

Estabilização e viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria elétrica

Stabilization and technical feasibility of electric steel slag

Angela Borges Masuero
Denise Carpena Coutinho Dal Molin
Antônio Cézar Faria Vilela

Angela Borges Masuero
Núcleo Orientado para a Inovação
da Edificação
Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99 -
3º Andar, Centro
CEP 90.035-190 - Porto Alegre -
RS, Brasil
Tel.: (51) 3316 3518
E-mail: bmasuero@cpgec.ufrgs.br

**Denise Carpena Coutinho
Dal Molin**
Núcleo Orientado para a Inovação
da Edificação
Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Tel.: (51) 3316 3518
E-mail: dmolin@ufrgs.br

Antônio Cézar Faria Vilela
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Minas, Metalúrgica
e de Materiais
Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99 -
6º Andar, Centro
CEP 90.035-190 - Porto Alegre, RS
- Brasil
Tel.: (51) 3316 7073
E-mail: vilela@ufrgs.br

Recebido em 20/03/04
Aceito em 13/09/04

Resumo

Escórias de aciaria elétrica são resíduos gerados na produção do aço. São materiais de características expansivas, causadas principalmente pela presença de óxido de cálcio livre, óxido de magnésio reativo, óxido de ferro e pela metaestabilidade do silicato dicálcico. A utilização deste resíduo passa pela sua estabilização quanto à expansibilidade. Este trabalho apresenta uma breve revisão da geração, dos agentes e mecanismos causadores da expansão das escórias. É testado um método de estabilização da escória de aciaria elétrica quanto à sua expansão e avaliado o comportamento mecânico e quanto à absorção de água de argamassas com uso de uma escória de aciaria estabilizada. Os resultados encontrados indicam que argamassas com até 50 % substituição de cimento por escória estabilizada (ACIGRAN) apresentam desempenho semelhante do ponto de vista mecânico e de absorção de água que argamassas sem escória.

Palavras-Chave: escória de aciaria elétrica, expansibilidade, estabilização, comportamento mecânico, absorção de água

Abstract

Electric steel slag are residues of the steel production. It is a material that has expansive behaviour due to the presence of free lime, reactive magnesium oxide, iron oxide and also due to the metastability of dicalcium silicate. The use of this residue depend on its dimensional stabilization. This research work presents a brief review on the electrical steel slag generation, and on the mechanisms and agents that cause the expansive behaviour. A dimensional stabilization method for the electrical steel slag is tested, and an evaluation of the behaviour of the stabilized material in mortars regarding strength and water absorption is presented. Results show that mortars with up to 50% of cement substituted by stabilized slag (ACIGRAN) present similar performance in terms of strength and water absorption compared to mortars without slag.

Keywords: electric steel slag, expansive behaviour, stabilization, strenght, water absortion

Introdução

A importância das questões relativas à conservação ambiental vem crescendo significativamente a partir dos anos 90 tanto nos segmentos da atividade econômica quanto nas políticas governamentais. As empresas vêm sofrendo tanto pressões formais por parte das legislações ambientais como por parte da sociedade e do mercado de uma forma geral. Isto vem fazendo com que uma atenção especial seja dada aos aspectos ambientais para a manutenção da aceitabilidade das empresas ou de um setor, tanto em âmbito regional, nacional como internacional.

A principal fonte de degradação ambiental é a geração de resíduos. Para solucionar este problema, a reciclagem, uma vez comprovado que o material não possui periculosidade, pode ser um vasto campo de aplicação, com retorno financeiro (LIMA, 1999). Dentre os diversos resíduos gerados pela indústria, pode-se destacar as escórias de aciaria geradas na produção do aço (TOPKAYA et al., 2003), que, além da problemática da elevada geração, apresentam um caráter expansivo (RAI et al., 2002). Como consequência, uma grande parte destas escórias não possui utilização, sendo armazenadas em áreas abertas, ou, quando usadas sem o devido controle de qualidade, são as responsáveis pelo surgimento de manifestações patológicas nos materiais aos quais foram incorporadas.

O presente trabalho tem como objetivo testar um método de estabilização da escória de aciaria elétrica quanto à expansibilidade e avaliar a viabilidade técnica, do ponto de vista mecânico e de durabilidade, do uso da escória tratada como substituição ao cimento em argamassas.

Geração das escórias

Do processo siderúrgico, as escórias são os resíduos de maior geração. Estima-se que sua geração situa-se entre 70 a 170 kg/t de aço bruto (PEREIRA, 1994). A geração das escórias pode se dar tanto na fusão redutora dos minérios para obtenção do ferro-gusa, como na etapa subsequente, na produção do aço, resultando nas escórias chamadas de alto-forno e de aciaria, respectivamente.

Com o uso de distintas tecnologias para a produção de aço, escórias de aciaria de diferentes características são geradas, de forma que, para

entender o comportamento destas, se faz necessário o conhecimento dos processos de fabricação do aço. A Figura 1 mostra, simplificada, os principais processos de produção do aço e as respectivas etapas de geração de escórias.

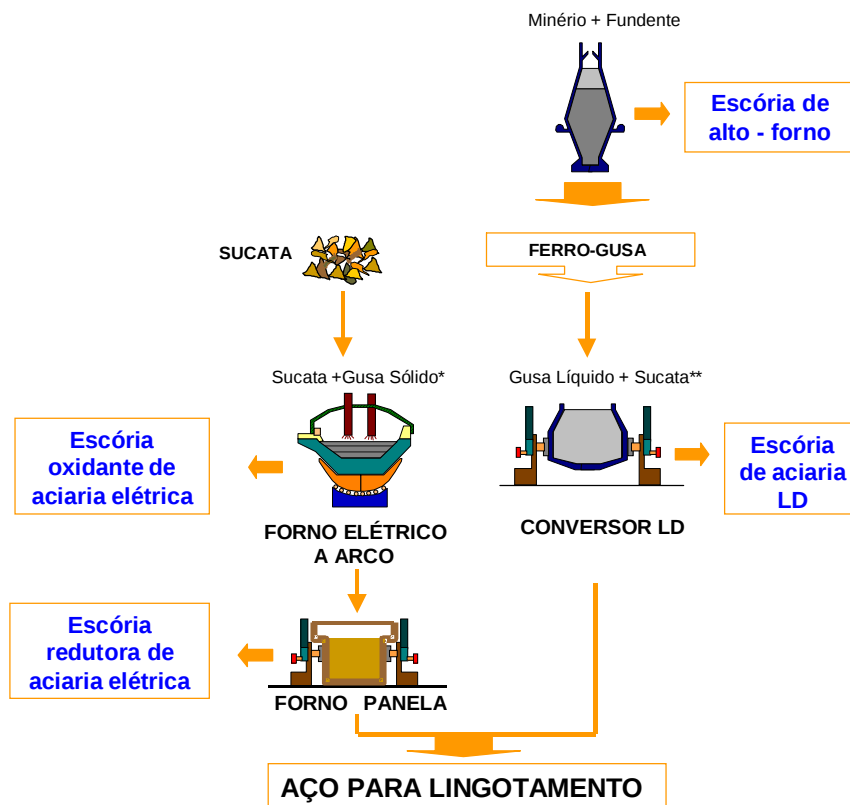
Os dois principais métodos de produção do aço são: (a) através da fusão e refino da sucata em fornos elétricos a arco; e (b) através do refino do gusa líquido em conversores a oxigênio (SANO et al., 1997). O primeiro é produzido normalmente a partir de uma carga sólida, enquanto o segundo a partir de uma carga líquida, precedida de um carregamento de sucata. Os respectivos processos de fabricação são designados pelo tipo de equipamento, ou seja, forno elétrico a arco (FEA) e conversor LD (e suas variações).

Da mesma forma que os fornos, as escórias de aciaria são classificadas basicamente em escória de forno elétrico, formada quando da transformação de sucata metálica em aço num forno elétrico a arco, e escória de conversor, formada quando da transformação do ferro-gusa (líquido) em aço (JIS A 5015 / 1992).

As operações de carregamento, fusão, refino oxidante e de vazamento no FEA estão, esquematicamente, representadas na Figura 2. A escória de FEA é chamada de escória de refino oxidante. Esta escória é produzida durante a fusão da carga sólida, com a cal adicionada e pela descaburação com oxigênio do aço no estado líquido, que provoca a oxidação de diversos elementos do banho.

O aço líquido possui uma densidade duas vezes maior que a escória líquida. A escória, sendo mais leve, flutua na superfície do aço líquido a aproximadamente 1650° C. No final do processo de fusão, o forno é basculado (Figura 2) e a escória líquida escorre para um leito de escória, no qual solidifica.

O aço líquido vazado do forno de fusão é conduzido para uma estação de refino secundário, que pode ser um forno-panela. Há a formação de uma nova escória, a partir da adição de desoxidantes e de cal - chamada de escória de refino redutor - que tem como objetivo contribuir para eliminação do oxigênio e do enxofre do aço líquido e o ajuste da composição do aço, pela adição de ferro-ligas.



* matéria-prima preponderante no processo: sucata de aço

** matéria-prima preponderante no processo: gusa líquido

Figura 1 - Representação esquemática da produção do ferro-gusa e processos de produção do aço, com suas respectivas etapas de geração de escórias (MASUERO, 2001)

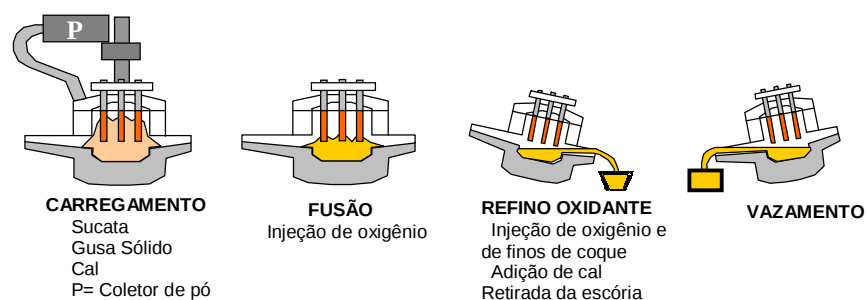


Figura 2 - Representação esquemática do processo de refino do aço através de forno elétrico a arco (MASUERO, 2001)

A maior parte da produção de aço, segundo dados IBS (2003), é feita através do processo de sopro por oxigênio LD, seguido pelo processo com forno elétrico, tanto em nível mundial como nacional. A região sul do Brasil é responsável por 3,4 % da produção brasileira de aço, dos quais 2,3 % no Rio Grande do Sul (IBS, 2003). As siderúrgicas situadas no estado do Rio Grande do Sul são semi-integradas¹ e operam com aciarias elétricas. Considerando uma média de 130 kg/t de aço, tem-se uma geração anual de escória de aciaria elétrica de aproximadamente 87100 toneladas. Com base nestes dados e com o objetivo de solucionar um problema regional, as escórias analisadas ao longo deste trabalho são, portanto, escórias de aciaria elétrica.

Posteriormente ao resfriamento, a escória sofre processo de beneficiamento através de britagem obtendo diferentes granulometrias, de acordo com o fim a que se destinam.

Agentes e mecanismos causadores da expansão

O problema da expansão das escórias é causado principalmente pela presença de óxido de cálcio livre e óxido de magnésio reativo (ALTUN; YILMAZ, 2002; KANDHAL; HOFFMAN, 1997; EMERY; HOOTON, 1977; LEE, 1974), pela metaestabilidade do silicato dicálcico (THOMAS, 1978; GUTT, 1972) e pela presença do óxido de ferro (VIKLUD-WHITE; YE, 1999).

Óxido de cálcio livre

Juntamente com o óxido de magnésio livre, ao óxido de cálcio livre é atribuída a causa principal da expansibilidade das escórias. Algumas pesquisas (GEISELER; SCHLOSSER, 1998; COOMARASAMY; WALZAK, 1995) têm demonstrado que o efeito do óxido de cálcio livre na instabilidade das escórias depende não somente da quantidade existente, mas também da forma em que se encontra e da dimensão do grão.

O óxido de cálcio livre pode estar sob duas formas nas escórias de aciaria: a pura e em solução sólida com ferro ($CaO + x\% FeO$, onde $0 < x < 10$ % em massa). Para Yu-Li e Gong-Xin (1980), altos teores de cálcio, especialmente em solução sólida com pequenas quantidades de ferro, é a causa principal da instabilidade volumétrica das escórias.

Geiseler e Schlosser (1998), através de análise micrográfica, identificaram que a cal livre pode

apresentar-se sob a forma residual e precipitada. A primeira está relacionada com o consumo de refratário e o grau de desfosforação e a segunda tem sua formação durante a solidificação e resfriamento da escória.

A cal residual, com base na sua dimensão, pode ser dividida em duas categorias: aquela com partículas entre 3 e 10 μm , chamadas de *grainy lime* (cal granulosa) e a *spongy lime* (cal esponjosa) com partículas principalmente entre 6 e 50 μm . No primeiro caso, apresentam um contorno mais suave indicando dissolução e normalmente são livres de microinclusões. As chamadas partículas *spongy lime* (cal esponjosa) são cristais indefinidos, com forma freqüentemente irregular, que formam parte da matriz da escória ocorrendo intersticialmente às fases primárias, especialmente ao C_2S^2 (GOLDRING; JUCKES, 1997).

A cal precipitada é formada pela transformação, no estado sólido, do silicato tricálcico em silicato bicálcico e óxido de cálcio livre no resfriamento, conforme a Equação 1 (REEVES; LU, 2000):



A cal precipitada normalmente se encontra no contorno dos grãos de C_2S e no interior do C_3S , com partículas de dimensões normalmente inferior a 4 μm . Esta reação ocorre à temperatura de aproximadamente 1250° C no sistema Ca-Si-O (SLAG ATLAS, 1981).

Segundo Geiseler e Schlosser (1998), o óxido de cálcio livre, sob todas as formas, pode hidratar. Dentre todas, a cal residual chamada de *spongy lime*, com partículas de dimensões maiores que 50 μm , é a mais significativa de todas. Esta conclusão deve estar provavelmente associada ao aumento do volume ocasionado pelas reações de hidratação ou carbonatação, podendo atingir até 121,6% de expansão (MASUERO, 2001). A Figura 3 ilustra o princípio do mecanismo de desagregação da escória devido ao fenômeno de expansão.

A escória apresenta uma estrutura porosa pela qual migra a água e/ou CO_2 , os quais vão reagir com o CaO_{livre} existente, conforme ilustra a Figura 3(a), dando origem a produtos com volume superior ao CaO . No caso da hidratação do óxido de cálcio livre, a soma do volume inicial ocupado por este composto e pela água é menor que o produto de hidratação formado, ou seja, hidróxido de cálcio – ver Figura 3(b), o que pode ser confirmado, por exemplo, ao hidratar-se a cal.

¹ Siderúrgicas semi-integradas operam apenas na etapa de refino e conformação do aço, não na produção de ferro primário.

² C_2S : Ca_2SiO_4

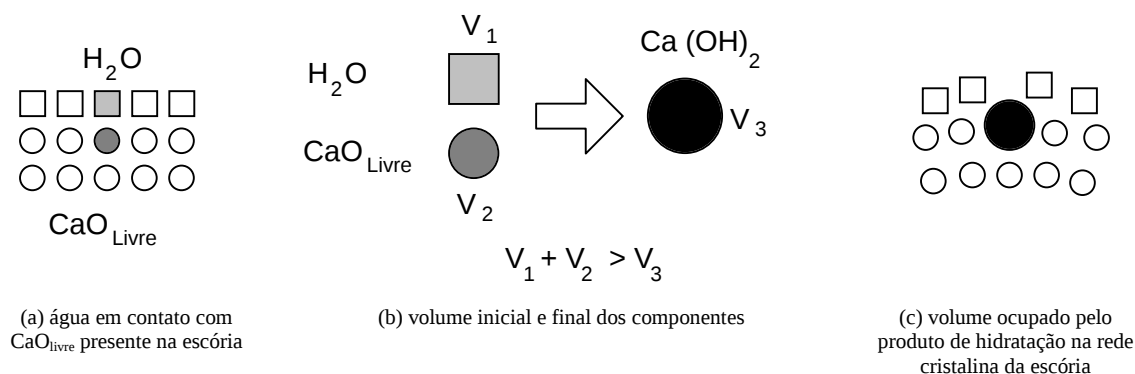


Figura 3 - Mecanismo de desidrataação da escória

Entretanto, como a escória resfriada lentamente já possui sua estrutura cristalina definida, o produto de hidratação do óxido de cálcio livre tende a ocupar o lugar deste dentro da referida estrutura. Se as partículas de $\text{CaO}_{\text{livre}}$ estivessem soltas, sua hidratação geraria um composto de volume menor que o dos componentes, e não seriam geradas tensões pela troca livre dos espaços ocupados pelos componentes com o produto.

No caso da escória, ao invés de preencher perfeitamente o espaço ocupado pelo CaO e pela água, o produto de hidratação tende a ocupar o espaço na rede cristalina anteriormente preenchido somente pelo $\text{CaO}_{\text{livre}}$ e, tendo maior volume que esta, provoca uma deformação na rede cristalina, gerando tensões de tração que, posteriormente, irão gerar microfissuração e expansão, conforme ilustra a Figura 3 (c).

Kneller et al. (1994) também ressalta que a formação de tufa (depósito poroso de carbonato de cálcio) é consequência da reação do hidróxido de cálcio com o ácido carbônico (STOLAROFF et al., 2004). O ácido carbônico é formado pelo dióxido de carbono da atmosfera que, somado ao liberado pelos automóveis, reage com a água da chuva.

A reação entre o hidróxido de cálcio e o ácido carbônico forma o bicarbonato de cálcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), mais solúvel em água que o carbonato de cálcio.

Óxido de magnésio livre (periclásio)

O óxido de magnésio existe sob três formas nas escórias de aciaria: (a) estado quimicamente combinado, (b) não combinado ou livre e (c) em solução sólida com FeO e MnO . A forma combinada, monticellita, é encontrada nas escórias de aciaria elétrica oxidante, enquanto que nas de refino redutor identifica-se o periclásio $\text{MgO}_{\text{livre}}$. A solução sólida é observada em todas escórias, com exceção das escórias redutoras (SHOUSUN, 1980).

Em escórias de baixa basicidade, além da monticellita, pode-se ter o MgO combinado sob a forma de olivina e mervinita, as quais não apresentam a possibilidade de expansão por hidratação (YU-JI; DA-LI, 1983). Luo (1980)³ apud Montgomery e Wang (1991) propõe a Equação 2, como forma de avaliar a estabilidade do MgO .

$$I_e = \frac{\text{MgO}}{\text{FeO} + \text{MnO}} \quad (2)$$

Para $I_e < 1$ MgO é estável, ao passo que se $I_e > 1$ MgO não é estável.

Esta equação está baseada no fato de que a variação das dimensões da célula da sua estrutura molecular está vinculada à composição química da solução sólida. Quando o cátion Fe e/ou Mn entra dentro da solução sólida com cristais de periclásio, há um aumento entre as camadas da célula e ela começa a alargar-se. No caso do inverso, se o cátion Mg , de raio pequeno, entrar na solução sólida com wustita ou manganês, irá ocorrer uma diminuição da célula (SHOUSUN, 1980). Assim, quanto menor o resultado da Equação 2, maior é a dimensão das células e o espaçamento entre camadas, pois a solução sólida é de ferro ou manganês, na qual o Mg estará combinado e não livre. Quando a relação for maior ou igual a 1, existirá MgO livre e a solução sólida é com periclásio, a qual pode gerar instabilidade volumétrica da escória que a contém (SHOUSUN, 1980).

Yu-Ji e Da-Li (1983) concordam em parte com as equações estabelecidas por Luo (1980), porém não fazem referência em relação ao óxido de manganês. Segundo os mesmos autores, se o MgO estiver no estado de solução sólida, sua hidratação irá diminuir

³ LUO, S. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 7., 1980, Paris. Proceedings... 1980. III, 25

devido à dissolução de óxidos metálicos divalentes, tais como FeO . Quando mais de 30 % forem dissolvidos ou quando a quantidade de FeO for superior ao MgO , este óxido será estável.

A hidratação dos óxidos de magnésio não hidratados está associada a um aumento de volume, sendo esta uma das principais causas do problema de expansão das escórias. O óxido de magnésio, por suas reações mais lentas, é o responsável pela expansão a longo prazo. Segundo Sersale (1986) e Shousun (1980), não são todas as formas de óxido de magnésio que são prejudiciais, mas sim aquela em que ele se encontra não combinado ou sob a forma livre, conhecida como periclásio. Esta, após hidratação subsequente, irá reagir expansivamente formando $Mg(OH)_2$, denominada de brucita (GLASSER, 1991). O mecanismo de desagregação da escória em contato com água, é o mesmo apresentado pela hidratação do óxido de cálcio livre, o qual está ilustrado na Figura 3.

Silicato dicálcico

O silicato dicálcico também apresenta uma grande importância no fenômeno da instabilidade da escória. O silicato dicálcico ou ortossilicato de cálcio ($2CaO \cdot SiO_2$ ou C_2S^4) ocorre sob quatro modificações (BENSTED et al., 1974):

- (a) α : estrutura trigonal;
- (b) α' (bredigita): ortorrômbico;
- (c) β (Iarnita): monoclinico;
- (d) γ (calco-olivina): ortorrômbico.

A forma α ocorre a temperaturas acima de $1420^\circ C$, quando as escórias estão no estado líquido. Com a queda da temperatura e ao atingir $670^\circ C$, o silicato bicálcico transforma-se para forma β que é instável, sendo capaz de alterar-se para a modificação γ .

Na forma β o poliedro de coordenação do íon cálcio é irregular e apresenta ligações Ca-O que, por serem mais longas, facilitam a hidratação. A forma γ é pouco hidráulica e inerte. Esta inércia pode ser explicada pela coordenação simétrica do íon cálcio e pela grande força de ligação Ca-O, decorrente da baixa coordenação do cálcio (ABCP, 1984).

A mudança da fase β para γ ocorre porque a energia livre final (forma γ) é menor que a energia livre inicial (forma β), indicando que a reação é perfeitamente viável e se observará espontaneamente nas determinadas temperaturas (CAMPOS FILHO, 1981).

Esta transformação é problemática uma vez que esta transição de β para γ durante o resfriamento ou mesmo a temperaturas ambientes produz um aumento de volume de cerca de 12%, causando o fenômeno de esfarelamento (LEE, 1974; BENSTED et al., 1974). No início desta transformação há o aparecimento de manchas brancas na escória, e se o silicato estiver presente em grandes quantidades, pode ocorrer a desintegração da escória (KIRSCH, 1972). Este aumento de volume está associado ao volume molar muito maior do $\gamma\text{-}C_2S$ quando comparado com $\beta\text{-}C_2S$ (BENSTED et al., 1974; DAUBE, 1982). A Tabela 1 apresenta as diversas modificações do silicato bicálcico.

Forma	Densidade (g/cm ³)
α	3,03
α'	3,31
β	3,28
γ	2,97

Tabela 1 - Densidade das diversas modificações do silicato bicálcico (DNER, 1988).

Óxidos de ferro

As escórias possuem, além de fases não metálicas, uma grande quantidade de partículas ferrosas. No caso das escórias LD, estas são incorporadas no sopro ou durante o próprio vazamento no pote da escória (CRUZ et al., 2000).

Uma das fases mais comumente encontrada nas escórias é a wustita, a qual através de reações de oxidação se transforma em compostos de maior volume, podendo ser também responsável por parcela da expansão, apesar da tendência de formar uma solução sólida com manganês e magnésio, devido a altos teores de ferro (SERSALE, 1986).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), o aumento de volume devido à transformação do ferro metálico ($Fe \rightarrow 2e^- + Fe^{2+}$) em ferro oxidado $FeO \cdot (H_2O)_x$, pode se dar até 600% do metal original.

Mancio (2001) analisando o comportamento expansivo de escórias de aciaria elétrica expostas ao ambiente, observou a desagregação de grãos de escórias de diâmetros aproximados de 25 mm e 32 mm, decorrente da fissuração originada a partir de pontos contendo alto teor de ferro.

⁴ Nomenclatura da química do cimento: C=CaO; S=SiO₂

Programa experimental: resfriamento brusco da escória

O presente programa experimental tem como objetivo avaliar um método de estabilização das escórias de aciaria elétrica quanto à expansibilidade e verificar o desempenho, do ponto de vista de resistência mecânica e absorção de água, de argamassas com uso de escória tratada como substituição ao cimento.

O processo de resfriamento da escória de aciaria elétrica foi validado pela análise das características químicas, físicas e mineralógicas, bem como da expansibilidade das escórias antes e após o processo de resfriamento.

Para avaliação do comportamento das argamassas com escória de aciaria tratada quanto à resistência à compressão e absorção de água, foram analisados 3 traços (1:1,5, 1:3 e 1:4,5), com 4 teores de substituição (0, 10, 30 e 50 %) e 3 idades (7, 28 e 91 dias)

Caracterização da escória antes do processo de resfriamento

A amostra de escória de aciaria elétrica utilizada nos ensaios foi uma escória resfriada lentamente ao ar, por ser este processo usualmente empregado para resfriamento das escórias de aciaria. A amostra foi obtida na pilha de armazenamento das escórias oxidantes no pátio da empresa beneficiadora, a partir de coleta em 12 pontos distintos (diferentes alturas e profundidades).

A composição química do material, após sua homogeneização e quarteamento, está apresentada na Tabela 2. A determinação do óxido de cálcio livre foi feita por dissolução em etileno glicol.

As escórias foram analisadas em termos de seus constituintes mineralógicos com o objetivo de determinar seu grau de cristalinidade, através de difração de raios-x. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.

Do ponto de vista de caracterização quanto à expansibilidade, foram realizados os ensaios de Autoclave ASTM C 151 (1993), ensaio Le Chatelier NBR 11582 (ABNT, 1991), ensaio adaptado das barras em matriz de cimento baseado ASTM C1260 (1994) e o ensaio de dilatação em água para escória siderúrgica JIS A 5015 (1992).

Os três primeiros ensaios são feitos em uma matriz cimentícia. Para estes ensaios, nos quais a escória de aciaria elétrica participa como substituição ao cimento, a escória foi moída em moinho de bolas horizontal durante 60 min e posteriormente peneirada na malha #200 da série normal ABNT (0,075 mm). O diâmetro médio das partículas, determinado através de granulômetro a laser, é de 4,83 μm .

A expansão obtida nos ensaios de Autoclave e de Le Chatelier foi de 2,04 % (limite máx = 0,8 %) e 1,01 mm (limite máx = 5,0 mm), respectivamente. A Figura 5 mostra a expansibilidade avaliada pelo método adaptado das barras. Para efeitos comparativos foram moldados corpos-de-prova apenas com cimento. Em ensaio similar, a norma ASTM C 1260 (1994) estabelece um limite máximo de 0,1% para 14 dias de ensaios

Resfriamento e caracterização da escória resfriada bruscamente

O procedimento de resfriamento brusco com vistas à estabilização da escória de aciaria consistiu em aquecer o forno até a temperatura de 1450° C. Uma vez atingida esta temperatura, a escória colocada em cadinho era mantida no forno durante 50 minutos. A seguir, a escória era retirada e vertida em um tonel de 200 l de água corrente.

Após a escória ser vertida em água, a mesma era removida e colocada em estufa, a aproximadamente 50° C, até a secagem da amostra. Uma vez seca, passava-se sobre esta um imã, com o objetivo de remover toda a fase metálica existente na escória, ora aglomerada em grandes pedaços, ora misturada entre os grãos da escória. Foram realizadas 36 fusões de escória, com seu respectivo resfriamento brusco. No ensaio de dilatação em água para escória siderúrgica JIS A 5015 (1992) a variação dimensional da escória praticamente estabilizou-se a partir do quarto dia, atingindo os níveis máximos de aproximadamente 1,4 %. O limite máximo especificado pela referida norma é de 1,5 e 2,0 %, dependendo do uso especificado. Mancio (2001) sugere a alteração deste ensaio no que diz respeito à duração e à distribuição granulométrica do material para escórias de aciaria elétrica.

Composição Química	Escória de Aciaria antes da granulação (%)
SiO ₂	16,08
Al ₂ O ₃	7,22
FeO	30,36
CaO	29,81
MgO	7,18
Na ₂ O	0,001
K ₂ O	0,04
Ti O ₂	0,43
V ₂ O ₅	0,08
Cr ₂ O ₃	2,14
MnO	3,17
P ₂ O ₅	0,46
S	0,24
Basicidade	1,85
CaO livre	0,97
Massa específica (g/cm³)	3,47

Obs.: Análise por fluorescência de raios X

Tabela 2 - Caracterização química e física das escórias de aciaria elétrica

Intensidade (cps)

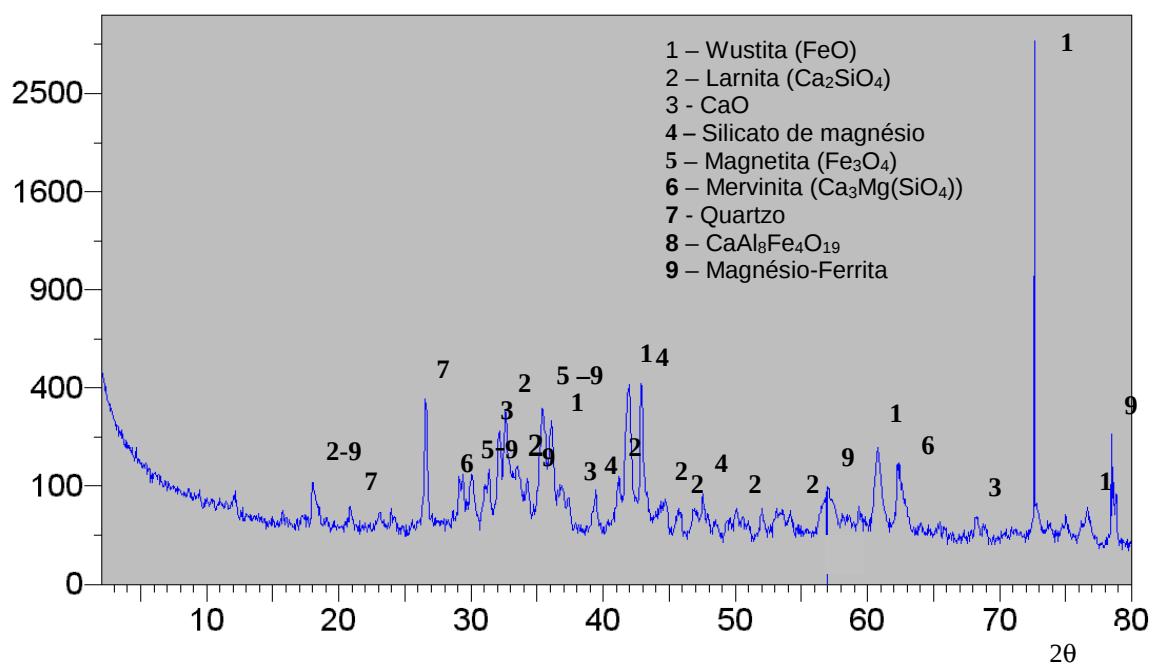


Figura 4 - Difratoograma de raios-x da escória de aciaria elétrica a ser granulada

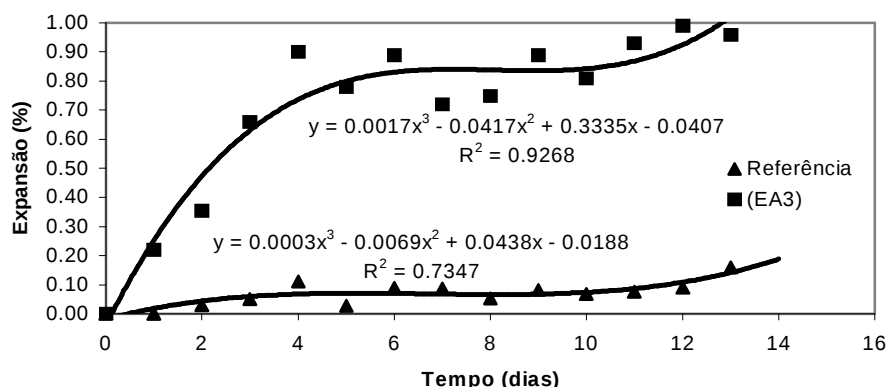


Figura 5 - Expansibilidade da escória de aciaria avaliada através do método adaptado das barras

O resfriamento brusco em água provocou a granulação da escória, ou seja, partículas de pequenas dimensões. Na seqüência do texto, a escória resfriada bruscamente será tratada como escória granulada ou ACIGRANs Figuras 6 e 7 mostram o aspecto das escórias após ao resfriamento brusco, assim como a fase metálica nitidamente separada pela fusão da escória. Observa-se que a escória gerada é bem friável.

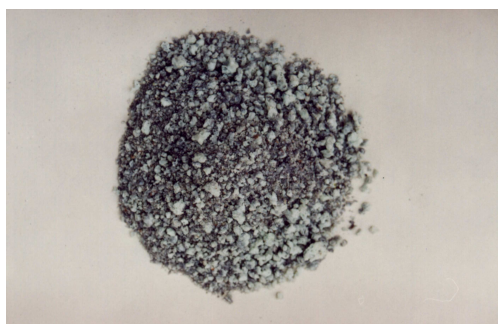


Figura 6 - Aspecto da escória após processo de resfriamento brusco (ACIGRAN) na granulometria tal qual gerada

Durante o processo de resfriamento brusco houve uma separação da fase metálica (Figura 7). Desta forma, observando-se a análise química apresentada na Tabela 3, era esperado um aumento percentual dos outros óxidos da escória granulada, decorrente da redução do óxido de ferro. Esta redução pode ser explicada, qualitativamente, pelo diagrama de ELLINGHAM, onde é apresentada a variação da energia livre padrão de Gibbs pela temperatura para diversos óxidos metálicos em equilíbrio (MASUERO, 2001).

Para que uma reação ocorra espontaneamente é necessário que a variação de energia (ΔG°) seja

negativa. Assim, no diagrama de ELLINGHAM, quanto mais baixa estiver a linha representativa do óxido considerado, mais estável este será. Da mesma forma, para uma mesma temperatura, um determinado elemento opera como redutor sobre todos os compostos cujas linhas representativas estão situadas acima desse elemento.

A composição mineralógica da fase metálica separada indicou a presença de ferro na forma de cementita e ferro puro, sendo assim, um material adequado para retornar ao processo de refino do aço.

A composição química da escória bem como sua massa específica encontram-se no quadro 3.

O diâmetro médio da escória após moagem, determinada em um granulômetro a laser, foi de 4,83 μm . A área específica, determinada pelo método Blaine foi de 5290 cm^2/g . O grau de vitrificação foi determinado pelo método Mac Master, obtendo-se 98,38 %, valor este considerado bastante elevado. Este método consiste em analisar, sob microscópio óptico de luz transmitida, a existência de luminescência, a qual indica a presença de fase cristalina. Quanto mais escura a luminescência, menor será o seu grau de vitrificação e, conseqüentemente, menor será a sua potencialidade hidráulica (SILVA FILHO, 2001). Escórias nacionais de alto-forno apresentam teores de vidro superior a 90%. O índice de refração foi de 1,63, valor este similar ao das escórias de alto-forno nacionais.

A determinação do óxido de cálcio livre foi realizada através de dissolução em etileno glicol, obtendo-se o valor de 0,05. Este valor é muito pequeno, bem inferior a alguns limites máximos sugeridos, de 4 a 5 % (MONTGOMERY; WANG, 1991).

A reatividade da escória foi calculada através do teste de Michelsen. O valor encontrado para ACIGRAN foi de 2min12s, enquanto o valor de referência foi de 2min49s. Segundo Cincotto et al. (1994), para uma escória de boa qualidade este valor varia de 2 a 4 minutos.

A composição mineralógica foi realizada através de Difração de Raios X. Como pode ser observado na Figura 8, após o processo de granulação, a escória passa a ter uma estrutura amorfa. Desta forma, não se observa a existência de agentes causadores da expansão, os quais possuem estrutura cristalina.



Figura 7 - Fase metálica separada durante o processo de resfriamento brusco

Os mesmos ensaios realizados para escória não granulada foram feitos para escória granulada, com exceção ao de imersão – JIS 5015 (1992). Este ensaio não foi realizado devido à curva granulométrica do material obtido ser completamente distinta da preconizada pela respectiva norma e pelo material ser bastante friável, o que levaria à sua desagregação no momento da compactação.

Os resultados obtidos foram 0,0016 e 0,1 nos ensaios de autoclave e Le Chatelier, respectivamente.

Verifica-se uma expansão muito pequena, bem inferior aos limites especificados para as referidas normas. A expansibilidade avaliada pelo método das barras, pode ser visualizada na Figura 9, na qual se pode observar a redução significativa da expansão apresentada antes e após o resfriamento brusco.

As argamassas foram confeccionadas com cimento, agregado miúdo e escória de aciaria elétrica granulada, denominada de AciGran. O desempenho mecânico foi avaliado através da resistência à compressão axial dos corpos-de-prova de argamassa.

As idades avaliadas foram 7, 28 e 91 dias. Com vistas a avaliar o efeito pozolânico da ACIGRAN, analisou-se o teor de hidróxido de cálcio de pastas de cimento. Cabe ressaltar que a atividade pozolânica da escória ACIGRAN, através do método físico preconizado pela norma NBR 12653 (ABNT, 1992), foi demonstrada por Masuero (2001).

Por ser a água fator central para a maioria dos problemas de durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994), foram realizados ensaios de absorção capilar através do método KELHAM, em corpos-de-prova com 28 dias de idade. Materiais

O cimento empregado foi cimento Portland Comum (CPI S), classe 32. As características químicas e físicas deste cimento estão apresentadas na Tabela 4. O agregado miúdo utilizado foi a areia normal brasileira composta por quatro frações, conforme NBR 7214 (ABNT, 1990).

A escória usada como substituição ao cimento foi obtida através da moagem em moinho horizontal e de seu posterior peneiramento na malha # 200 (0,075mm). O diâmetro médio da ACIGRAN é de 4,83*µm

Proporcionamento dos materiais

A avaliação das propriedades das argamassas com escória de aciaria granulada (ACIGRAN) foi feita em três traços, 1:1,5, 1:3,0 e 1: 4,5 (cimento: areia). A escória foi utilizada em substituição ao cimento, em volume, nos teores de 0 (referência), 10, 30 e 50 %. A substituição foi feita em volume em função da diferença entre as massas específicas ($\phi_{\text{cim}} = 3,11 \text{ g/cm}^3$; $\phi_{\text{acigran}} = 2,91 \text{ g/cm}^3$).

A consistência foi escolhida como parâmetro de controle. O valor adotado foi de $260 \pm 10 \text{ mm}$, determinado na mesa de consistência NBR 7215 (ABNT, 1996). As Tabelas 5 a 7 mostram a quantidade de materiais utilizada para moldagem de corpos-de-prova para o ensaio de resistência à compressão, para os três traços avaliados a diferentes idades para argamassas com ACIGRAN e com escórias de alto-forno.

Teor de hidróxido de cálcio

Para comprovar a hipótese de reação química da ACIGRAN, foi avaliado o teor de hidróxido de cálcio através de titulometria em pastas com os mesmos teores das argamassas ensaiadas. Analisou-se também o pH de cada mistura.

Optou-se por trabalhar com pastas e não com argamassas, com bases nos resultados obtidos por

Seidler (1999), nos quais não foi observada diferença significativa entre os resultados obtidos.

As pastas foram confeccionadas com relação água-cimento (a/c) igual a 0,53, referente à relação empregada no traço intermediário (1: 3,0).

Absorção de água

A absorção de água, neste programa experimental, foi avaliada através do Método KELHAM (MASUERO, 2001). O corpo-de-prova de dimensão (100 x 100 x 25) mm, com suas laterais impermeabilizadas, foi colocado em água sobre um dispositivo fixo em uma balança e feitas leituras após (2, 5, 10, 15, 30) min e (1, 2, 3, 6, 12, 24, 48, 72 e 96) h. O ensaio é prosseguido até a saturação total do corpo-de-prova.

Ao construir o gráfico do ganho de massa em função da raiz quadrada do tempo, observa-se duas fases distintas, para as quais é possível interpolar-se duas retas. A primeira atribui-se à absorção inicial de água e à segunda de saturação. A

intersecção destas duas retas é denominado de ponto de saturação ou *nick point*, a partir do qual se inicia a saturação do corpo-de-prova. A taxa de absorção, em $\text{g/cm}^2\text{h}^{1/2}$, é calculada pelo quociente da inclinação da reta referente à fase de absorção pela área efetiva do corpo-de-prova.

A resistência capilar é determinada pela razão entre o ponto de saturação e a espessura do corpo-de-prova, como expresso na Equação 3 (GJORV, 1994):

$$R = \left(\frac{t_{cap}}{e} \right)^2 \quad (3)$$

onde,

R: Resistência capilar (h/m^2)

t_{cap} : abcissa do ponto de saturação ($\text{h}^{1/2}$)

e: espessura do corpo-de-prova (m)

Composição Química	Escória de Aciaria antes da granulação (%)	Escória de Aciaria após Granulação (ACIGRAN) (%)
SiO ₂	16,08	33,08
Al ₂ O ₃	7,22	11,50
FeO	30,36	0,81
CaO	29,81	39,42
MgO	7,18	10,78
Na ₂ O	0,001	0,001
K ₂ O	0,04	0,11
Ti O ₂	0,43	0,76
V ₂ O ₅	0,08	0,05
Cr ₂ O ₃	2,14	0,50
MnO	3,17	3,05
P ₂ O ₅	0,46	0,01
S	0,24	0,09
Basicidade	1,85	1,19
CaO livre	0,97	0,05
massa específica (g/cm³)	3,47	2,91

Obs.: Análise por fluorescência de raios X

Tabela 3 - Caracterização química e física das escórias de aciaria elétrica

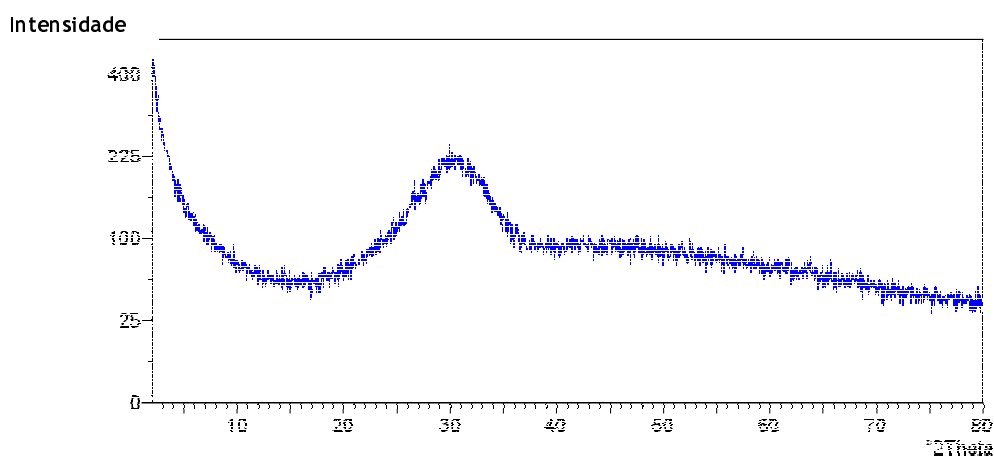


Figura 8 - Difratograma de raios-x da escória de aciaria elétrica granulada (ACIGRAN) Ensaios mecânicos e de absorção de água em argamassas

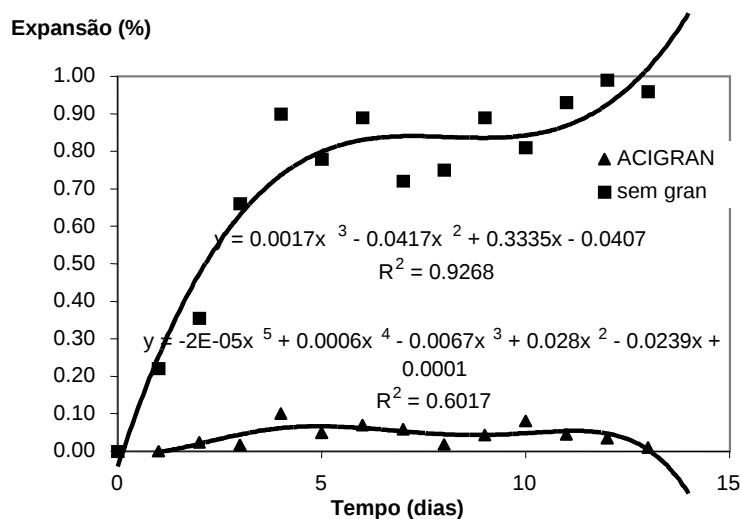


Figura 9 - Expansibilidade da escória granulada ACIGRAN avaliada através do método adaptado das barras (baseado na ASTM C1260)

Características Químicas		Propriedades Físicas		
		Expansão a quente (mm)		0,5
SiO ₂ (%)	19,79	Tempo de pega (min)	Inicial:	190
Al ₂ O ₃ (%)	4,25		Final:	255
Fe ₂ O ₃ (%)	2,60	Blaine m ² /kg		331
CaO (%)	62,24	# 200 (%)		0,90
MgO (%)	4,32	#325 (%)		6,3
SO ₃ (%)	2,47	Resistência à Compressão (MPa)	1 dia	14,1
Perda ao Fogo	3,30		7 dias	27,4
CaO livre	2,69		28 dias	34,0
Resíduo Insolúvel	0,52		91 dias	41,7

Tabela 4 - Propriedades químicas e físicas do cimento⁵

⁵ Dados obtidos com o fornecedor

Teor (%)	Areia = 1500 g			
	Relação	Cimento (g)	Escória (g)	Água(g)
	$\frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{escória}}$			
0	0,33	1000	0,0	330,0
10	0,32	900	93,3	317,9
30	0,31	700	279,4	303,6
50	0,31	500	466,2	299,5

Tabela 5 - Quantidade de materiais necessária para moldagem de argamassas com ACIGRAN, traço 1: 1,5

Teor (%)	Areia = 1500 g			
	Relação	Cimento(g)	Escória(g)	Água(g)
	$\frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{escória}}$			
0	0,53	650,0	0,0	344,5
10	0,52	585,0	60,6	335,7
30	0,51	455,0	181,8	324,8
50	0,51	325,0	303,1	320,3

Tabela 6 - Quantidade de materiais necessária para moldagem de argamassas com ACIGRAN, traço 1: 3,0

Teor (%)	Areia = 1500 g			
	Relação	Cimento(g)	Escória(g)	Água(g)
	$\frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{escória}}$			
0	0,80	520,0	0,0	416,0
10	0,77	468,0	48,5	397,7
30	0,77	364,0	148,5	392,3
50	0,75	260,0	242,4	376,8

Tabela 7 - Quantidade de materiais necessária para moldagem de argamassas com ACIGRAN, traço 1: 4,5

Apresentação dos resultados

Resistência à compressão

As Tabelas 8 a 10 e as Figuras 10 a 12 apresentam os resultados obtidos neste ensaio.

Os dados obtidos foram submetidos a tratamento estatístico, através de Análise de Variância (ANOVA). A Tabela 11 sintetiza os resultados obtidos na análise estatística quanto à resistência à compressão das argamassas com ACIGRAN, mostrando os fatores que apresentam diferenças significativas, ao nível de significância de 95 %.

O mesmo não ocorreu em relação ao teor de substituição. Independente do teor adotado os níveis de resistência são os mesmos. A Figura 14 é

mostrada para evidenciar a potencialidade do uso da ACIGRAN. Este comportamento repete-se ao se analisar o efeito da interação do traço com o teor de substituição.

Calculando-se o índice de hidraulicidade conforme a NBR 5735 (ABNT, 1991), obtém-se o valor de 1,865. A referida norma estabelece que cimentos com escórias de alto-forno devem possuir este índice superior a 1, observando-se, assim, que a ACIGRAN apresenta propriedades hidráulicas. Desta forma, com base na composição química e no grau de vitrificação, justificam-se os mesmos níveis de resistência das argamassas com e sem escórias, devido à reatividade da ACIGRAN, possivelmente associado a um efeito físico, o qual pode ser proporcionado pelo efeito microfíler, de preenchimento de vazios e de refinamento da estrutura de poros, devido à escória atuar como

pontos de nucleação para os produtos de hidratação. Segundo Dal Molin (1995), este efeito baseia-se no princípio de que o material distribui-se nos vazios existentes entre os grãos de clínquer, favorecendo o início das reações de hidratação de um maior número de partículas simultaneamente, de tal forma que o espaço disponível para o crescimento dos produtos de hidratação fica restrito, gerando um grande número de cristais pequenos, ao invés de poucos de grande dimensão. teor de substituição e a idade na resistência à compressão, como pode ser visto na Tabela 11.

O efeito fíler pode ser evidenciado em argamassas com altos teores a baixas idades, as quais apresentam bons níveis de resistência, apesar de inferiores ao de referência. Observa-se que existe uma influência estatisticamente significativa da interação entre o

Hidróxido de cálcio

A porcentagem de hidróxido de cálcio, bem como o pH, estão apresentados nas Tabelas 12 e 13, respectivamente. Cada valor representa a média de duas leituras.

Os resultados da análise estatística referente à influência do teor de substituição e da idade no teor de hidróxido de cálcio e no pH estão indicados nas Tabelas 14 e 15, respectivamente. A única variável que mostrou ter influência significativa no consumo de hidróxido de cálcio foi o teor de

substituição. Observa-se na Figura 15 que quanto maior o teor de ACIGRAN menor o de hidróxido de cálcio. Este comportamento está associado, provavelmente, à soma de dois fatores. A escória possui um menor teor de cálcio que o cimento. Ao substituir-se cimento por ACIGRAN, a quantidade de óxido de cálcio final será menor e, conseqüentemente, a sua produção de hidróxido de cálcio também. Somado a isto, a ACIGRAN, por possuir características pozolânicas, consome Ca(OH)_2 , reduzindo ainda mais a quantidade final de hidróxido de cálcio.

A idade não mostrou influenciar significativamente, pois provavelmente o hidróxido de cálcio gerado, decorrente da hidratação do cimento e da ACIGRAN, é compensado pelo consumo do hidróxido de cálcio pela ACIGRAN na formação do C-S-H.

Não houve influência significativa do teor de substituição, idade e interação entre estas duas variáveis no pH das pastas, apesar de observar que o pH da pasta de referência, para todas as idades, é levemente superior ao das pastas com ACIGRAN.

Absorção Capilar de Água

A Tabela 16 resume os resultados obtidos no ensaio de sucção capilar.

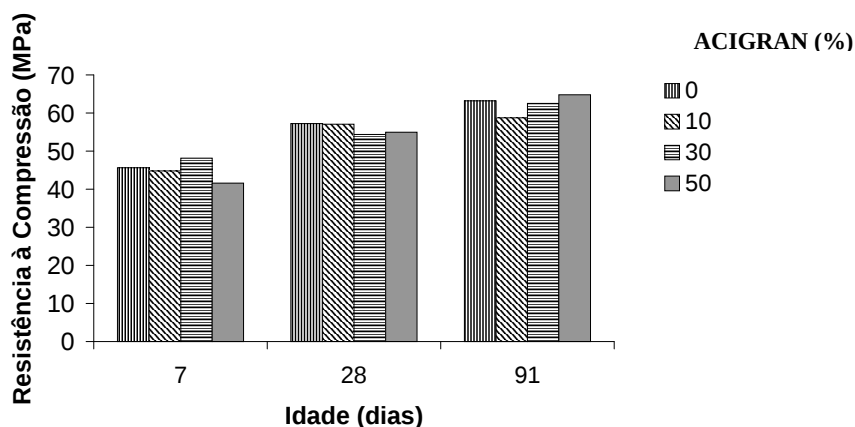


Figura 10 - Resistência à compressão axial, aos 7, 28 e 91 dias, das argamassas de traço 1: 1,5

Teor (%)	$\frac{a}{c+e}$ ¹	fc ₇ (MPa)	fc ₇ médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	fc ₂₈ (MPa)	fc ₂₈ médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	fc ₉₁ médio (MPa)	fc ₉₁ médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
0	0,33	42,6	45,6	2,9	50,1	57,2	5,0	62,7	63,2	5,0
		44,5			61,0			66,2		
		47,8			60,6			60,6		
		43,5			57,1			63,4		
		49,5						53,0		
10	0,32	47,4	44,8	3,1	59,3	57,1	2,6	64,7	58,7	5,4
		40,4			59,5			52,7		
		46,1			53,4			53,5		
		41,4			57,4			60,1		
		46,5			55,7			62,7		
		46,9								
30	0,31	44,4	48,2	3,3	54,5	54,4	4,2	58,1	62,6	6,4
					49,0			66,0		
		49,4			60,2			62,7		
					56,0			71,3		
		50,7			52,3			55,0		
50	0,31	41,2	41,6	1,8	56,7	54,9	1,9	68,8	64,8	5,6
		39,3			53,5			60,9		
		42,0			53,1					
		41,3			56,3			62,4		
		44,4								

¹relação $\frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{escória}}$

Tabela 8 - Resistência à compressão de argamassas com ACIGRAN de traço 1: 1,5 aos 7, 28 e 91 dias

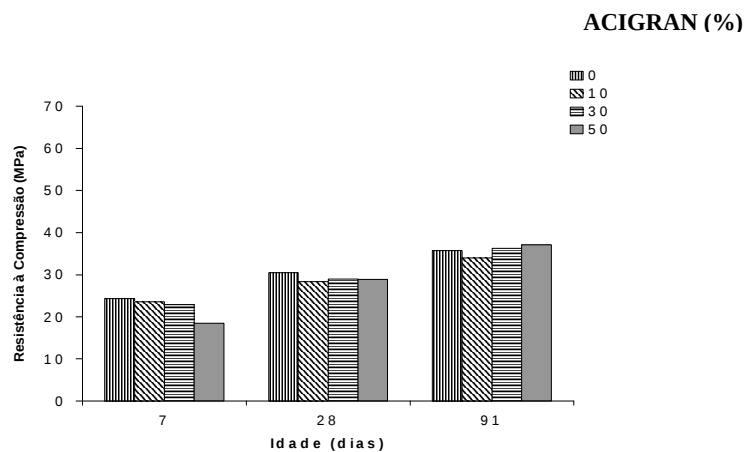


Figura 11 - Resistência à compressão axial, aos 7, 28 e 91 dias, das argamassas de traço 1: 3,0

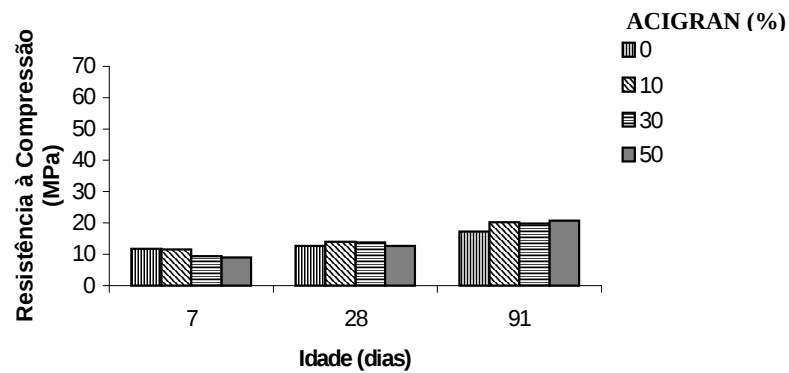


Figura 12 - Resistência à compressão axial, aos 7, 28 e 91 dias, das argamassas de traço 1: 4,5

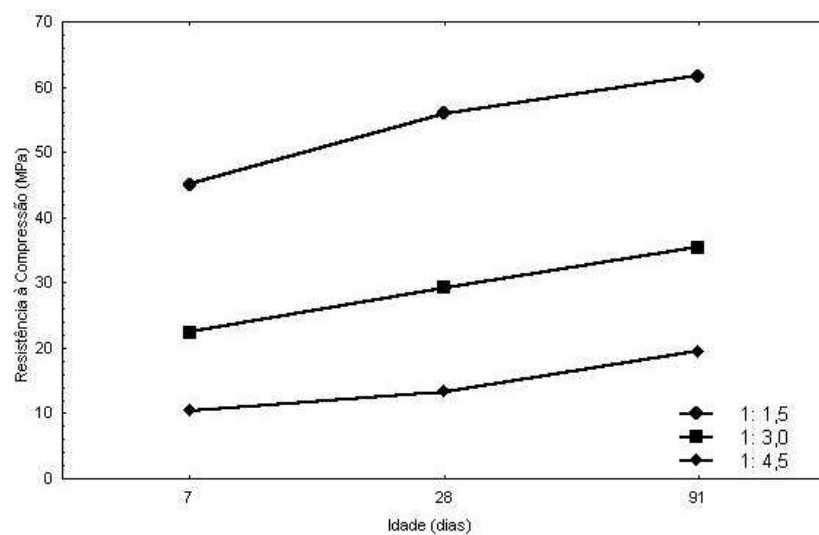


Figura 13 - Efeito da interação entre traço e idade na resistência à compressão das argamassas

Teor (%)	$\frac{a}{c + e}$ ¹	fc ₇ (MPa)	fc ₇ médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	fc ₂₈ (MPa)	fc ₂₈ médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	fc ₉₁ médio (MPa)	fc ₉₁ médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
0	0,53	22,6	24,3	1,9	32,0	30,5	2,1	33,1	35,7	2,4
		25,9			27,2			33,9		
		25,5			30,3			35,9		
		25,8			31,3			39,5		
		21,2			29,0			37,2		
		24,8			33,2			34,6		
10	0,52	24,7	23,6	1,5	29,9	28,4	2,8	35,7	34,0	3,0
		24,6			31,3			29,8		
		24,9			29,2			38,2		
		22,1			29,7			34,9		
		21,8			26,1			34,4		
					24,0			31,3		
30	0,51	21,9	22,9	1,8	30,4	28,9	1,2	36,4	36,3	3,7
		23,8			28,8			37,4		
		20,1			29,0			35,4		
		24,9						35,9		
		22,1			27,6			28,3		
		24,6								
50	0,51	21,0	18,5	2,7	29,5	28,9	2,6	39,0	37,1	3,4
		20,2			24,4			41,0		
		20,2			31,3			37,2		
		15,1			29,6			31,1		
		19,6			29,6			38,2		
		15,0						35,9		

¹ relação $\frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{escória}}$

Tabela 9 - Resistência à compressão de argamassas com ACIGRAN de traço 1: 3,0 aos 7, 28 e 91 dias

Teor (%)	$\frac{a}{c+e}$ ¹	fc ₇ (MPa)	fc ₇ médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	fc ₂₈ (MPa)	fc ₂₈ médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	fc ₉₁ médio (MPa)	fc ₉₁ médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
0	0,80	11,7	11,7	0,34	12,6	12,7	2,3	17,3	17,3	1,7
		11,6			16,6			18,1		
		12,1			9,9			17,3		
		11,1			12,5			18,1		
		11,7			13,6			18,8		
		11,8			11,1			14,0		
10	0,77	11,7	11,6	0,87	14,7	14,1	2,4	21,7	20,2	1,8
		12,5			13,1			22,7		
		12,4			14,6			20,4		
		11,7			9,7			18,8		
		10,4			16,3			19,9		
		10,7			16,0			17,6		
30	0,77	9,9	9,5	0,67	15,0	13,9	2,2	19,6	19,8	2,0
		9,3			14,9			21,1		
		9,9			14,0			20,1		
		10,3			14,4			16,0		
		8,4			9,6			21,4		
		9,3			15,5			20,6		
50	0,75	10,5	9,0	1,36	9,8	12,6	2,6	20,9	20,8	1,3
		7,2			10,1			21,1		
		10,2			15,4			18,3		
		7,6			14,8			21,4		
		9,2			14,7			21,9		
		9,1			11,0			21,1		

¹ relação $\frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{escória}}$

Tabela 10 - Resistência à compressão de argamassas com ACIGRAN de traço 1: 4, aos 7, 28 e 91 dias

FATOR	Grau de Liberdade	Média Quadrática	Fcalc ¹	F _{0,05} ²	Significância ³
Idade	2	2630,70	328,660	3,03	Significativo
Traço	2	24169,31	3019,541	3,03	Significativo
Teor	3	8,37	1,046	2,64	Não Significativo
Idade x Traço	4	102,95	12,862	2,41	Significativo
Idade x Teor	6	41,28	5,157	2,14	Significativo
Traço x Teor	6	9,84	1,229	2,14	Não Significativo
Idade x Traço x Teor	12	9,40	1,174	1,79	Não Significativo
ERRO	158	8,004			

¹Fcalc: Valor calculado de F

²F_{0,05}: Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

³Se Fcalc > F_{0,05}, é significativo

Tabela 11 - Análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, traço e teor na resistência à compressão de argamassas com AciGran

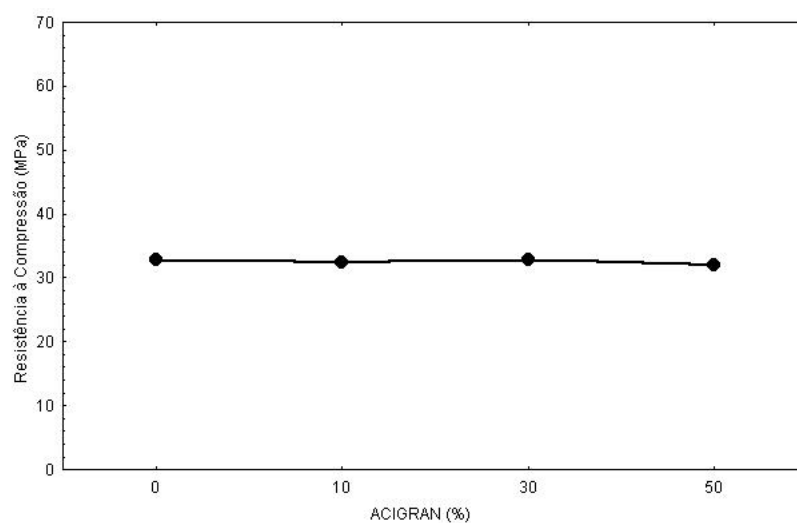


Figura 14 - Influência do teor de substituição na resistência à compressão das argamassas

	Dias				
	3	7	14	28	91
Referência	2,57	2,58	2,81	2,19	2,19
	2,46	2,58		2,38	4,08
10% ACIGRAN	2,25	2,35	3,13	2,46	2,74
	2,57	2,31		3,16	2,49
30% ACIGRAN	2,16	2,18	1,73	2,22	2,31
	1,82	2,18		2,44	1,92
50% ACIGRAN	1,81	1,91	2,33	1,60	1,88
	1,87	1,86		2,22	1,31

Tabela 12 - Hidróxido de cálcio de argamassas com 0, 10, 30 e 50 % de ACIGRAN, aos 3, 7, 14, 28 e 91 dias de idade

	Dias				
	3	7	14	28	91
Referência	13,54	13,54	13,58	13,47	13,47
	13,52			13,50	13,74
10% ACIGRAN	13,48	13,50	13,52	13,52	13,57
	13,57	13,49		13,63	13,59
30% ACIGRAN	13,46	13,47	13,57	13,48	13,49
	13,39			13,52	13,41
50% ACIGRAN	13,39	13,41	13,5	13,33	13,4
	13,40	13,40		13,48	13,25

Tabela 13 - Valor do pH de argamassas com 0, 10, 30 e 50 % de ACIGRAN aos 3, 7, 14, 28 e 91 dias de idade

FATOR	Grau de Liberdade	Média Quadrática	F _{Calc} ¹	F _{0,05} ²	Significância ³
Idade	2	0,005373	0,2284	3,06	Não Significativo
Teor	3	4,1972	178,3696	2,67	Significativo
Idade x Teor	6	0,003149	0,1338	2,16	Não Significativo
ERRO	182	0.02353			

¹F_{calc}: Valor calculado de F

²F_{0,05}: Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

³Se F_{calc} > F_{0,05} é significativo

Tabela 14 - Análise de Variância (ANOVA) do efeito do teor de ACIGRAN no consumo de hidróxido de cálcio

FATOR	Grau de Liberdade	Média Quadrática	F _{calc} ¹	F _{0,05} ²	Significância ³
Idade	4	3,15571	0,920015	2,87	Não Significativo
Teor	3	3,210687	0,890911	3,10	Não Significativo
Idade x Teor	12	3,637826	1,009435	2,28	Não Significativo
ERRO	20	3,603825			

¹F_{calc}: Valor calculado de F

²F_{0,05}: Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

³Significância: F_{calc} > F_{0,05} : S F_{calc} < F_{0,05} : NS

Tabela 15 - Análise de Variância (ANOVA) do efeito do teor de ACIGRAN no pH

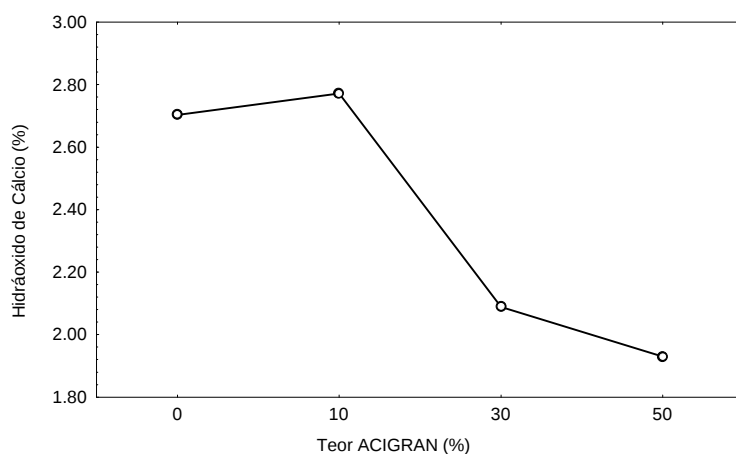


Figura 15 - Influência do teor de substituição da escória na quantidade de hidróxido de cálcio

Traço	Teor ACIGRAN (%)	Relação a/agl	Taxa (g/cm ² h ^{1/2} x10 ⁻²)	Taxa Média (g/cm ² h ^{1/2} x10 ⁻²)	Resistência Capilar (h/m ²)	Resistência Capilar Média (h/m ²)
1:1,5	0	0,33	1,47	1,89	87479	76061
			2,30		64644	
	10	0,32	1,56	1,37	91809	77918
			1,18		64028	
	30	0,31	1,62	1,83	105528	84055
			2,03		62583	
	50	0,31	1,50	1,61	101478	86023
			1,72		70569	
	0	0,53	12,28	11,47	15920	18261
			10,63		20603	
1: 3,0	10	0,52	8,82	8,75	27063	32156
			8,68		37249	
	30	0,51	7,28	6,21	44518	46509
			5,14		48501	
	50	0,51	6,66	4,86	43926	73606
			3,06		103286	
	0	0,80	23,69	19,46	5135	8636
			15,23		12138	
	10	0,77	21,50	15,38	6149	12576
			9,25		19004	
1:4,5	30	0,77	22,80	15,26	4046	21837
			7,72		39629	
	50	0,75	21,11	14,04	5387	25512
			6,96		45637	

Tabela 16 - Taxas de absorção e resistências capilares de argamassas com ACIGRAN

Análise e discussão dos resultados

Analisando os resultados obtidos tanto na taxa de absorção como na resistência capilar, observa-se que há uma grande variabilidade nos resultados, também encontrada por Gonçalves (2000) ao estudar concretos com adição de resíduo de corte de granito.

A variabilidade do presente estudo pode estar associada à moldagem dos corpos-de-prova ou à variação da temperatura ambiente nas duas séries de ensaio. Apesar dos valores entre os dois exemplares apresentarem diferenças entre si, o comportamento dentro de cada série foi o mesmo, de forma que se realizou a análise estatística com todos os valores.

As Tabelas 17 e 18 apresentam a análise de variância realizada para a taxa de absorção e resistência capilar.

A análise estatística resultante indica, da mesma forma que para resistência à compressão, que a única variável que apresentou influência significativa na taxa de absorção e a resistência capilar foi o traço, como pode ser observado nas Figuras 16 e 17, nas quais a taxa de absorção é inversamente proporcional e a resistência capilar proporcional ao aumento do consumo de cimento.

A ACIGRAN pode estar atuando como pontos de nucleação, proporcionando a formação de compostos hidratados que se distribuem formando uma rede capilar descontínua, além de funcionar como um possível agente de refinamento físico e

químico da estrutura, apresentando, assim, os mesmos níveis de taxa de absorção e resistência capilar que as argamassas de referência.

Esta ação benéfica causada pela incorporação da ACIGRAN foi observada por Bauer (1995) ao estudar concretos produzidos com cimento com

24% de escória de alto-forno. Foi observado que à medida que aumenta a relação água-cimento diminui a diferença dos valores obtidos entre as séries que utilizam cimento com adição e sem adição, podendo este comportamento ser atribuído às características de refinamento de poros.

FATOR	Grau de Liberdade	Média Quadrática	Fcalc ¹	F _{0,05} ²	Significância ³
Traço	2	415,2443	14,856	3,89	Significativo
Teor	3	18,4557	0,660	3,49	Não Significativo
Traço x Teor	6	4,8872	0,175	3,00	Não Significativo
Erro	12	27,949			

¹Fcalc: Valor calculado de F

²F_{0,05}: Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

³Se Fcalc > F_{0,05} é significativo

Tabela 17 - Resultados da análise estatística através da ANOVA da taxa de absorção por sucção capilar das argamassas com ACIGRAN

FATOR	Grau de Liberdade	Média Quadrática	Fcalc ¹	F _{0,05} ²	Significância ³
Traço	2	91504x10 ⁴	23,7069	3,89	Significativo
Teor	3	28587x10 ³	0,7406	3,49	Não Significativo
Traço x Teor	6	10144x10 ³	0,2628	3,00	Não Significativo
Erro	12	38598x10 ³			

¹Fcalc: Valor calculado de F

²F_{0,05}: Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

³Se Fcalc > F_{0,05} é significativo

Tabela 18 - Resultados da análise estatística através da ANOVA da resistência capilar das argamassas com ACIGRAN

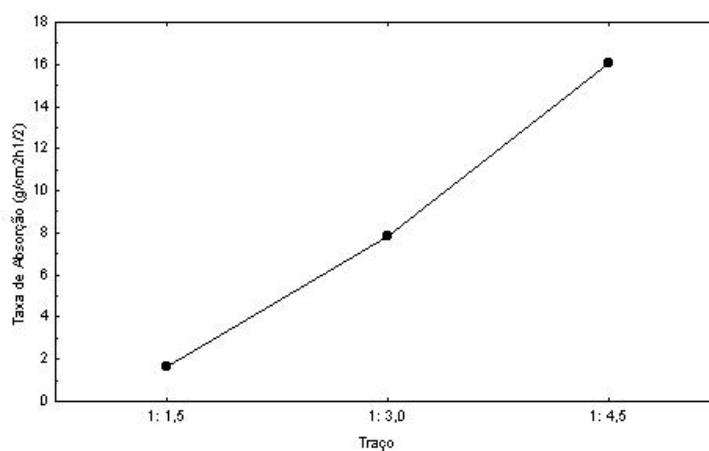


Figura 16 - Efeito do traço na taxa de absorção das argamassas

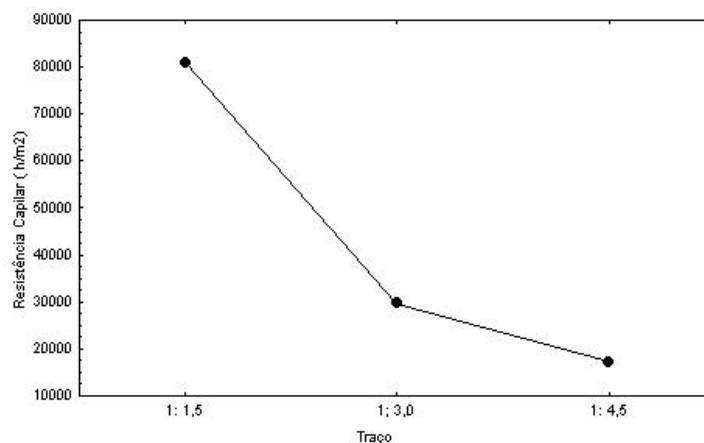


Figura 17- Efeito do traço na resistência capilar das argamassas

Conclusões

Com base no estudo experimental realizado, observa-se que o processo de resfriamento brusco mostrou-se adequado para solucionar o problema de expansão apresentado pela escória de aciaria elétrica. Os resultados apresentados neste trabalho e também outras análises de durabilidade estudados por Masuero (2001) indicam a viabilidade do uso da ACIGRAN (escória granulada) como substituição ao cimento em argamassas.

A utilização desta técnica de resfriamento por parte da indústria siderúrgica é extremamente favorável tanto do ponto de vista ambiental, pelo fato de não necessitar de grandes áreas de descarte para o resíduo, viabilizando seu uso, como no âmbito social, utilizando um material substitutivo ao cimento, tornando-se uma alternativa de material de construção de custo inferior e de igual qualidade, para contribuir com a diminuição do déficit habitacional existente no país.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Curso de microscopia de clínquer de cimento portland**. São Paulo. 1984. 86 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5735 – **Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 7214**: areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 7215**: cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 12653**: materiais pozolânicos: especificação. Rio de Janeiro, 1992.

ALTUN, I. A.; YILMAZ, I. Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement. **Cement and Concrete Research**, New York, v.32, p. 1247-1249, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 1260**: standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (Mortar-Bar Method). Philadelphia, 1994.

_____. **ASTM C151**: standart test method for autoclave expansion of Portland cement. Philadelphia, 1993

BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. 1995. 236 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

BENSTED, J.; VARMA, S.P. Some applications of infra-red and raman spectroscopy in cement chemistry - Part I: Examination of dicalcium silicate. **Cement Technology**, p.256-261, Jan.-Feb., 1974.

CAMPOS FILHO, M. P. **Introdução à Metalurgia extrativa e Siderurgia**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. 153 p. 1981.

CINCOTTO, M.A.; BATTAGIN, A. F.; AGOPYAN, V. **Caracterização da escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado**. São Paulo. IPT, 1992. 33p. (Boletim 65).

COOMARASAMY, T.; WALZAK, T. Effects of moisture on surface chemistry of steel slags and steel slag-asphalt paving mixes. **Transportation Research Board**, n. 1492. p. 85-95. 1995.

DAUBE, J. Etude de la valorisation de Scories d'Acierie L.D. **Silicates Industriels**, n.2, p.55-59, 1982.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssilica**. 1995. 286p. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

GJORV, O. Important test methods for evaluation of reinforced concrete durability. In: V. M. MALHOTRA SYMPOSIUM ON CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT AND FUTURE, 1993, Berkeley, Califórnia. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1994. p. 545-576 (ACI Special Publication, 144).

CRUZ, E. B.; UKAI, E. H. A.; BENEDUCE NETO, F.; TOSETTI, J. P.; FERREIRA NETO, J.B. F. Tratamento pirometalúrgico de escórias de aciaria a oxigênio destinadas à construção civil e fluxos de refino. In: SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS, 31. Vitória, 2000. **Anais...** Vitória: ABM. p. 527-540.

GLASSER, F. P. Chemical, mineralogical, and microstructural changes occurring in hydrated slag-cement blends. IN: SKALNY, J.; SIDNEY, M. (Eds.) **Materials Science of Concrete II**. Ohio: American Ceramic Society. p 41- 81. 1991.

GEISELER, J.; SCHLOSSER, R. Investigations concerning structure and properties of steel slags. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOLTEN SLAG AND FLUXES, 3., 1998, Glasgow. **Proceedings...** Glasgow, 1998. p. 40-42.

GOLDRING, D. C.; JUCKES, L. M. Petrology and stability of steel slags. **Ironmaking and Steelmaking**. v. 24, n. 6, p. 447-456, 1997.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. 2000. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

GUTT, W. Aggregates from waste materials. **Chemistry and Industry**, London, p. 439-447, Jun. 1972.

INOUE, R.; SUITO, H. Hydration of crystallized lime in BOF slags. **ISIJ International**, v. 35, n. 3, p. 272-279, 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA (IBS). **IBS Anuário Estatístico da Indústria Siderúrgica Brasileira**. Rio de Janeiro, 2003.

JIS A 5015. **Escória Siderúrgica para Construção de Estradas**. 1992

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 Paulo, São Paulo, 2000.

KANDHAL, P. S.; HOFFMAN, G. Evaluation of steel slag fine aggregate in hot-mix asphalt mixtures. **Transportation Research Record**, n. 1583, p. 28-36, 1997.

KIRSCH, H. **Mineralogia aplicada para engenheiros, tecnólogos e estudantes**. São Paulo: Polígono/USP, p.180-193. 1972

KNELLER, W. A.; GUPTA, J.; BORKOWSKI, M. L.; DOLLMORE, D. Determination of original free lime content of weathered iron and steel slags by thermogravimetric analysis. **Transportation Research Record**, n. 1434, p.17-22, 1994.

LIMA, L. A. **Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental**. 1999. 243f. Tesis (Doctoral) - Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Canals I Ports, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1999.

LEE, A R. **Blast Furnace and steel slags production, properties and uses**. London: Edward Arnold, 1974. p. 1-97.

LUXÁN, M. P.; SOTOLONGO, R.; DORREGO, F.; HERRERO, E. Characteristics of the slag produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace. **Cement and Concrete Research**, v.30, p. 517-519, 2000.

MANCIO, M. **Caracterização e avaliação das escórias de aciaria elétrica**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MASUERO, A. B. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Minas, Materiais e Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

MONTGOMERY, D. G., WANG, G. Instant-Chilled Steel Slag Aggregate in Concrete **Strength Related Properties**. v. 21, p. 1083-1091, 1991.

- PEREIRA, E.A.C. Aspectos técnicos de gestão de resíduos nas siderúrgicas integradas a coque. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO, MATÉRIAS-PRIMAS E RESÍDUOS NA SIDERURGIA. Volta Redonda, RJ. **Anais...** p. 187-199. 1994.
- REEVES, B. J.; LU, W-K. High Temperature Modification of Steelmaking Slag by Addition of Fayalite Slag to Create a Volumetrically Stable Aggregate. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOLTEN SLAGS, FLUXES AND SALTS, 6., 2000, **Proceedings....** Stockholm, Sweden – Helsinki, Finland. CD-ROM.
- SIDERURGIA. Volta Redonda, RJ. **Anais...** p. 187-199. 1994.
- RAI, A., PRABAKAR, J.; RAJU, C.; MACHALLE, R.K. Metallurgical slag as a component in blended cement. **Construction and Building Materials**, v. 16, p. 489-494, 2002.
- SANO, N.; LU, W.; RIBOUD, P (Eds.). **Advanced Physical Chemistry for Process Metallurgy**. San Diego: Academic Press. 1997. 429 p.
- SCHLACKENATLAS SLAG ATLAS. Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1981.
- SEIDLER, N. **Efeito de adições pozolânicas na alcalinidade e consumo de hidróxido de cálcio durante a hidratação e carbonatação de materiais cimentícios**. 1999. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- SERSALE, R. et al. Characterization and potential uses of steel slag. **Silicates Industriels**, Bruxelles, v.51, p.163-170, 1986.
- SHOUSUN, L. Effect of MgO in steel slag on soundness of cement. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 7., 1980. **Proceedings...** Paris, 1980. p.25-30.
- SILVA, M. G.; SILVA, V. G.; OLIVEIRA, C. T. A.; JOHN, V.; AGOPYAN, V. Reciclagem das escórias siderúrgicas: importância da parceria tecnológica. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS, 1997, Vitória. **Anais...** Vitória: ABM, 1997. p. 29-43.
- STOLAROFF, J.; LOWRY, G.; KEITH, D. Using CaO – and MgO – rich industrial waste streams for carbon sequestration. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v.45, 2004.
- THOMAS, G. Slags. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF BY-PRODUCTS AND WASTE IN CIVIL ENGINEERING, 1978, Paris. **Proceedings...** Paris: Association Amicale des Ingenieurs Anciens Eleves, 1978. v. 3. p. 71-79.
- TOPKAYA, Y.; SEVINÇ, N.; GÜNAYDIN, A. Slag treatment at Kardemir integrated iron and steel works. **International Journal of Mineral Processing**, Amsterdam, 2003.
- VIKLUND-WHITE, C.; YE, G. Utilization and treatment of steelmaking slags. In: GABALLATT, J.; HAGER, R.; SOLOZABAL (Eds.). **Global symposium on recycling waste treatment and clean technology**. San Sebastián: Minerals, Metals & Materials Society and Centro Tecnológico de Materiales de España, 1999. p.337-345.
- YU-JI, W.; DA-LI, L. The steel slag blended cement. **Silicates Industriels**. n. 6. 1983. p.121-126
- YU-LI, W.; GONG-XIN, X. Research on the main mineral phase and its cementitious properties of oxygen converter slag. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 7., 1980, Paris. **Proceedings....** Paris, 1980. v. 3. p.19-24.