absorção por sucção capilar de corpos-de-prova de concreto. Determina-se a taxa de absorção, que é obtida pela inclinação da reta correspondente à fase de absorção inicial, dividida pela área da seção transversal do corpo-de-prova, em centímetros quadrados. Outro parâmetro determinado foi a resistência capilar, obtida pelo quadrado da divisão do valor do tempo no ponto de inflexão, no eixo das abscissas, pela espessura média do corpo-de-prova, em metros.

Os resultados dos parâmetros obtidos nos ensaios de absorção por sucção capilar estão apresentados na Tabela 13.

Os dois parâmetros, obtidos nos ensaios de absorção por sucção capilar, são analisados separadamente.

(a) Taxa de absorção

A influência do teor de adição de escória de cobre e da relação entre água e cimento sobre a taxa de absorção foi avaliada pela ANOVA. Esses resultados estão apresentados na Tabela 14. A ANOVA mostra que há influência significativa do teor de adição de escória de cobre e da relação entre água e cimento nos resultados da taxa de absorção. Porém, não há interação entre essas variáveis.

Os resultados mostram que houve melhor desempenho dos concretos com adição de escória de cobre. A taxa de absorção diminuiu em até 24,1% para a relação entre água e cimento de 0,60. Esse fato está relacionado com o melhor preenchimento e distribuição dos vazios no concreto com adição de escória de cobre. A forma dos grãos e massa específica mais elevada favorecem a uma maior densificação do concreto. Por outro lado, quanto menor for a relação entre água e cimento, menor a taxa de absorção. Isso é explicado pela porosidade do concreto, que é maior para relações entre água e cimento maiores, além da maior incidência de capilares. Esses resultados indicam que a menor taxa de absorção verificada nos concretos com adição de escória de cobre deve-se, principalmente, ao efeito filer.

(b) Resistência capilar

A influência do teor de adição e da relação entre água e cimento nos resultados de resistência capilar foi avaliada pela análise de variância. Na Tabela 15 estão apresentados os resultados dessa análise.

De acordo com a ANOVA, verifica-se que há influência significativa do teor de adição de escória de cobre e da relação entre água e cimento nos resultados da resistência capilar. Não existe, porém, interação entre esses fatores.

Mistura	a/c	Absorção Média (%)	Coefficiente de Variação	Média do Índice de Vazios (%)
Referência	0,40	3,98	1,3	9,2
	0,50	4,43	4,6	10,6
	0,60	5,20	2,1	12,1
(20%) Escória de cobre	0,41	3,82	1,5	8,5
	0,50	4,23	3,8	9,4
	0,6100 0	4,50	2,4	10,2

Tabela 11 - Resultados do ensaio de absorção por imersão do concreto

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de adição	1	0,243675	29,51	5,99	S
B – a/c	2	0,985975	119,39	5,14	S
AB	2	0,130225	15,77	5,14	S
ERRO	6	0,008258			

Notas:

GDL: Graus de Liberdade

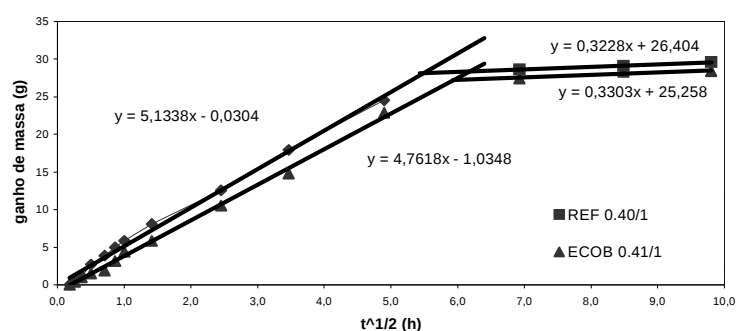
MQ: Média Quadrada

Fcalculado: Valor calculado de F

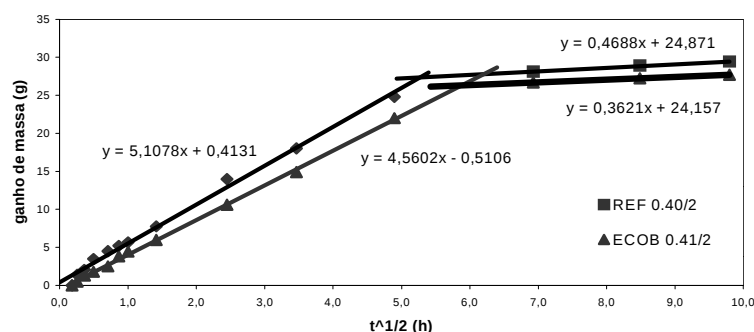
F0,05: Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S: Significativo NS – Não Significativo

Tabela 12 - Resultados da ANOVA para absorção por imersão dos concretos



(a)



(b)

Figura 3 - Absorção por sucção capilar dos concretos com relação entre água e cimento de 0,40: (a) corpo-de-prova 1, (b) corpo-de-prova 2

Mistura	a/c*	Taxa de Absorção (g/cm ² h ^{1/2})x10 ⁻²	Taxa de Absorção Média (g/cm ² h ^{1/2})x10 ⁻²	Resistência Capilar (h/m ²)	Resistência Capilar Média (h/m ²)
Referência	0,40/1	5,09	5,08	50.297	47.564
	0,40/2	5,06		44.832	
	0,50/1	8,00	8,44	19.562	19.070
	0,50/2	8,87		18.579	
	0,60/1	13,64	13,3	10.078	9.921
	0,60/2	12,95		9.765	
20% de escória de cobre	0,41/1	4,72	4,62	54.993	54.254
	0,41/2	4,52		53.516	
	0,50/1	7,29	7,46	22.786	21.908
	0,50/2	7,62		21.030	
	0,60/1	11,77	10,09	11.495	12.037
	0,60/2	10,05		12.579	

* relação água/cimento

Tabela 13 - Resultados de taxa de absorção e resistência capilar dos concretos

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de adição	1	0,000486	13,44	5,99	S
B – a/c	2	0,005301	146,53	5,14	S
AB	2	0,000100	2,75	5,14	NS
ERRO	6	0,000036			

Tabela 14 - Resultados da ANOVA quanto à taxa de absorção dos concretos

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de adição	1	451865E2	14,51	5,99	S
B – a/c	2	174017E4	5,14	5,14	S
AB	2	6048182	5,14	5,14	NS
ERRO	6	3114217			

Notas:

GDL: Graus de Liberdade

MQ: Média Quadrada

Fcalculado: Valor calculado de F

F0,05: Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S: Significativo

NS: Não Significativo

Tabela 15 - Resultados da ANOVA quanto à resistência capilar dos concretos

Observa-se que houve melhor desempenho dos concretos com adição de escória de cobre, no que se refere à resistência capilar. A adição de 20% de escória de cobre no concreto proporcionou um aumento de 17%, em média, na resistência capilar. Esse desempenho está, também, relacionado com a porosidade do concreto, que, por sua vez, é influenciada pelo teor de adição de escória de cobre. Isso significa que concretos

com adição de escória de cobre oferecem maior resistência à passagem de líquidos. Por outro lado, a resistência capilar diminui quanto maior for a relação entre água e cimento.

Carbonatação

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado em câmara de concentração controlada de 5% de

CO₂, em ambiente climatizado com umidade relativa 68% ± 2% e temperatura de (21 ± 2) °C.

Neste estudo foram ensaiados dois corpos-de-prova prismáticos (10 x 10 x 15) cm de concreto para cada traço. Após a retirada das formas, os corpos-de-prova foram envolvidos em filme plástico para impedir o contato com o meio e mantidos durante 7 dias de cura na câmara úmida. Após essa idade, foram pesados e colocados numa câmara de sazonalização para atingir a umidade de equilíbrio da câmara climatizada, definida a partir de pesagens regulares até a constância de massa. Após atingir essa umidade de equilíbrio, os corpos-de-prova foram colocados na câmara de carbonatação, onde permaneceram até a data das medições.

A cada data de ensaio, os corpos-de-prova foram retirados da câmara de carbonatação e fraturados, numa prensa de ensaios de compressão, para retirada de uma fatia, chamada de amostra. Logo após a retirada da amostra, foi realizada a limpeza da superfície fraturada, aspergida a solução de fenolftaleína sobre esta superfície e, 20 minutos após, feitas as medições das espessuras de camadas carbonatadas. Foram realizadas quatro medidas por amostra, a partir de cada uma das laterais, com aproximação de 0,5 mm. A espessura da frente de carbonatação de cada amostra foi considerada como sendo a média das quatro medidas. Após a fratura dos corpos-de-prova, nas idades de 180 e 210 dias, foi aplicada parafina na superfície fraturada, antes de serem repostos na câmara de carbonatação. Dessa forma, evitou-se que o fluxo de CO₂ penetrasse com maior facilidade pela superfície fraturada.

Na Tabela 16 estão apresentados os resultados de carbonatação dos concretos nas diferentes idades de determinação. Para verificação da influência do teor de adição de escória, relação entre água e cimento e idade nos resultados do ensaio de carbonatação, foi feita a ANOVA, cujos resultados estão apresentados na Tabela 16.

Verifica-se que há influência significativa do teor de adição, da relação entre água e cimento e da idade na carbonatação. Existe, também, interação entre o teor de adição e a relação entre água e cimento, e entre a idade do concreto e a relação entre água e cimento. Porém, não há interação entre o teor de adição e a idade nem entre as três variáveis.

Os resultados dos ensaios indicam que a adição de escória de cobre melhora o desempenho do concreto no que se refere à carbonatação. Aos 180 dias de exposição, os concretos já apresentavam diferença de comportamento, tendo a carbonatação se manifestado apenas nos

corpos-de-prova do concreto sem adição, na relação entre água e cimento de 0,60. A partir dos 210 dias, a influência foi mais evidenciada: os corpos-de-prova de concreto com adição de escória de cobre apresentaram menores espessuras de carbonatação. Aos 240 dias de exposição, o melhor comportamento foi também dos concretos com adição de escória de cobre, chegando a reduzir a espessura da camada carbonatada em 80% para relação entre água e cimento de 0,50, e em 35,7% para relação entre água e cimento de 0,60.

A influência da adição de escória de cobre quanto à carbonatação está associada à porosidade do concreto (menor porosidade, diminuição do tamanho e melhor distribuição dos poros), que dificultou a difusão do CO₂. Os resultados dos ensaios de absorção reforçam esse argumento.

Ataque por sulfato ao concreto

Para avaliar a resistência do concreto com adições de escória de cobre ante o ataque por sulfato, foi adotada a metodologia de Koch e Steinegger (1960), adaptada por Irassar (1990).

Foram moldados seis corpos-de-prova prismáticos de (4 x 4 x 16) cm para cada traço de concreto. Os corpos-de-prova foram curados durante 28 dias em câmara úmida. Após esse período, foi enxugada a superfície de cada corpo-de-prova, para retirada da água livre. Em seguida foram pesados e imersos três, de cada traço, em água de cal (referência) e outros três em solução com diluição de 5% de sulfato de sódio, conforme recomenda a ASTM C 1012 (ASTM, 1987). Para cada volume de corpo-de-prova, foi colocado quatro vezes o volume de solução de sulfato de sódio. Para controle da agressividade da solução foi fixado o nível de pH entre 7 e 8, medido com papel indicador de pH universal. A partir dos 90 dias, mensalmente, os corpos-de-prova foram retirados da imersão, realizado o enxugamento da superfície e, logo em seguida, pesados, para acompanhamento de variação de massa. Mensalmente, a solução de sulfato foi trocada, para manter a agressividade. Até os 450 dias de imersão não se verificou perda de massa significativa dos corpos-de-prova, conforme Tabela 18. Entretanto, optou-se pela conclusão do ensaio, uma vez que esse período atendia a recomendações feitas por alguns pesquisadores que realizaram esse ensaio anteriormente (SILVEIRA, 1996; SILVA FILHO, 1994; MARCIANO, 1993). Aos 450 dias de imersão, os corpos-de-prova foram, então, retirados da solução, pesados, observados a olho nu e rompidos à tração na flexão.

Pela verificação visual não se constatou nenhuma fissura na superfície dos corpos-de-prova. Porém, observou-se quebra de arestas de vários corpos-de-prova atacados por sulfato. A superfície dos corpos-de-prova de referência apresentou um aspecto mais rugoso, com o aparecimento de alguns grãos de agregado graúdo.

Utilizou-se, como um dos parâmetros para avaliação da resistência do concreto ao ataque por sulfato, o índice de resistência química “R”. Esse coeficiente é obtido pela relação entre a resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova imersos na solução de sulfato e a resistência à ação na flexão dos corpos-de-prova imersos na água com cal.

Na Tabela 18 estão apresentados os resultados da média de resistência à tração na flexão e de variação de massa dos três corpos-de-prova, e valores “R” dos concretos. Adotou-se como parâmetro para comparação do desempenho dos concretos o valor do índice de resistência química “R”, por dar uma idéia mais clara do desempenho nos dois tipos de cura. Os resultados foram analisados através da ANOVA, para verificar os fatores que influenciaram no ensaio. A Tabela 19 apresenta os resultados dessa análise.

Verifica-se que há influência significativa do teor de adição e da relação entre água e cimento na resistência do concreto ao ataque por sulfato. Existe, também, interação entre o teor de adição e a relação entre água e cimento.

Observa-se que os concretos com adição de escória de cobre apresentaram melhores resultados, principalmente para maiores relações entre água e cimento. O aumento do valor de “R” chega a 100% para relação entre água e cimento de 0,60, e 90,1% para relação entre água e cimento de 0,50.

No que se refere à variação de massa, apesar do longo período de realização do ensaio, não se verificaram variações significativas (máximo 0,3%). Os concretos com adição de escória de cobre, imersos em solução de sulfato de sódio, apresentaram ganho de massa para todas as

relações entre água e cimento. Esse ganho de massa pode estar associado à formação de compostos no interior dos poros, que é mais significativa do que a perda de material na superfície dos corpos-de-prova.

Entretanto, essa pequena variação pode ter sido influenciada pelo procedimento de secagem superficial dos corpos-de-prova, que possivelmente não foi uniforme.

Portanto, não é possível tirar conclusões categóricas acerca da variação de massa.

Na Figura 4 são apresentadas micrografias por elétrons secundários (MEV) de amostras de concreto após 450 dias de ataque por sulfato de sódio.

Pode-se observar, na sequência de imagens da Figura 4, que há incidência de etringita nas amostras de concreto sem adição de escória de cobre para todas as relações entre água e cimento. Nas amostras de concreto com 20% de escória de cobre, para as relações entre água e cimento de 0,41 e de 0,50, não se verificou a presença de etringita. Nota-se maior incidência de etringita nas imagens (e) e (f) (amostras de relação entre água e cimento de 0,60), inclusive no concreto com adição de escória de cobre. Na amostra de concreto sem adição (imagem (e)), a grande incidência de etringita foi observada no interior de uma fissura, perpendicular à superfície. Essa pode ser uma evidência de que a fissura foi provocada pela ação expansiva por parte da etringita. Na imagem (f) verifica-se uma grande formação de agulhas em forma de pacotes no interior do poro. Nota-se que ainda existe espaço entre os pacotes de etringita, não sendo geradas, ainda, tensões no interior desses poros.

As imagens confirmam que, quanto maior for a relação entre água e cimento, maior será a facilidade de penetração dos fluídos, devido à maior porosidade do concreto. Há também fortes indícios de que a presença da escória de cobre melhora o desempenho do concreto, pela redução da porosidade e do teor de C_3A . Em consequência, é menor a incidência de etringita nos concretos com adição de escória de cobre.

.Mistura	a/c	180 dias		210 dias		240 dias	
		Espessura ¹	Espessura Média ²	Espessura ¹	Espessura Média ²	Espessura ¹	Espessura Média ²
Referência	0,40	0	0	0	0	0	0
		0		0		0	
	0,50	0	0	1,0	1,0	5,0	5,0
		0		1,0		5,5	
	0,60	9,5	9,0	16,5	17,5	20,0	21,0
		8,5		18,0		22,0	
20% de escória de cobre	0,41	0	0	0	0	0	0
		0		0		0	
	0,50	0	0	0	0	1,0	1,0
		0		0		1,0	
	0,60	0	0	9,0	7,5	16,0	13,5
		0		6,5		11,0	

Notas:

¹ Espessura da área carbonatada

² Espessura Média da área carbonatada

Tabela 16 - Resultados dos ensaios de carbonatação

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de adição	1	108,5069	100,8064	4,41	S
B – a/c	2	472,0208	438,5226	3,55	S
C – Idade	2	84,1458	78,1742	3,55	S
AB	2	63,0069	58,5355	3,55	S
AC	2	0,6319	0,5871	3,55	NS
BC	4	46,6042	43,2968	2,93	S
ABC	4	2,6944	2,5032	2,93	NS
ERRO	18	1,0764			

Tabela 17 - Resultados da ANOVA da profundidade de carbonatação dos concretos

Mistura	a/c	Sulfato			Água com cal			R
		F _{tm} (MPa)	C. V.	V. M. (%)	F _{tm} (MPa)	C. V.	V. M. (%)	
Referência	0,40	4,85	6,2	-0,2	6,46	9,8	0	0,75
	0,50	2,69	4,8	0,1	4,86	1,4	0	0,55
	0,60	2,37	10,5	-0,3	3,90	4,1	0	0,61
20% de escória de cobre	0,41	6,83	2,5	0,2	7,04	12,9	0,2	0,97
	0,50	5,76	9,9	0,2	5,47	9,5	0,1	1,05
	0,60	4,79	3,8	0,3	3,85	2,1	0,2	1,24

Notas:

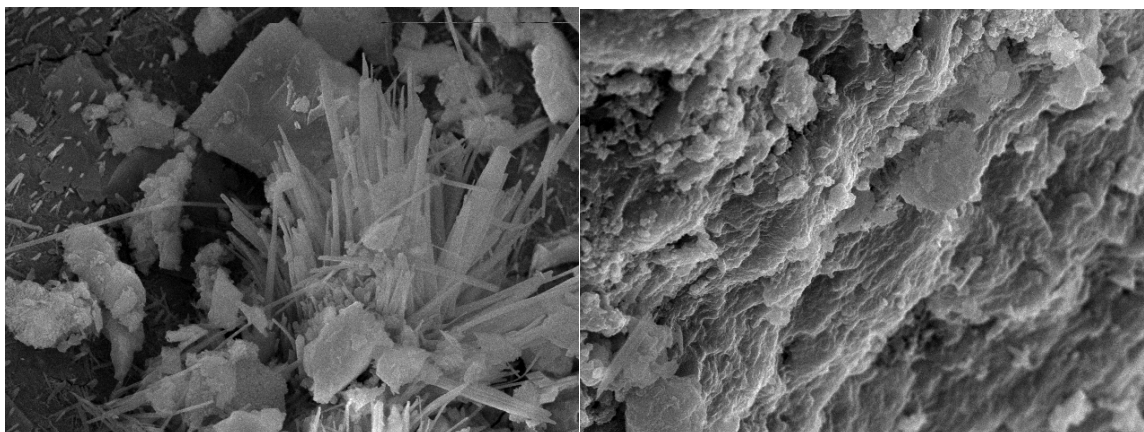
F_{tm}: resistência média à tração na flexão

C.V.: Coeficiente de variação (%)

V.M.: Variação na massa (o sinal “-” significa perda de massa)

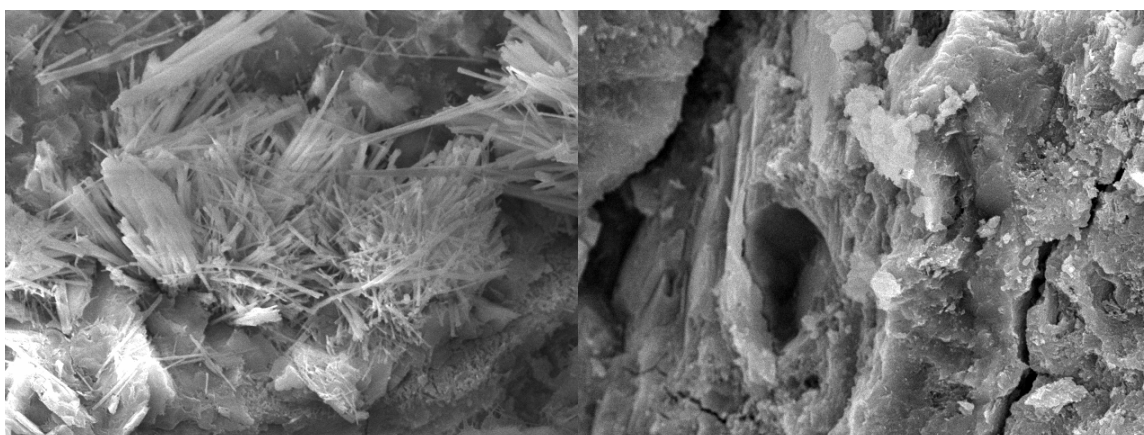
R: Relação entre a resistência dos corpos-de-prova imersos em solução de sulfato e em água com cal

Tabela 18 - Resultados de resistência à tração na flexão médias, índice de resistência química "R" e variação de massa dos corpos-de-prova imersos em água com cal e em solução de sulfato de sódio



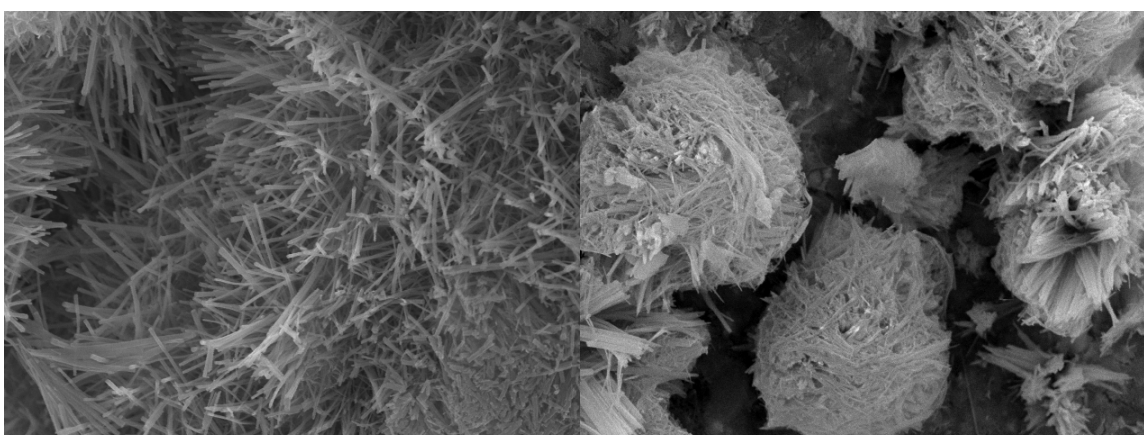
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

Figura 4 - Microscopia Eletrônica de Varredura por elétrons secundários (3.500x) em concreto: (a) sem escória, $a/c = 0,40$; (b) 20% de escória de cobre, $a/c = 0,41$; (c) sem escória, $a/c = 0,50$; (d) 20% de escória de cobre, $a/c = 0,50$; (e) sem escória, $a/c = 0,60$; (f) 20% de escória de cobre, $a/c = 0,60$

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de adição	1	0,911250	9112,5	4,75	S
B – a/c	2	0,023450	234,5	3,89	S
AB	2	0,065850	658,5	3,89	S
ERRO	12	0,000100			

Tabela 19 - Resultados da ANOVA do ataque por sulfato dos concretos, para “R”

Conclusões

Os resultados dos ensaios de determinação da atividade pozolânica pelo método mecânico, NBR 5752 (ABNT, 1992a) mostram que a escória pode ser classificada como uma pozolana classe “E”, já que apresentou atividade de 87%. Os resultados dos ensaios pelo método químico, NBR 5753 (ABNT, 1991) confirmaram essa atividade.

Os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização mostram que a escória de cobre pode ser classificada como resíduo classe II – não inerte. Entretanto, não apresenta riscos ambientais, uma vez que não foi lixiviado nem solubilizado, acima dos limites das normas, nenhum elemento químico considerado tóxico.

As principais conclusões quanto às características do concreto no estado fresco foram:

(a) A adição de escória de cobre não influenciou na trabalhabilidade do concreto. Praticamente não houve alteração na relação entre água e cimento dos concretos produzidos com adição de escória, em relação aos sem adição, exceto para a relação 0,40, que com a adição de escória aumentou para 0,41.

(b) A massa específica do concreto no estado fresco aumentou um pouco com adição de escória. A diferença, no entanto, foi de, no máximo, 1,2%.

As principais conclusões quanto às características do concreto no estado endurecido foram:

(a) A absorção por imersão foi menor para os concretos com adição de escória, principalmente nas relações entre água e cimento maiores. O índice de vazios também diminuiu com a adição de escória, reforçando as conclusões anteriores.

(b) Os concretos com adição de escória de cobre também apresentaram melhor desempenho quanto à absorção por sucção capilar. A taxa de absorção diminuiu, e a resistência capilar aumentou. Isso significa que, além de apresentarem menor porosidade nos concretos com adição de escória, provavelmente, os poros estão mais bem distribuídos, reduzindo a formação de capilares.

(c) A profundidade de carbonatação foi menor nos concretos com adição de escória de cobre. A

influência foi mais significativa na relação entre água e cimento de 0,60, e com maiores tempos de exposição do concreto ao CO₂.

(d) A influência da adição de escória de cobre ao concreto também ficou evidenciada nos resultados dos ensaios de ataque por sulfato. Os índices de resistência química “R” dos concretos com adição foram bastante superiores aos do concreto de referência. Mais uma vez, o melhor desempenho se deu para maiores relações entre água e cimento, quando se tem maior porosidade do concreto. O valor “R” chega a ser 100% maior para relação entre água e cimento de 0,60. No que se refere à variação de massa, verificou-se pequeno ganho de massa nos concretos com adição e pequena perda nos concretos de referência, exceto para a relação entre água e cimento de 0,50. Entretanto, não foi possível tirar conclusões a esse respeito, já que a variação não foi significativa.

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM C1012/87: Standard test method for length change of hydraulic: cement mortars exposed to a sulfate solution. In: _____. **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia, 1987.

ARIÑO, A.; MOBASHER, B. Effect of ground copper slag on strength and toughness of cementitious mixes. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 1, p. 68-73, jan./feb. 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211**: Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 1983.

_____. **NBR 9833**: Concreto fresco: determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1987a.

_____. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 1987b.

_____. **NBR 10005**: Lixiviação de Resíduos. Rio de Janeiro, 1987c.

_____. **NBR 10006**: Solubilização de Resíduos. Rio de Janeiro, 1987d.

_____. **NBR 10007**: Amostragem de Resíduos. Rio de Janeiro, 1987e.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 5753**: Cimento Portland Pozolânico: determinação da pozolanicidade. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5752**: Materiais Pozolânicos: determinação de atividade pozolânica com cimento Portland. Rio de Janeiro, 1992a.

_____. **NBR 7223**: Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992b.

_____. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos: especificação. Rio de Janeiro, 1992c.

BITTENCOURT, A.L.B. **Otimização de escória do forno elétrico da Caraíba Metais S.A.** 1992. 187 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Metalúrgica) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 1992.

GOPALAN, M. K. Sorpivity of fly ash concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 8, p. 1189-1197, 1996.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992. 349 p.

IRASSAR, E. F. Sulfate resistance of blended cement: prediction and relation with flexural strength. **Cement and Concrete Research**, v. 20, n.2, p. 209-218, 1990.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 102 f. Tese

(Livre docência) - Escola Politécnica, Universidade de São de São Paulo, São Paulo, 2000.

KELHAM, S.A. Water absorption test for concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 40, n. 10, p. 106-110, jun. 1988.

KOCH, A.; STEINEGGER, H. A rapid method for testing the resistance of cements to sulphate attack. **Wiesbaden**, v. 13, n. 7, p. 317-324. jul. 1960.

MARCIANO, Z. A. N. **Desenvolvimento de um método acelerado para avaliação da resistência de argamassas de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio**. 1993. 202 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

MOURA, W.A.M. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. 2000. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos**: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssilica. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SILVEIRA, A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos**: estudo do ataque por sulfatos. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.