

Study of effect of electric arc furnace slag on expansion of mortars subjected to alkali-aggregate reaction

Estudo dos efeitos do uso da escória de aciaria na expansão de corpos de prova sujeitos à reação álcali-agregado

L. SOUZA^a
luciene__@hotmail.com

E. R. ZOLETT^b
elisolett@hotmail.com

R. CARRAZEDO^b
rogcarrazedo@sc.usp.br

Abstract

Alkali-aggregate reaction is a chemical reaction between cement alkalis and some reactive mineral present in some aggregates, leading to concrete expansion and cracking. One kind usually observed and studied in Brazil is the alkali-silica reaction, due to its fast development. There are several methods that are effective to control and mitigate this reaction, and one of them is the partial replacement of cement by mineral additions such as pozzolans like fly-ash, silica fume and slag. In this study, we propose the use of electrical steel slag as a partial replacement of cement, evaluating its effectiveness by NBR 15577:2008, employing different proportions as replacement. It seems that the electrical steel slag, despite its expansive behavior, has been effective in the control of the ASR.

Keywords: concrete expansion, alkali-aggregate reaction, alkali-silica reaction, pozzolans, steel slag.

Resumo

A reação álcali-agregado (RAA) é uma reação que ocorre entre os álcalis do cimento e alguns compostos minerais presentes em determinados agregados, gerando consequências ao concreto, como por exemplo, fissuração. A reação com maiores ocorrências registrada no Brasil é a reação álcali-silica (RAS), devido à rapidez com que esta ocorre em função das formas minerais reativas envolvidas. Vários métodos estudados já se comprovaram eficazes para o controle desta reação, sendo um deles a substituição parcial de cimento por adições como as pozolanas, dentre as quais podem ser citadas as cinzas volantes e as escórias de origem siderúrgica. Neste sentido, este trabalho tem por objetivo o estudo da utilização da escória de aciaria elétrica como redutor da reação álcali-agregado, sendo desenvolvido com base nas orientações da NBR 15577:2008 Agregados – Reatividade Álcali-Agregado, avaliado para diferentes proporções de substituição parcial de cimento por escória. A escória de aciaria elétrica, uma pozolana não tradicional resultante do processo de produção do aço e de características expansivas, teve êxito ao reduzir a expansão da RAS.

Palavras-chave: expansão do concreto, reação álcali-agregado, reação álcali-silica, pozolanas, escória de aciaria.

^a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Câmpus Pato Branco, Pato Branco, PR, Brasil;
^b Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, SP, Brasil.

1. Introdução

A reação álcali-agregado (RAA) é uma reação química originada a partir da junção dos álcalis do cimento e certos tipos de minerais reativos presentes nos agregados. Essa reação pode ou não resultar em um gel expansivo, o qual ao se dispor nos vazios do concreto e na superfície do agregado em contato com a pasta de cimento pode resultar em fissuras generalizadas e desta forma comprometer a qualidade da estrutura [1].

Usualmente a RAA é dividida segundo a composição mineralógica reativa do agregado, em reação álcali-silica (RAS) e reação álcali-carbonato (RAC).

A reação álcali-silicato, comumente observada no Brasil, pode ser classificada como um tipo específico da RAS por suas semelhanças, pois os silicatos com baixa cristalinidade em geral promovem a reação álcali-silica e os de melhor cristalinidade desencadeiam a reação álcali-silicato [2]. Assim a reação álcali-silicato é, em geral, observada em opalas, sílica amorfa, calcedônica, cristobalita e tridimita, além de vidros naturais ou vulcânicos e artificiais (pyrex). A RAS foi identificada em diversas obras de grande porte no Brasil, como pode ser visto no trabalho de Couto [3].

Diversas ações podem ser realizadas para minimizar os efeitos da RAA. A ação mais eficiente é a substituição do agregado por outro não reativo, mas os custos para tal operação podem tornar a execução da obra inviável. Não obstante misturar um agregado reativo com um não reativo pode minimizar os efeitos. Collins e Bareham [4] constataram que os íons metálicos são diluídos pela água absorvida pelos agregados porosos, levando à redução da expansão. Ducman *et al* [5] utilizaram um agregado altamente reativo, porém bastante poroso. Os poros se mostraram suficientes para acomodar todo o gel formado, sem provocar danos ao concreto.

Outra ação interessante é empregar cimento de baixa alcalinidade, reduzindo a disponibilidade de íons alcalinos. No entanto esta medida pode ser ineficaz caso existam outras fontes de íons alcalinos, como de adições e aditivos, assim como sais degelantes e água do mar [6].

O emprego de adições químicas pode levar a resultados expressivos, como os sais de lítio. Para Qinghan *et al* [7] e Lumley [8], o lítio participa da formação do gel mais ativamente que os íons metálicos sódio e potássio, sendo seu produto não expansivo, visto que o lítio reduz o esqueleto da parte sólida do gel, dificultando a absorção da água. Porém seu uso deve ser cauteloso. Os sais de lítio, assim como o hidróxido de lítio, carregam consigo íons hidroxila, e, ao participar dos produtos de hidratação, liberam este íon hidroxila para os poros do concreto, aumentando o pH do ambiente [9]. Interessante notar que, para Mo *et al* [10], o emprego do sal

de lítio não promove aumento na concentração de íons hidroxila, o que contribuiria para sua eficácia.

Ao mesmo tempo, o lítio entra na composição do C-S-H, deixando mais íons metálicos alcalinos em solução, aumentando o potencial reativo do sistema. Assim sendo, quando a quantidade de lítio for pequena, além de haver mais álcalis nos poros do concreto, não sobraram íons de lítio para participar da formação do gel de sílica. Além dos sais de lítio, Diamond [11] estudou a adição de nitrato de lítio (LiNO₃). O nitrato de lítio não aumenta a concentração de íons hidroxila (e, por consequência, não aumenta o pH) por não se dissolver na água de amassamento. Assim a quantidade adicionada pode ser menor, respeitando a parte que será absorvida durante a hidratação do concreto. Qian *et al* [12] observaram que o hidróxido de lítio e outros sais de lítio foram eficientes no combate a reação álcali-silica, porém causaram aumento ou até iniciaram a reação álcali-carbonato. Silva [13] observou que, a partir de um limite, a adição de nitrato de lítio não mais alterava sua eficiência, e que, em testes de mais de 30 dias, a mistura com nitrato conseguiu manter sua redução, em contraste ao observado com a adição de cinza volante.

De qualquer forma, a ação mais empregada para minimizar e até suprimir a reação álcali-agregado é substituir parcialmente o cimento por adições minerais, principalmente materiais pozolânicos [14]. Dentre esses materiais pode-se citar as pozolanas naturais, a cinza volante (fly-ash), cinza de casca de arroz, escória de alto forno e o fumo de sílica (sílica ativa) como sendo as mais comuns. Além de combaterem a expansão causada pela reação álcali-agregado, a adição de materiais pozolânicos melhora outras propriedades do concreto, como, por exemplo, a permeabilidade, a resistência ao calor, a difusividade (devido à densificação da matriz) e o tamanho da zona de transição, devido à presença de partículas sólidas menores [15]. Munhoz [16] verificou que, conforme o aumento do teor de adições de escória de alto-forno, cinza volante, metacaulim e de sílica ativa, a expansão devido a RAA é reduzida, assim como Silveira [17], que analisou os efeitos da adição de cinzas de casca de arroz.

Cabe ressaltar que, de acordo com Ramachandran [18], a eficácia com que as misturas de pozolanas naturais, cinza volante, cinza de casca de arroz, escória de alto forno e sílica ativa previnem os efeitos da reação álcali-agregado, vai depender da composição química das misturas (como porcentagem de SiO₂ e íons alcalinos livres), a quantidade adicionada, o tipo de agregado (o tipo de reação que será combatida) e o tipo de álcalis no cimento (Sódio, Potássio ou Lítio).

Dos produtos com características pozolânicas, a escória de aciaria, resultante do processo de produção do aço, é considerada um subproduto sem valor para comercialização e tratada como

Tabela 1 - Características do cimento empregado - CP V ARI RS

Propriedade	Método de ensaio	Resultado	Especificação da NBR 15577-4
Equivalente alcalino em Na ₂ O*	NBR 14 656	0,780 %	(0,90±0,10) %
Óxido de cálcio livre	NBR NM 12	1,31 %	-
Área específica Blaine	NBR NM 76	4743 cm ² /g	(4900±200) cm ² /g
Expansibilidade em autoclave	ASTM C 151	0,08 %	< 0,20%

(*) Equivalente alcalino em Na₂O = 0,658 K₂O% + Na₂O

Tabela 2 - Características da areia empregada

Determinação	Resultados	Limites NBR-7412/82
Material fino passante na peneira 0,075 mm	0,0%	≤ 1,0%
Conglomerados argilosos	0,0%	≤ 0,2%
Teor de feldspato entre peneiras 2,4 e 1,2 mm	2,4 %	≤ 15,0 %
Teor de mica entre peneiras 0,3 e 0,15 mm	1,9 %	≤ 2,0 %
Impurezas orgânicas	< 100 ppm	≤ 100 ppm

Fonte: IPT (28)

refugo, pois é composta por elementos que não são importantes para a constituição do aço. A escória de aciaria é caracterizada pela sua composição de óxidos como o óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), e apresenta uma estrutura porosa, por onde migra a água, reagindo com o óxido de cálcio livre e originando o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), cuja estrutura cristalina tem maior volume, aumentando cerca de 99% do volume inicial. Esse aumento de volume deforma a estrutura cristalina já definida da escória de aciaria, gerando tensões de tração que, posteriormente, geram microfissuras e expansão [19]. No concreto a alta relação Ca/Si da escória de aciaria faz com que haja cal livre com potencial de expansão [20], lembrando que o cálcio é imprescindível para o processo expansivo do gel [21].

A escória de aciaria é objeto de estudo para emprego na construção civil. Luxaân *et al* [22] realizaram estudos de estabilidade química e mineralógica em escórias produzidas em fornos de arco elétrico, observando que não há impeditivos para emprego como material de construção. Já Tsakiridis *et al* [23] utilizaram a escória de aciaria como substituição parcial de matéria prima na produção do clínquer de cimento Portland, tendo obtido por meio de ensaios físicos e mecânicos que a substituição não afeta de forma nega-

tiva a qualidade de um cimento. Qiang e Peiyu [24] corroboram o estudo anterior ao concluir que a escória de aciaria tem hidratação similar ao cimento, quando devidamente particularizada, formando compostos de C-S-H e hidróxido de cálcio.

É interessante observar que Xuequan *et al* [25] empregaram a escória de aciaria, juntamente com cinza volante (fly ash), para produção de um cimento com propriedades cimentícias condizentes, inclusive consumindo parte dos álcalis durante a hidratação, o que leva a redução da expansão devido a reação álcali-agregado. Este artigo apresenta uma avaliação quanto o emprego da escória de aciaria elétrica na minimização da expansão decorrente da reação álcali-agregado, baseado nos métodos de ensaio estabelecidos pela NBR 15577:2008 [26], ou seja, como substituição parcial do cimento, não na produção do clínquer. A segunda parte do artigo apresenta as características dos materiais empregados e as técnicas para realizar os ensaios. A terceira parte apresenta os resultados obtidos e na quarta as conclusões do estudo.

2. Materiais e programa experimental

Para elaboração dos trabalhos foram utilizados os métodos de ensaio

Figura 1 - Microscopia da escória de aciaria elétrica moída (1000x e 2000x)

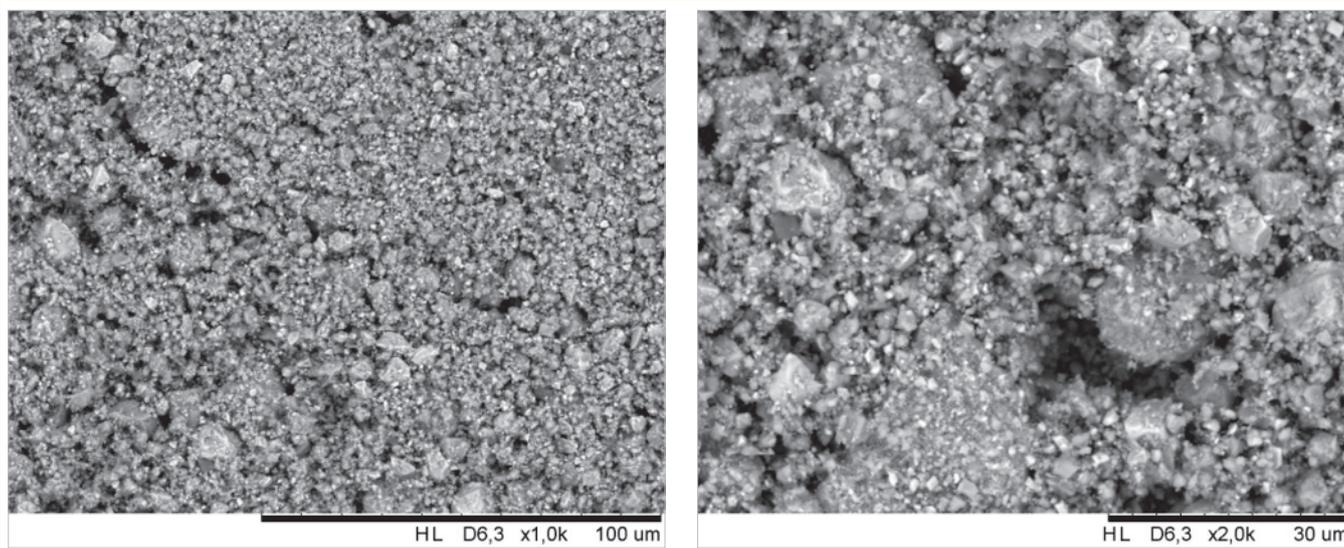
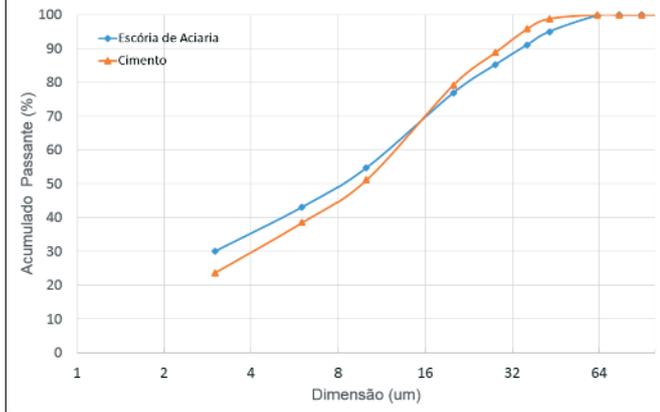


Figura 2 - Granulometria a laser da escória de aciaria e do cimento empregado

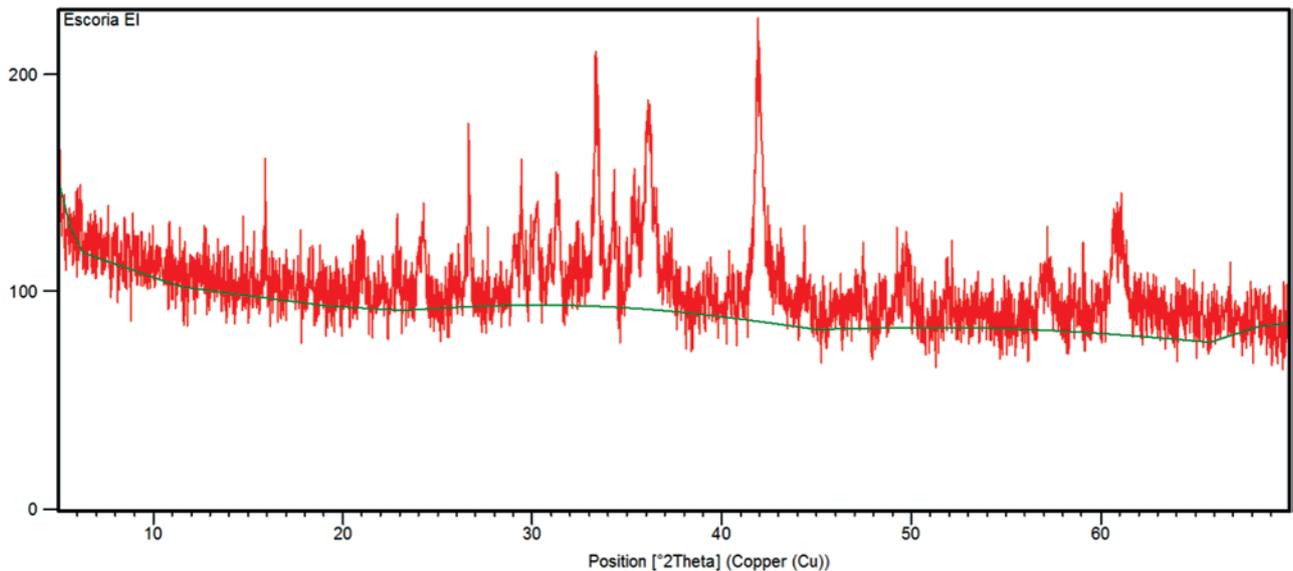


estabelecidos pela NBR 15577:2008 e os materiais empregados foram: cimento CP V ARI RS, que contém características semelhantes ao recomendado pela NBR 15577, conforme pode ser observado na Tabela 1; agregado basáltico de granulação fina, contendo vidro

Tabela 3 - Composição química da escória, por espectrômetro de fluorescência de raio X

Composição química	Escória de aciaria
Fe ₂ O ₃ (%)	30,7
SiO ₂ (%)	24,1
CaO (%)	21,3
Al ₂ O ₃ (%)	7,0
MgO (%)	6,3
MnO (%)	4,0
Cr ₂ O ₃ (%)	1,1
TiO ₂ (%)	0,9
P ₂ O ₅ (%)	0,5
Na ₂ O (%)	0,4
K ₂ O (%)	0,4
SO ₃ (%)	0,4
BaO (%)	0,4
V ₂ O ₅ (%)	0,1
SrO (%)	0,1
ZrO ₂ , Nb ₂ O ₅ , ZnO, Cl (%)	<0,1
Basicidade	1,85
CaO livre	0,97

Figura 3 - Difração de raio X da escória de aciaria



Peak List

96-900-6469; Mg4.00 O4.00; Periclase
96-101-1173; Si3.00 O6.00; Quartz low
96-900-0286; Ca12.00 Mg4.00 Si8.00 O32.00; Merwinite
96-900-6739; Ca4.00 O4.00; Lime
96-900-0800; Si8.00 Mg4.00 Ca4.00 O24.00; Diopside
96-900-0638; Mg3.72 Fe0.28 Ca4.00 Si4.00 O16.00; Monticellite
96-900-3196; K2.40 Na1.60 Cl4.00
96-900-0096; Ca6.00 C6.00 O18.00; Calcite
96-900-3520; Ca3.00 Mg3.00 C6.00 O18.00; Dolomite

Tabela 4 – Composição física da escória

Composição física	Escória de aciaria
Massa específica aparente	3,76 g/cm ³
Expansibilidade (NBR 11582)	0 mm

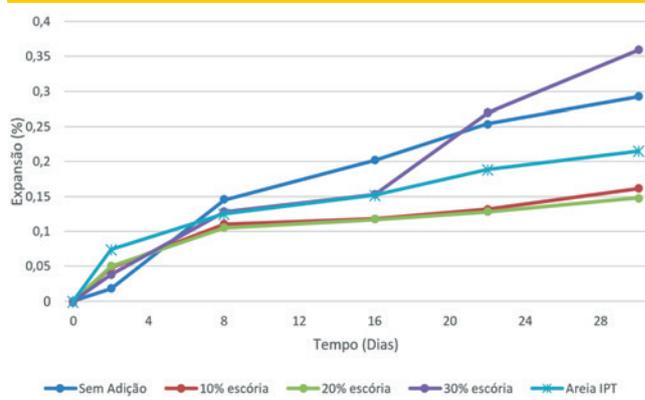
vulcânico disseminado na matriz; areia normal brasileira, adquirida no IPT, com características apresentadas na Tabela 2; e escória de aciaria elétrica. A escória foi moída em um moinho de bolas, sendo separado o material passante da peneira 0,075 mm. Sua microscopia é vista na Figura 1. Percebe-se que os grãos de escória apresentam formas não-lamelares e distribuição granulométrica com diâmetros inferiores a 10µm, com grande quantidade de grãos com diâmetro inferior a 3µm. Na granulometria a laser, apresentada na Figura 2, percebe-se que o resíduo tem granulometria semelhante ao cimento empregado, adequado para uso como adição mineral.

Na difração de raio X, apresentada na Figura 3, os principais compostos observados são o periclásio (óxido de magnésio), quartzo (sílica), cal (óxido de cálcio), álcalis (potássio e sódio), dolomita (CaCO₃.MgCO₃), e calcita (CaCO₃).

Na sequência, as Tabelas 3 e 4 apresentam as principais características da escória de aciaria empregada. Interessante notar que no ensaio de expansibilidade, realizado conforme as recomendações da NBR 11582:2012 [27], não apresentou expansão. No entanto o ensaio foi avaliado apenas até o 7º dia.

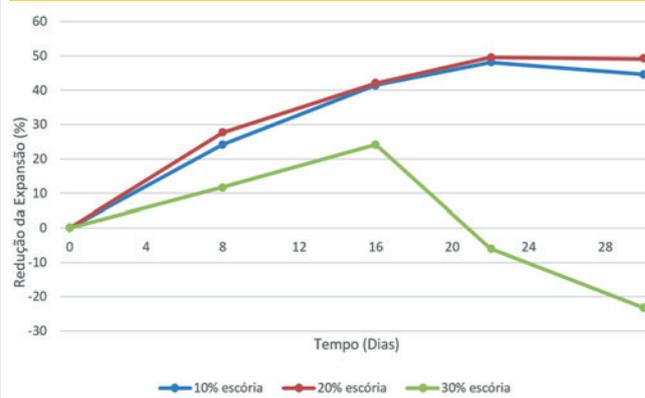
Após a separação dos materiais necessários foi dado início aos ensaios, seguindo as recomendações da NBR 15577:2008, partes 4 e 5. As quantidades de agregados reativos indicados pela norma utilizada dizem respeito à moldagem de três barras prismáticas de argamassa, de seção quadrada com (25±0,7) mm de lado e 285 mm de comprimento. Para dosagem da argamassa foi utilizada uma parte de cimento para 2,25 partes, em massa, de agregado classificado, e relação água/aglomerante (cimento + escória) igual a 0,47 em massa. Assim, foram moldadas três barras prismáticas de argamassa para cada percentual de substituição de cimento por escória, bem como barras de referência (apenas com cimento e agregado reativo) e ainda barras com cimento e areia. Um resumo é apresentado na Tabela 5.

Após a moldagem, as barras foram colocadas em repouso por 24 h em cura úmida. Decorrido o período de cura, as mesmas foram identificadas e feita uma leitura orientativa por meio de um relógio

Figura 4 – Expansão das barras de argamassa

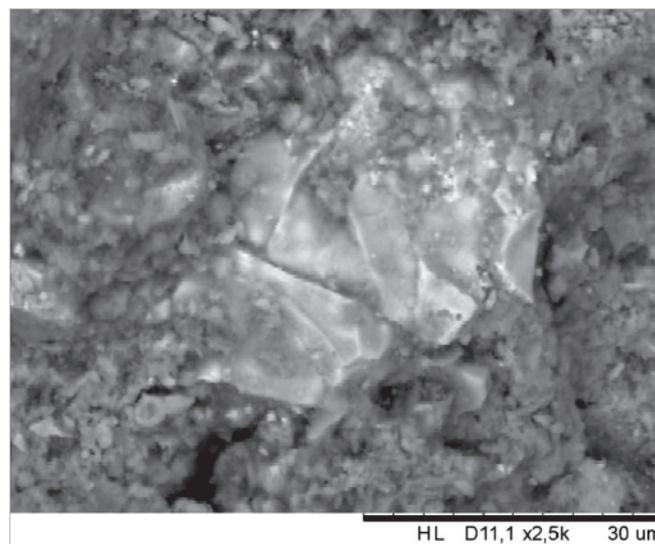
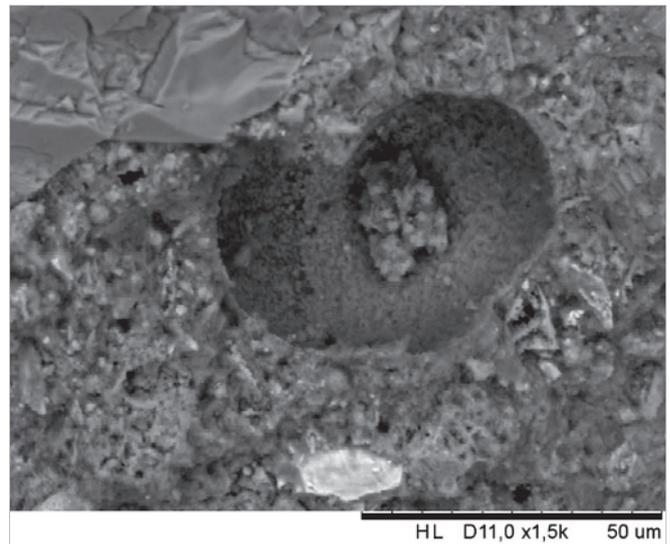
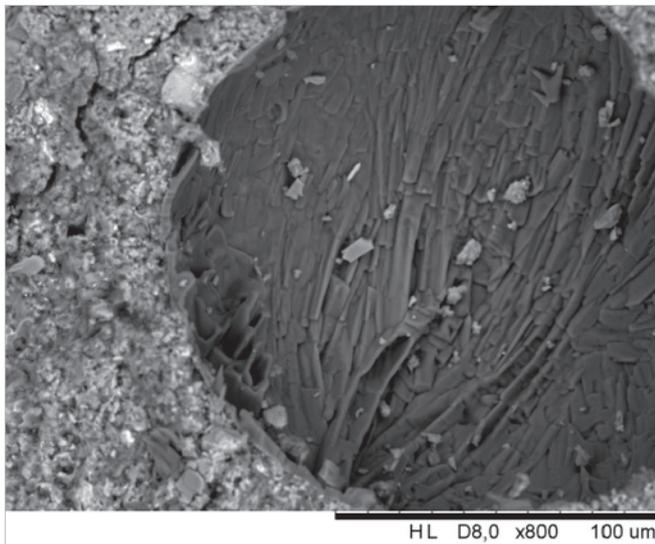
comparador de comprimento.

Posteriormente as barras foram colocadas em um recipiente com água destilada, suficiente para imergi-las totalmente, onde as mesmas permaneceram cobertas por 24 horas em estufa aque-

Figura 5 – Redução de expansão (R), relativa às barras sem adição de escória de aciaria**Tabela 5 – Traços e substituições empregados**

Traço/substituição	1		2,25	0,47
	Cimento (g)	Escória (g)	Agregado (g)	Água (g)
0% (Ref)	146,67	-	330,00	68,93
10%	132,00	14,67	330,00	68,93
20%	117,34	29,33	330,00	68,93
30%	102,66	44,01	330,00	68,93
Areia	146,67	-	330,00	68,93

Figura 6 - Microscopia dos prismas de argamassa para substituição de 30% de escória (800x, 1500x, e 2500x)



cida previamente a 80,0°C . Em seguida foi efetuada uma nova medição e então colocadas em um recipiente de inox coberto, com solução suficiente de NaOH, com concentração de 4%, para que ficassem totalmente imersas e retornadas a estufa regulada em 80,0°C. A temperatura acelera as reações, enquanto que a solução fornece íons alcalinos suficientes, tornando possível a identificação de resultados em um curto espaço de tempo.

Seguindo o prescrito pela norma, foram efetuadas leituras aos 8, 16, 22 e 30 dias, contados a partir da moldagem, para registro das reações apresentadas em cada amostra.

3. Resultados e discussões

Ao término das atividades em laboratório foi possível constatar expansão já nas primeiras medições. A Figura 4 apresenta grafi-

camente a evolução da expansão média pelo tempo. O percentual de expansão foi obtido pela seguinte expressão:

$$R = 100 \frac{E_4 - E_5}{E_4} \quad (1)$$

em que R é a porcentagem de redução da expansão, E_4 é a expansão média das barras sem adição (%) e E_5 é a expansão média das barras com adição (%). Os resultados são apresentados na Figura 5.

Pode-se observar na Figura 5, assim como na Figura 4, que a escória de aciaria foi efetiva na redução decorrente da reação álcali-agregado, devendo, no entanto, ser empregada com critério.

Das barras com adição, o menor percentual de expansão média foi observado na barra com 20% de substituição, com 0,12% aos 16 dias e 0,15% aos 30 dias.

Segundo especificações da NBR 15577-1, apenas quando a expansão for menor que 0,10% aos 16 dias houve a mitigação da reação, o que não foi atingido pelas substituições propostas. No entanto, conforme pode ser observado na Figura 5, houve redução contundente na expansão, na ordem de 40%. É provável que o agregado possua potencial reativo muito elevado, e, como a própria norma reporta, é interessante realizar análise, neste caso, com agregados de menor reatividade.

Outro ponto a ser observado é que a barra com substituição de 30% apresentou significativa redução da expansão aos 16 dias, porém aos 30 dias foi observada expansão. Microscopia eletrônica por varredura foi empregada nas barras com 30% de substituição de cimento por escória de aciaria, que pode ser vista na Figura 6. As duas primeiras imagens, a uma aproximação de 800x e 1500x respectivamente, apresentam uma partícula da escória, com uma aparente borda de reação. Na terceira imagem, de uma partícula de agregado, não há qualquer indício de borda de reação (gel), indicando que a expansão por reação álcali-agregado foi contida, talvez até mitigada. A causa provável da expansão, então, seria o óxido de cálcio livre [20].

Fica um ponto a ser elucidado, em que o excesso de cálcio, ao invés de auxiliar na expansão como seria esperado (vide [21], por exemplo), conteve a reação álcali-agregado.

4. Conclusões

O estudo realizado permitiu a avaliação da eficácia do emprego da escória de aciaria na redução da expansão decorrente da reação álcali-agregado. O agregado basáltico, que contem vidro vulcânico disseminado na matriz, se mostrou reativo, apresentando expansão de 0,86 mm (0,29%) aos 30 dias, acima do limite estabelecido pela norma NBR 15577:2008.

Com relação às adições, observa-se que aos 16 dias ocorreu redução significativa da expansão das barras moldadas com 10% e 20% de escória de aciaria, obtendo redução de quase 54%. Não obstante a redução não levou a expansão inferior ao preconizado por norma, de 0,10%. Ademais, é importante observar que a expansão continua a se desenvolver até a idade de 30 dias de ensaio, o que implica que o agente que desenvolve a expansão não foi contido.

É levantada a hipótese de que a expansão tenha decorrido por excesso de óxido de cálcio livre e de óxido de magnésio, pois não foram observadas bordas de reação ou bolsas de gel nos corpos de prova com teor de 10, 20 e 30% de escória.

Estes fatos levam a conclusão de que uma escória com alto teor de óxido de cálcio (CaO) pode ter efeito inverso ao esperado, podendo mitigar a RAA, mas mesmo assim expandir pela existência de óxido de cálcio livre e óxido de magnésio.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à UTFPR-PB pelo financiamento da pesquisa, e ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, pelo fornecimento do agregado reativo. Também agradecem a prof. Dr. Caroline Angulski da Luz por auxiliar na realização dos ensaios de DR-X e granulometria a laser.

6. Referências bibliográficas

- [1] Pan, J. W.; Feng, Y. T.; Wang, J. T.; Sun, Q. C.; Zhang, C. H.; Owen, D. R. J. Modeling of alkali-silica reaction in concrete: a review. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, v.6, n.1, 2012; p.1-18.
- [2] Tiecher, F. Influence of the crystallinity and deformation of quartz on alkali-aggregate reaction – in portuguese. Ph.D. Thesis, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- [3] Couto, T. A. Alkali-aggregate reaction: a study of the phenomenon in siliceous rocks – in portuguese. Master thesis, Federal University of Goiás, Goiânia, 2008.
- [4] Collins, R. J.; Bareham, P. D. Alkali-silica reaction: suppression of expansion using porous aggregate. *Cement and Concrete Research*, v.17, n.1, 1987; p.89-96.
- [5] Ducman, V.; Mladenovic, A.; Suput, J. S. Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali-silica reactivity. *Cement and Concrete Research*, v.32, n.2, 2002; p.223-226.
- [6] Jensen, A. D.; Chatterji, S.; Christensen, P.; Thaulow, N.; Gudmundsson, H. Studies of alkali-silica reaction. Part 1: a comparison of two accelerated test methods. *Cement and Concrete Research*, v.12, n.5, 1982; p.641-647.
- [7] Qinghan, B.; Nishibayashi, S.; Xuequan, W.; Yoshino, A.; Hong, Z.; Tiecheng, W.; Mingshu, T. Preliminary study of effect of LiNO₂ on expansion of mortars subjected to alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, v.25, n.8, 1995; p.1647-1654.
- [8] Lumley, J. S. ASR suppression by lithium compounds. *Cement and Concrete Research*, v.27, n.2, 1997; p.235-244.
- [9] Diamond, S. Alkali Silica Reactions - some paradoxes. *Cement and Concrete Composites*, v.19, n.5-6, 1997; p.391-401;
- [10] Mo, X.; Jin, T.; Li, G.; Wang, K.; Xu, Z.; Tang, M. Alkali-aggregate reaction suppressed by chemical admixture at 80°C. *Construction and Building Materials*, v.19, 2005; p.473-479.
- [11] Diamond, S. Unique response of LiNO₃ as an alkali silica reaction-preventive admixture. *Cement and Concrete Research*, v.29, n.8, 1999; p.1271-1275.
- [12] Qian, G.; Deng, M.; Tang, M. Expansion of siliceous and dolomitic aggregates in lithium hydroxide solution. *Cement and Concrete Research*, v.32, n.5, 2002; p.763-768.
- [13] Silva, D. J. F. Study of effects of lithium nitrate on expansion of mortars subjected to alkali-silica reaction – in portuguese. Master thesis, São Paulo State University, Ilha Solteira, 2007.
- [14] Monteiro, P. J. M.; Wang, K.; Sposito, G.; Santos, M. C.; Andrade, W. P. Influence of mineral admixtures on the alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*, v.27, n.12, 1997; p.1899-1909.
- [15] Bijen, J. Benefits of slag and fly-ash. *Construction and Building Materials*, v.10, n.5, 1996; p.309-314.
- [16] Munhoz, F. A. C. Effect of mineral admixtures in controlling the alkali-silica reaction and alkali-silicate reaction – in portuguese. Master Thesis, Polytechnic School of the University of São Paulo, São Paulo, 2007.
- [17] Silveira, A. A. Contribution to the study of rice husk ash admixtures on concretes submitted to alkali-aggregate reactions – in portuguese. Ph.D. Thesis, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

- [18] Ramachandran, V. S. Alkali-aggregate expansion inhibiting admixtures. *Cement and Concrete Composites*, v.20, n.2-3, 1998; p.149-161.
- [19] Masuero, A. B.; Dal Molin, D. C. C.; Vilela, A. C. F. Stabilization and technical feasibility of electric steel slag – in portuguese. *Ambiente Construído (On-line)*, v.4, n.2, 2004; p.57-81.
- [20] Hermann, A.; Souza, L.; Luz, C. A.; Pereira Filho, J. I. Valorização da escória de aciaria em cimentos aluminosos e cimento Portland. In: *Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis*, Vitória-ES, 2011.
- [21] Lindgard, J.; Andiç-Çakir, O.; Fernandes, I.; Ronning, T. F.; Thomas, M. D. A. Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing. *Cement and Concrete Research*, v. 42, 2012; p.223-243.
- [22] Luxaân, M. P.; Sotolongo, R.; Dorrego, F.; Herrero, E. Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace. *Cement and Concrete Research*, v. 30, 2000; p. 517-519.
- [23] Tsakirids, P. E.; Papadimitriou, G. D.; Tsvilis, S.; Koroneos, C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *Journal of Hazardous Materials*, v. 152, 2008; p. 805-811.
- [24] Qiang, W.; Peiyu, Y. Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag. *Construction and Building Materials*, v. 24, 2010; p. 1134-1140.
- [25] Xuequan, W.; Hong, Z.; Xinkai, H.; Husen, L. Study on steel slag and fly ash composite Portland cement. *Cement and Concrete Research*, v. 29, 1999; p. 1103-1106.
- [26] Brazilian Technical Standards Association. *Aggregates: Alkali-aggregate reactivity*. NBR 15577, Rio de Janeiro, 2008.
- [27] Brazilian Technical Standards Association. *Portland cement – Determination of soundness by the Le Chatelier method – Method of test*. NBR 11582, Rio de Janeiro, 2012.
- [28] Instituto de Pesquisas Tecnológicas. *Brazilian standard sand*. In: < <http://www.ipt.br/solucoes/255.htm>>