

AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE DE ESCÓRIAS DE ACIARIA DE DIFERENTES SIDERÚRGICAS BRASILEIRAS¹

Daniel Tregnago. Pagnussat²

Rafael Mascolo³

Antonio Eduardo Polissenj⁴

Angela Borges Masuero⁵

Resumo

Propõe-se uma reflexão sobre os critérios de avaliação da expansibilidade de escórias de aciaria. As normas brasileiras não estabelecem claramente limites de utilização, considerando que escórias com diferentes procedências apresentam características igualmente distintas. Assim, pretende-se colaborar para o estabelecimento de parâmetros de avaliação de escórias de aciaria. A pesquisa se dividiu em duas etapas. Primeiramente, foram utilizadas amostras de sete siderúrgicas, sendo cinco de escórias de aciaria elétrica e duas escórias de aciaria LD. Realizaram-se testes de caracterização físico-química e de expansibilidade. Na avaliação da expansão foram utilizados os métodos da EN 1744-1/98 e ASTM C 1260/01. A segunda etapa correspondeu à análise de uma escória de aciaria elétrica submetida a diferentes britagens e tempos de cura. Além da caracterização físico-química, a mesma teve sua expansão avaliada pelos métodos EN 1744-1/98, ASTM C 1260/01 e ASTM D4792/95. As escórias de aciaria LD apresentam potencial deletério superior às escórias de aciaria elétrica, embora algumas escórias de aciaria elétrica também tenham apresentado grandes expansões. O limite de 3,5% de expansão aos sete dias da EN 1744-1/98 não permitiu identificar as reações lentas de hidratação de algumas escórias. O tipo de britagem influencia os resultados experimentais, fato identificado pelo ensaio da ASTM C 1260/01.

Palavras-chave: Escórias de aciaria; Expansibilidade; Ensaio de avaliação.

EXPANSION EVALUATION TESTS OF DIFFERENT BRAZILIAN STEEL SLAGS

Abstract

This paper discusses some evaluation tests for the expansibility of steel slags. The Brazilian standards do not establish using limits clearly, whereas slag of different steel plants have different characteristics. Thus, this work aims to collaborate to the establishment of evaluation parameters for steel slags. This research was divided into two parts. Firstly, slag samples of seven steel plants had been studied - five electric arc furnace slags and two LD slags. Physical and chemical characterization had been carried out, as well as expansion tests, using the methods proposed in EN 1744-1/98 and ASTM C 1260/01 standards. The second step of this research was the analysis of an electric arc furnace slag subjected to different crushing and curing times. EN 1744-1/98, ASTM C 1260/01 and ASTM D4792/95 standard methods had been used to evaluate the expansibility. The LD slag demonstrated more deleterious behavior, although some electric arc furnace slag had also demonstrated high expansions. The limit of expansion of 3.5% in seven days proposed by the EN 1744-1/98 do not permit identify the slow hydration reactions of some slags. The crushing types influence the experimental results, what could be identified by the ASTM C 1260/01 test.

Key words: Steel slags; Expansibility; Evaluation tests.

¹ Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

² Engenheiro Civil, MSc, doutorando do NORIE/UFRGS – danipag@yahoo.com

³ Graduando de Engenharia Civil, pesquisador do NORIE/UFRGS – rafaelmascolo@yahoo.com.br

⁴ Engenheiro Civil, Dr., professor e pesquisador da UFJF – aepoli@terra.com.br

⁵ Engenheira Civil, Dra., professora e pesquisadora do NORIE/UFRGS – angela.masuero@ufrgs.br

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de pesquisas de caráter científico no Brasil tem contemplado, principalmente nas últimas duas décadas, experiências no reaproveitamento de resíduos industriais como subprodutos de valor agregado em outros sistemas produtivos. Tais trabalhos apresentam-se consoantes com o crescente desejo da sociedade em buscar alternativas ambientalmente sustentáveis para os rejeitos por ela produzidos.

O montante de resíduos gerados por uma usina siderúrgica integrada a coque se situa em torno de 700 kg/t de aço líquido.^[1] Considerando a produção mundial, estima-se a geração anual de resíduos em torno de 551 milhões de toneladas. Este número se torna mais significativo se for levado em consideração que, apenas nas últimas décadas, houve um aumento de 100 milhões de toneladas de aço em nível mundial, e 10 milhões de toneladas de aço em nível nacional, representando aproximadamente um aumento de 15 e 66%, respectivamente, conforme dados do IBS^[2,3] e ILAFA.^[4]

Segundo Das et al.,^[5] siderúrgicas integradas utilizam perto de cinco tipos diferentes de matérias-primas, ar, água, combustível e energia para produzir aço. Durante esse processo, são gerados resíduos em quantidade e qualidades variadas.

Além da problemática da elevada geração, os mesmos podem apresentar um caráter expansivo, limitando sua utilização, o que faz com que muitos deles sejam simplesmente descartados e armazenados em áreas abertas. Muitos destes resíduos podem, ainda, ser utilizados sem um mínimo controle de qualidade, e neste caso são geralmente os responsáveis pelo surgimento de manifestações patológicas nos materiais em que foram incorporadas.

Escórias de aciaria, quando utilizadas, por exemplo, para pavimentação rodoviária, são empregadas mais freqüentemente como base e sub-base granular. O caráter expansivo do material, entretanto, quando não houver o controle tecnológico adequado, pode afetar a qualidade do pavimento por ele constituído.

Nesse sentido, normas como a PRO 263^[6] e EM 262^[7] sugerem o valor de 3% como o limite de expansão de escórias quando de sua utilização em pavimentos rodoviários. Este valor é proposto a partir das prescrições de um ensaio adaptado (PTM 130) pelo antigo DNER de Minas Gerais.^[8] Tais prescrições, entretanto, não levam em conta a natureza de diferentes escórias de aciaria, e a dificuldade de medir-se com precisão as características expansivas destes materiais. Escórias de aciaria geradas a partir de fornos elétricos tendem a apresentar valores de expansão diferentes de escórias de aciaria geradas em conversores LD quando ensaiadas.

Como objetivo principal deste trabalho, propõe-se colaborar para o estabelecimento de parâmetros de avaliação de escórias de forno elétrico a arco, e escórias de conversor LD, em diferentes ensaios de avaliação. Assim, este trabalho pretende também servir como uma reflexão crítica sobre os critérios de avaliação da expansibilidade de escórias de aciaria, uma vez que as normas brasileiras não estabelecem claramente limites de utilização, considerando que escórias com diferentes procedências apresentam características físico-químicas e tempos de cura distintos.

1.1 Aspectos Gerais das Escórias

Os dois principais métodos de produção do aço são: através da fusão e refino da sucata em fornos elétricos a arco; e através do refino do gusa líquido em

conversores a oxigênio.^[9] 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 em forno elétrico (EAE), formada quando da transformação de sucata metálica em aço em um forno elétrico a arco e escória de conversor LD (EALD), formada quando da transformação do ferro-gusa (líquido) em aço.

Após o processo de geração das escórias, as mesmas são estocadas em pátios nas próprias empresas, onde permanecem em processo de cura por tempos variáveis.

Os principais problemas associados às escórias estão, porém, ligados ao seu caráter expansivo. A seguir são representadas as equações dos principais elementos causadores de expansões:

- Hidratação do CaO livre e formação de hidróxido de cálcio
 - $\text{CaO}_{\text{livre}} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$
- Hidratação do MgO livre e formação de hidróxido de magnésio
 - $\text{MgO}_{\text{livre}} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2$
- Carbonatação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e formação de carbonato de cálcio
 - $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
- Desintegração devido à transformação de fase do silicato dicálcico
 - $\beta\text{C}_2\text{S} \rightarrow \gamma\text{C}_2\text{S}$
- Oxidação ou corrosão do ferro metálico.

Alguns autores sugerem a exposição prolongada da escória solidificada ao tempo para a sua estabilização volumétrica. Este processo poderia ser acelerado quando se utilizam molhagem e aeração durante o processo.^[10-12] Como estabelecer, porém, qual o tempo mínimo para que esta estabilização ocorra?

Estudos como os realizados por Osório et al.^[13] sugerem tempos mínimos de estocagem de cinco meses para a cura de escórias de aciaria elétrica e sua posterior utilização. Da mesma forma, Polisseni^[14] e Kneller et al.^[15] afirmam que as escórias necessitam de 6 meses de cura para apresentarem-se estabilizadas. Não há, contudo, um consenso no meio científico a respeito da generalização desses tempos mínimos para qualquer tipo de escória de aciaria. Normalmente as reações expansivas ocorrem em períodos que variam de meses a anos, porém um ensaio adequado deve propiciar um resultado em apenas alguns dias. Por isto, de maneira geral, estas reações são aceleradas através do aumento da temperatura, umidade e/ou pressão nos ensaios.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho de pesquisa foi dividido em duas etapas distintas. Em um primeiro momento, foram avaliadas diferentes escórias de aciaria elétrica e de aciaria LD, para comparação do comportamento, provenientes de siderúrgicas de diferentes pontos do país. Após a caracterização das mesmas, buscaram-se verificar como os diferentes ensaios propostos identificavam o caráter deletério dos diferentes tipos de escórias, e quais os potenciais agentes causadores de expansões diferenciadas, caso ocorressem.

Em uma segunda etapa, fixou-se o estudo em uma única escória de aciaria elétrica e nos fatores intervenientes dos ensaios para identificação de seu real

comportamento expansivo, variando-se significativamente a idade de cura destes resíduos.

Durante o primeiro ciclo de estudos com as escórias, foram doadas amostras de sete diferentes siderúrgicas, sendo cinco delas de escórias de aciaria elétrica e duas escórias de aciaria LD, para a realização de estudos comparativos. As mesmas foram coletadas pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e posteriormente enviadas em tonéis (bombonas) para o laboratório de materiais de construção do NORIE – Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Amostras de uma escória de aciaria elétrica de uma siderúrgica da região metropolitana de Porto Alegre/RS foram obtidas para a segunda etapa do estudo. Na época da amostragem, segundo informação da siderúrgica, a mesma possuía pilhas de escórias com até dois anos de estocagem no pátio. Além dessas, foram coletadas também escórias com dois meses de estocagem, que eram as pilhas mais novas disponíveis.

As escórias utilizadas na primeira etapa foram assim identificadas, a partir de sua procedência e forma de geração:

- Escória de Aciaria LD – MG (EALD1);
- Escória de Aciaria LD – ES (EALD2);
- Escória de Aciaria Elétrica – MG (EAE1);
- Escória de Aciaria Elétrica – PA (EAE2);
- Escória de Aciaria Elétrica – RJ (EAE3);
- Escória de Aciaria Elétrica – RJ (EAE4); e
- Escória de Aciaria Elétrica – SP (EAE5).

As escórias de aciaria elétrica da segunda etapa foram assim identificadas:

- 2MN – Escória de aciaria elétrica com 2 meses de cura ambiente, “natural” (após britagem na siderúrgica);
- 2AN - Escória de aciaria elétrica com 2 anos de cura ambiente, “natural” (após britagem na siderúrgica);
- 2MB - Escória de aciaria elétrica com 2 meses, modificada (britada novamente em laboratório); e
- 2AB - Escória de aciaria elétrica com 2 anos, modificada (britada novamente em laboratório).

Na seqüência estão descritos sucintamente os ensaios realizados durante o trabalho experimental.

2.1 ASTM D 4792/95 - Método de Ensaio para Avaliação do Potencial de Expansão de Agregados a partir de Reações de Hidratação

Este ensaio consiste basicamente na medição da expansão de três amostras compactadas de escória, imersas em água a temperatura de 70 +/- 3°C durante um período mínimo de sete dias. As amostras são compactadas levando em consideração sua máxima densidade, alcançada compactando a escória em três camadas, próxima de sua umidade ótima, com uma energia pré-estabelecida pela norma.

Estudos realizados por Polissenj^[14] conduziram a uma proposta de mudança na preparação das amostras compactadas para ensaios de expansão por imersão direta. Originalmente, a granulometria da ASTM D 4792^[16] é composta da seguinte forma: primeiramente passa-se o material em uma peneira de abertura de malha de 75 mm, descartando-se o material retido. O material passante na peneira 75 mm e retido na peneira de 19 mm é substituído por igual quantidade de material passante

na peneira 19 mm e retido na peneira 4,75 mm. Os estudos realizados por Osório et al (2002), todavia, provaram que composições granulométricas como estas se apresentavam falhas para identificar a expansão de algumas escórias de aciaria elétrica. Além disso, o material composto desta forma não era representativo de uma situação de uso prático como agregado para pavimentação. Dessa forma, para os ensaios diretos (ASTM D 4792 e EN1744-1^[17]) realizados neste trabalho, optou-se por utilizar uma granulometria que se adequasse também à faixa proposta no trabalho de Osório et al.^[13]

2.2 ASTM C 1260/01 – Reatividade Potencial Álcali-agregado de Agregados – Método das Barras de Argamassa^[18]

Em seu texto original, este ensaio é utilizado para avaliação da expansibilidade devido às reações álcali-agregado em concretos e argamassas, tendo sido adaptado para avaliação em escórias de aciaria.

O método de ensaio consiste na confecção de barras prismáticas de argamassa (2,5 x 2,5 x 28,5cm), utilizando-se a escória como agregado miúdo numa proporção de 1:2,25 (cimento : escória), com relação água/cimento igual a 0,47.

As barras são imersas em água a 80°C ±2°C e medidas periodicamente com um aparato dotado de relógio de precisão de 0,01 mm. A expansão é mensurada pela variação de comprimento das barras, ao longo do período de ensaio. O limite máximo de expansão permitido é de 0,10%, para 15 dias de ensaio.

2.3 EN 1744-1/98 – Testes para Propriedades Químicas de Agregados (Ensaio de Vapor)

Esta norma europeia prescreve uma série de ensaios para análises químicas de agregados. No seu item 19.3, ela sugere um ensaio para determinação da suscetibilidade à expansão de escórias de aciaria. Embora parecido com o ensaio proposto pela ASTM D 4792/95, o que diferencia este ensaio é o fato do corpo-de-prova não se encontrar submerso, mas sim sob a ação de um fluxo contínuo de vapor.

O ensaio consiste em preparar dois corpos-de-prova cilíndricos de 210 mm de diâmetro e 100 mm de altura, com uma base perfurada (0,01 orifícios por cm²) onde são compactadas as escórias (4,5 kg para cada cilindro). Esta compactação pode ser feita através de mesa vibratória ou com auxílio de soquetes, desde que mantido o mesmo grau de compactação especificado no texto da norma. Neste estudo optou-se por compactar as amostras, próximas de sua umidade ótima, com o auxílio de um soquete de compactação. Após a compactação, o espaço remanescente do cilindro é preenchido com 1,5 kg de bolinhas de vidro (previamente lubrificadas com óleo), e então encaminhado à uma câmara de vapor para ensaio. A câmara de vapor consiste em uma caixa com dois compartimentos. No primeiro, localizado na parte inferior da câmara, é gerado o vapor que sobe até o compartimento superior, onde são acondicionados os corpos-de-prova. A fim de evitar a condensação do vapor nas paredes dos cilindros, a segunda câmara mantém a temperatura dos mesmos próxima de 120°C. Sobre o cilindro é acoplada uma tampa perfurada com uma haste regulável, onde é instalado um relógio comparador, para realizar as leituras. O tempo de ensaio proposto é de 7 dias (168 hrs), para escórias de aciaria elétrica, e 1 dia (24 hrs) para escórias de aciaria LD. O resultado é dado em percentual de expansão volumétrica. Neste trabalho optou-se por realizar o ensaio durante o

período de sete dias, não só para escórias de aciaria elétrica, mas também escórias de aciaria LD, de modo a comparar o comportamento de ambas em um mesmo período de tempo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os resultados de caracterização química das escórias utilizadas.

Tabela 1: composições químicas das escórias envolvidas no estudo.

Compostos (%)	EALD1	EALD2	EAE1	EAE2	EAE3	EAE4	EAE5	2A	2M
SiO ₂	11,03	12,77	16,42	19,66	13,96	13,63	14,76	18,25	17,84
Al ₂ O ₃	1,30	1,19	3,27	3,48	2,98	3,22	3,94	4,28	4,33
FeO _x	40,02	39,37	50,70	45,07	58,11	50,00	33,44	38,9	38,76
CaO	36,94	38,04	20,68	21,11	17,30	23,63	34,87	27,64	28,03
MnO	5,97	5,30	4,99	4,70	4,11	5,36	5,12	4,27	4,41
P ₂ O ₅	1,51	1,19	0,86	0,56	0,54	0,62	0,53	0,71	0,74
SO ₃	0,22	0,14	0,14	0,10	0,20	0,18	0,35	0,18	0,18
Cr ₂ O ₃	0,26	0,18	0,62	1,08	1,06	1,55	5,07	1,15	1,17
V ₂ O ₅	-	0,11	-	-	-	0,09	0,33	0,04	-
TiO ₂	0,38	-	0,48	0,84	0,48	0,58	0,46	0,93	0,91
MgO	2,27	1,70	1,75	3,13	1,11	1,01	1,03	3,01	3,00
BaO	-	-	0,06	0,22	0,12	0,08	0,06	0,20	0,17
K ₂ O	0,004	-	0,02	0,01	-	-	-	0,07	0,05
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + FeO _x (%)	52,35	53,33	70,39	68,21	74,95	66,85	52,14	61,43	60,93

Da mesma forma, a Tabela 2 apresenta a caracterização granulométrica original das escórias coletadas para a realização das pesquisas.

Tabela 2: composições granulométricas das escórias envolvidas no estudo.

Abertura de peneira	EALD1	EALD2	EAE1	EAE2	EAE3	EAE4	EAE5	2A	2M
% retido acumulado									
76 mm	12	0	0	0	0	0	6	0	0
64 mm	22	8	21	0	0	0	26	0	0
50 mm	54	42	58	28	37	10	53	0	0
38 mm	88	66	82	65	67	34	81	0	0
32 mm	94	89	95	81	81	49	90	0	0
25 mm	98	99	98	91	90	68	96	0	0
19 mm	100	100	99	97	99	84	99	12	12
12,5 mm	100	100	100	99	100	97	100	45	48
9,5 mm	100	100	100	100	100	99	100	60	63
6,3 mm	100	100	100	100	100	100	100	72	74
4,8 mm	100	100	100	100	100	100	100	77	80
2,4 mm	100	100	100	100	100	100	100	88	89
1,2 mm	100	100	100	100	100	100	100	93	94
600 µm	100	100	100	100	100	100	100	95	96
300 µm	100	100	100	100	100	100	100	97	98
150 µm	100	100	100	100	100	100	100	99	99
< 150 µm	100	100	100	100	100	100	100	100	100

3.1 Resultados do Primeiro Estudo

Na Figura 1, pode-se identificar os resultados do ensaio ASTM C 1260/01.

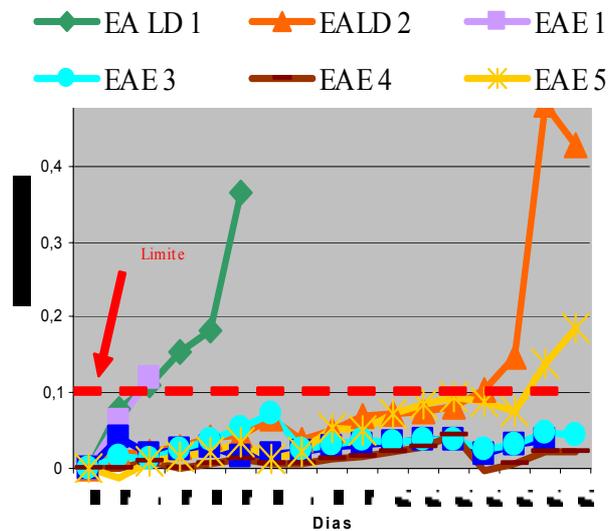


Figura 1: Resultados de expansão de escórias de aciaria elétrica (EAE) e aciaria LD (EALD) em ensaio ASTM C1260/92

Analisando os resultados, percebe-se que as escórias de aciaria LD EALD1 apresentaram grandes expansões já nos primeiros dias, inclusive tendo a maior parte das barras totalmente desagregada pelas reações deletérias (Figura 2). Por outro lado, as escórias de aciaria elétrica variaram conforme sua origem, sendo que duas extrapolaram o limite de 0,1% aos 15 dias e outras três mantiveram-se abaixo deste patamar. O comportamento mais impressionante deu-se com a escória EAE1, que literalmente destruiu as barras de argamassa com apenas três dias de ensaio. Cabe ressaltar, ainda, que as escórias EAE2 e EAE3 são escórias da mesma procedência, e embora com idades de cura no pátio da siderúrgica bem distintas, apresentaram comportamento similar.



Figura 2: Aspecto das barras de argamassa da escória EALD1 após 5 dias de ensaio ASTM C 1260/01

Parece claro, em face dos resultados apresentados neste ensaio, que resultados individuais para determinadas escórias não podem ser generalizados para outras similares. Cada resíduo possui características químicas, forma de grãos e condições de estocagem muito particulares, e isto deve ser levado em conta quando de sua futura utilização.

Após o teste mais restritivo – através da inserção das escórias em matrizes rígidas de argamassa, passou-se, então, para o ensaio direto via método de vapor (EN 1744-1/98). Foram escolhidas quatro escórias – duas de aciaria elétrica e duas

LD – para a realização deste ensaio. Entre as escórias de aciaria elétrica, optou-se por escolher, das cinco disponíveis, duas que tivessem tido comportamentos completamente distintos no ensaio ASTM C 1260/01. Por esta razão, foram selecionadas as escórias EAE1 (grande expansão das barras de argamassa) e EAE3 (expansão das barras abaixo do limite de 0,1% aos 15 dias). Esperava-se que o comportamento, tanto das escórias LD como as de aciaria elétrica, se reproduzisse também no ensaio de vapor. Entretanto, como pode ser visto na Figura 3, não foi isto que ocorreu.

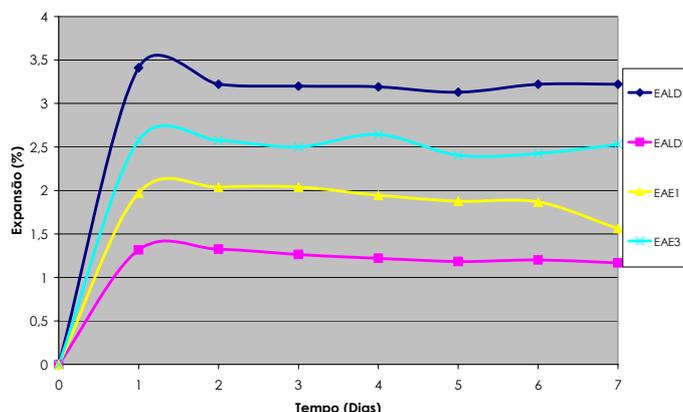


Figura 3: Resultados médios de expansão dos corpos-de-prova das escórias do estudo 1 para o ensaio de vapor (EN 1744-1/98).

Para as escórias de aciaria LD, a escória EALD1 manteve-se com uma expansão superior em comparação à escória EALD2. As duas, porém, ficaram abaixo do limite mais restritivo (3,5%) da N 242 E/95 citada por Masuero,^[19] muito embora a EALD1 tenha ficado muito próxima desse limite já nas primeiras vinte e quatro horas de ensaio. Analisando-se as escórias de aciaria elétrica, o comportamento inverteu-se em relação ao ensaio ASTM C 1260. A escória EAE3 apresentou expansões aos 15 dias da ordem de 2,5%, ao passo que a escória EAE1 não passou dos 1,5 – 2%.

3.2 Resultados do Segundo Estudo

O segundo estudo foi conduzido em paralelo com o primeiro e visou identificar diferenças no comportamento de uma escória com idades de cura a céu aberto muito distintas, em relação ao seu caráter expansivo.

Primeiramente, são descritos os gráficos de expansão das escórias ensaiadas pelo método das barras, através da Figura 4.

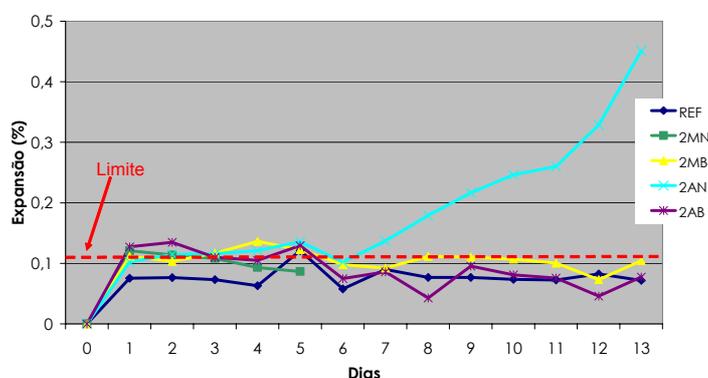


Figura 4: Resultados de expansão de escórias de aciaria elétrica (EAE) com 2 meses e 2 anos de cura - ensaio ASTM C 1260/01.

As barras de argamassa com escórias 2MN, compostas com grãos originalmente britados na siderúrgica, e que permaneceram curando por dois meses no pátio da empresa, apresentaram expansões que levaram à completa fissuração e desagregação já aos cinco dias de ensaio. Por sua vez, as barras 2AN, compostas com grãos originalmente britados na siderúrgica, e que permaneceram curando por até dois anos nas áreas de descarte, apresentaram também grandes expansões, acima do limite de 0,1% da ASTM C 1260/01 já aos sete dias de ensaio. Entretanto, só vieram a fissurar significativamente próximas do 14º dia de ensaio.

O comportamento diferenciado deu-se no momento em que as escórias foram re-britadas em laboratório. Tanto a escória 2MB como a escória 2AB passaram a apresentar um comportamento similar às barras de referência (argamassa sem escória), tendo seus valores de expansão abaixo dos 0,1%, aos 15 dias de ensaio.

Tal comportamento foi, a princípio, considerado surpreendente, pois se poderia imaginar que os grãos maiores de escória, quando rebitados, expusessem uma maior quantidade de compostos não curados (e portanto com maior concentração de óxidos livres). A hipótese que se levanta, então, é consoante com o que expõe o trabalho de Mancio^[20]). Ao se compor a granulometria da ASTM C 1260/01 com o material original coletado na siderúrgica, a fração fina presente deve possuir uma quantidade maior de óxidos de cálcio e magnésio livre, que foram desagregando-se dos grãos maiores e sendo lixiviados com o tempo e a exposição às intempéries. No momento que as escórias são re-britadas em laboratório, a fração fina utilizada contém uma quantidade de óxidos de cálcio e magnésio livre disponíveis para reação inferior à amostra original. Outra hipótese que também pode ser levantada é o fato dos britadores de rolos e mandíbulas utilizados em laboratório conferirem uma forma mais angular aos grãos, o que pode influenciar no ensaio. Aliás, esta influência da forma dos grãos é apontada por Valduga et al.^[21]) como sendo um dos fatores intervenientes a ser considerado quando da avaliação do potencial de reação álcali-agregado em materiais ensaiados pela ASTM C 1260/01.

Por sua vez, os dados de expansão das escórias resultantes do ensaio EN 1744-1/98 são apresentados a seguir na Figura 5.

Diferentemente do ensaio com as barras de argamassa, tanto o ensaio de vapor (EN 1744-1/98) como o ASTM D 4792/995, por demandarem uma quantidade de material muito grande para composição das amostras (4,5 kg e 7 kg para cada corpo-de-prova, respectivamente), precisaram ser rebitados em laboratório, para complementar algumas faixas granulométricas. Com isso, a identificação das escórias nos gráficos aparece apenas como 2A (2 anos) e 2M (2 meses).

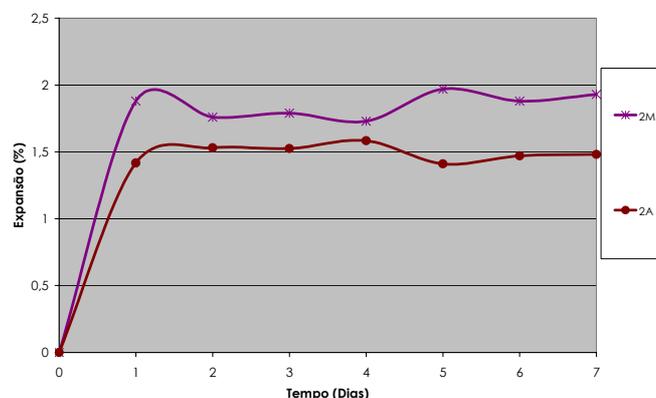
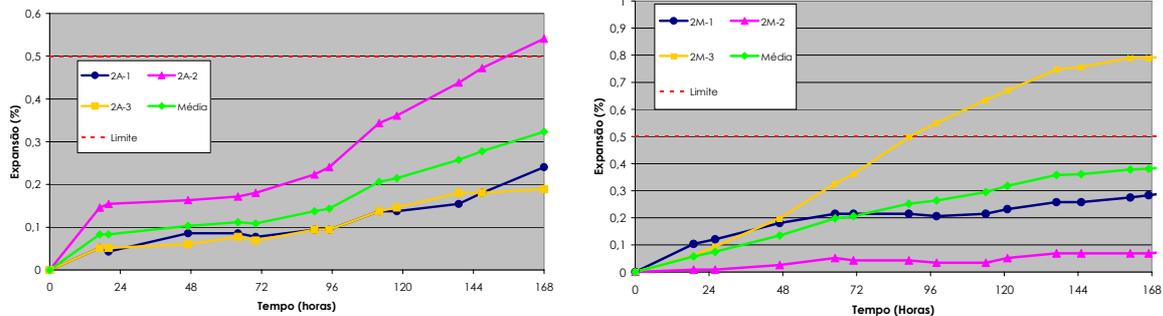


Figura 5: resultados médios de expansão da escória 2M e 2A para o ensaio EN 1744-1/98

Nota-se que, para o ensaio de vapor, não se identificaram diferenças marcantes de expansão das escórias conforme sua idade de cura, e as duas permaneceram abaixo do limite de 3,5% proposto, aos 7 dias de ensaio. Ambas as escórias apresentaram valores similares às escórias de aciaria elétrica ensaiadas no estudo 1 (entre 1,5- 2,5%).

As Figuras 6 e 7 ilustram, respectivamente, os resultados dos corpos-de-prova (e a média) da escória com dois anos e dois meses de cura, para o ensaio acelerado de hidratação proposto pela ASTM D 4792/95.



Figuras 6 e 7: resultados de expansão da escória 2A e 2M para o ensaio ASTM D 4792/95

O limite do ensaio, para sete dias (168 horas), é de 0,5%. Para a escória 2A, a média ao final deste período ficou de torno de 0,32%. Percebe-se que para a escória 2M, embora a média dos três corpos-de-prova tenha ficado abaixo do limite especificado (em torno de 0,38%), um deles apresentou expansão bem mais pronunciada, da ordem de 0,80%.

4 CONCLUSÕES

Escórias de aciaria LD, via de regra, apresentam potencial deletério superior às escórias de aciaria elétrica. Muitos ensaios sensíveis à expansão das escórias foram desenvolvidos ou adaptados a partir das características específicas das escórias geradas próximas das regiões de pesquisa, e normalmente aplicáveis a estas escórias LD. O mesmo ensaio, aplicado em escórias de características físico-químicas diferentes pode apresentar resultados dissonantes, quando os mesmos não forem analisados criticamente. Em especial para escórias de aciaria elétrica, uma boa alternativa parece ser, sem dúvida, a adaptação da granulometria dos materiais de ensaio às condições de utilização real dos mesmos em pavimentação, quando aplicável. Além disso, torna-se importante também a consideração de tempos mínimos de cura do material, aplicáveis a cada tipo de escória, sem generalizações.

REFERÊNCIAS

- 1 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, 25., 1994. Volta Redonda, RJ. **Anais...** 1994. p. 187-199.
- 2 INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – IBS Material obtido no curso sobre gestão de resíduos, realizado no Japão em outubro de 1995. (AOTS – JISF/IBS). In: FÓRUM DE MEIO AMBIENTE – IBS. 1995. Rio de Janeiro.

- 3 SLAGS AND FLUXES, 3th, 1998. Escócia. **Proceedings...** Escócia, 1988. INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA (IBS). **Anuário Estatístico da Indústria Siderúrgica Brasileira**. Rio de Janeiro: IBS, 2000.
- 4 INSTITUTO LATINOAMERICANO DEL FIERRO Y EL ACERO (ILAFA). **Reciclaje de Escorias de Aciaria**. Santiago, Chile: ILAFA, 1995. 73 p. (Manual II).
- 5 DAS, B.; PRAKASH, S.; REDDY, R.; MISRA, V. N. An Overview of Utilization of Slag and Sludge from Steel Industries. **Resources, Conservation & Recycling**, Netherlands, v. 50, n. 1, p. 40-57, mar. 2007.
- 6 DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER PRO 263**: emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários. 1994. 3 p. Disponível em: < <https://gestao.dnit.gov.br/menu/servicos/ipr/produtos/arquivos/DNER-PRO263-94.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2007.
- 7 DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – Escórias de Aciaria para Pavimentos Rodoviários. DNER EM 262. 1994.
- 8 PENNSYLVANIA TESTING METHOD – PTM 130. Método de ensaio para Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria. Maio de 1978. Adaptado pelo Departamento de Estradas e Rodagem de Minas Gerais – Gerais – 1/ DER – MGG – 1982.
- 9 SANO, N.; LU, W.; RIBOUD, P. **Advanced Physical Chemistry for Process Metallurgy**. Nova York: Academic, 1997. 429 p.
- 10 POLESE, M. O.; CARREIRO, G. L.; SILVA, M. G.; SILVA, M. R. Caracterização Microestrutural da Escória de Aciaria. **Revista Matéria**, v. 11, n. 4, p. 444–454, 2006.
- 11 MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of Steel Slags: an opportunity to save natural resources. **Waste Management**, Pergamo, v. 21, n. 3, p. 285-293, jun. 2001.
- 12 GEISELER, J.; SCHLOSSER, R. Investigation Concerning the Structure and Properties of Steel Slags. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOLTEN JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.
- 13 OSORIO, E.; GRAFFITTI, D.; VILELA, A. C. F.; PAGNUSSAT, D. T.; MANCIO, M.; MASUERO, A. B.; MORAES, C. A. M.; ACOSTA, C. Expansibility Evaluation of Electric Arc Furnace Slags as an Alternative Material to Base of Pavement. In: JAPAN-BRAZIL SYMPOSIUM ON DUST PROCESSING- ENERGY- ENVIRONMENT IN METALLURGICAL INDUSTRIES, 4th, 2002, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo, 2002.
- 14 POLISSENI, A. E. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escória de Aciaria Elétrica Micronizada como Material Cimentício**. 251 f. 2005. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- 15 KNELLER, W. A., J. GUPTA, M. L. BORKOWSKI, and DOLLIMORE, D. “**Determination of Original Free Lime Content of Weathered Iron and Steel Slags by Thermogravimetric Analysis**,” Transportation Research Record 1434, National Research Council, Washington, DC, 1994.
- 16 AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **ASTM D 4792**: standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions. West Conshohocken, ASTM, 1995.
- 17 **EN 1744-1/98** Chemical tests for aggregates UNE – EN, 1998
- 18 **ASTM C 1260**: standard test method for potential alkali reactivity of aggregates. West Conshohocken: ASTM, 2001

- 19 MASUERO, A. B. **Estabilização das Escórias de Aciaria Elétrica com Vistas a sua Utilização como Substituição ao Cimento.** 267 f. 2001. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001
- 20 MANCIO, M. **Caracterização e avaliação das Escórias de Aciaria Elétrica.** 2001. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- 21 VALDUGA, L.; SGARBOSSA, L.; DAL MOLIN, D. C. C.; PAULON, V. A Influência da Forma do Agregado, da Realção Água/Cimento e da Consistência de Argamassa na Verificação da Potencialidade Reativa do Agregado. In. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005. Olinda. **Anais...** Olinda: IBRACON, 2005. 1 CD-ROM.