

AValiação de Três Métodos de Determinação da Expansão de Escórias de Aciaria Brasileiras para Pavimentação

EVALUATION OF THREE EXPANSION TEST METHODS FOR BRAZILIAN STEEL SLAG USE AS PAVEMENT AGGREGATE

Bicalho, Kátia Vanessa, *Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Vitória, ES, Brasil, katia@npd.ufes.br*

Oliveira, Fábio Uliana, *UFES, Vitória, ES, Brasil, uliana.f@uol.com.br*

Raposo, Carlos Olympo, *UFES, Vitória, ES, Brasil, olympo@cesan.com.br*

Castello, Reno Reine, *UFES, Vitória, ES, Brasil, soloreno@terra.com.br*

Silva, Maristela Gomes, *UFES, Vitória, ES, Brasil, margomes@npd.ufes.br*

RESUMO

A escória de aciaria é um co-produto da produção de aço cujo uso em pavimentos pode ser uma alternativa econômica e adequada sob o ponto de vista técnico e ambiental. Porém, sua natureza expansiva, atribuída principalmente à hidratação dos óxidos de cálcio e magnésio livres, tem limitado a utilização desse material. Este artigo apresenta uma síntese dos estudos preliminares para comparação entre os métodos ASTM D 4972/00; JIS A 5015/92; DMA-1/DER-MG/92 (PTM-130/78), ensaios de laboratório para medição da expansão de escórias de aciaria brasileiras para pavimentação. A avaliação levou em conta os procedimentos, equipamentos e instalações necessários e uma análise estatística dos resultados experimentais obtidos das amostras estudadas. As análises estatísticas provaram que o método PTM-130/78 é o que apresenta menor variabilidade de resultados para as escórias de aciaria brasileiras estudadas.

ABSTRACT

The steel slag is a by-product of steelmaking process and its use as unbound base and subbase aggregate may be an economic alternative and technical and environmental appropriate. However, steel slag may contain amounts of calcium or magnesium oxides, which will hydrate, leading to short-term and long-term expansion, respectively, and that should be addressed prior its use as pavement aggregate. Experimental work investigates the following laboratory slag expansion test procedures: ASTM D 4972/00; JIS A 5015/92; DMA-1/DER-MG/92 (PTM-130/78). The evaluation takes in account laboratory procedure, necessary equipment and installations and statistic analysis of experimental results for the studied brazilian steel slags. The statistical analyses suggest that the PTM-130/78 is the method which presents minor variability of results for the tested steel slag aggregates.

1. INTRODUÇÃO

A escória de aciaria é um co-produto da produção de aço e a utilização desse material em bases e sub-bases de pavimentos pode ser uma solução alternativa econômica e adequada sob o ponto de vista técnico e ambiental. Porém a natureza expansiva da escória de aciaria atribuída principalmente à hidratação dos óxidos de cálcio e magnésio livres, tem limitado a utilização desse material em pavimentação (Rohde, 2002; Raposo, 2005).

Para se avaliar o problema da expansão têm sido desenvolvidos e adotados métodos experimentais de determinação do potencial de expansão de escórias de aciaria. Esses métodos

são classificados de acordo com a aplicação da escória de aciaria. Os três métodos laboratoriais de ensaio mais usados para medição da expansão de escórias de aciaria para uso em base e sub-base de pavimentos são: PTM-130/78 (Pensylvania Test Method, origem no Canadá e Estados Unidos), JIS A 5015/92 (norma Japonesa) e ASTM D 4972/00 (norma americana). Os três ensaios são conceitualmente semelhantes. Utilizam-se corpos de prova cilíndricos compactados na energia especificada em cada ensaio e as medidas de expansão são feitas com o material em imersão em água aquecida e expressas em função do aumento de altura do corpo de prova. Entretanto, apesar de semelhantes, as diferenças existentes entre os métodos de ensaio, tais como energia de compactação, tempo de ensaio, temperatura e procedimento de aquecimento, podem gerar diferenças nos resultados.

Assim, este artigo apresenta os resultados preliminares de um programa experimental realizado para avaliação comparativa dos três Métodos Laboratoriais de Ensaio de Expansão de Escórias de Aciaria para uso em Pavimentação (MLE-EEAP), explicitando as vantagens e desvantagens de cada método em estudo. A avaliação comparativa dos três métodos MLE-EEAP realizada neste trabalho leva em conta o procedimento de ensaio, os equipamentos e instalações necessários e a análise estatística dos resultados obtidos em cada um dos métodos nas amostras de escórias de aciaria brasileiras estudadas.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Características das escórias de aciaria em estudo

As escórias de aciaria utilizadas neste estudo foram geradas por seis siderúrgicas brasileiras localizadas nos estados de Minas Gerais (escórias B-LD, D-LD e F-LD); Espírito Santo (escória C-LD), São Paulo (escória A-LD) e Bahia (escória K-EAF). Estas siderúrgicas utilizam fornos a oxigênio (LD) ou fornos elétricos (EAF). Comparando os dois tipos de escória de aciaria, as produzidas em aciarias LD possuem maiores concentrações de óxido de cálcio livre ou cal livre (CaO), enquanto as produzidas em aciarias EAF têm maior concentração de óxido de magnésio ou periclásio (MgO). Essas concentrações diferenciadas são as principais responsáveis pelo comportamento expansivo rápido nas escórias do tipo LD e lento nas escórias do tipo EAF (MOTZ e GEISELER, 2001).

A amostragem das escórias de aciaria foi realizada nas siderúrgicas, de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, para amostragem de agregados e resíduos sólidos, NBR NM 26/01 e NBR 10007/04, respectivamente, uma vez que não há norma específica para amostragem da escória de aciaria. A importância da amostragem se equipara à do próprio ensaio, e, por este motivo, deve-se tomar todas as precauções necessárias para que se obtenham amostras representativas quanto às suas naturezas e características (NBR NM 26/01). A Figura 1 mostra o fluxograma do processo de amostragem das escórias de aciaria utilizado nas usinas siderúrgicas do estudo.

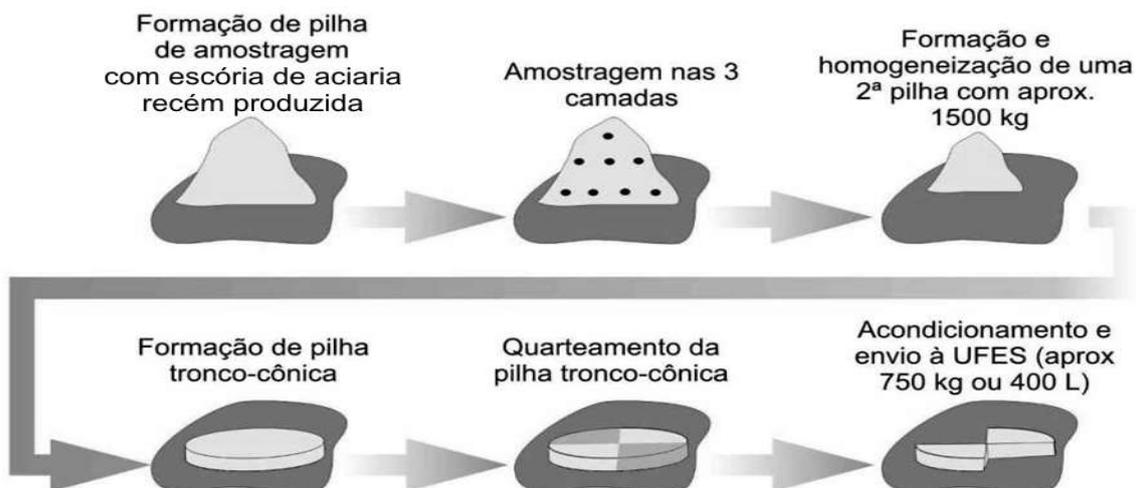


Figura 1 - Amostragem das escórias de aciaria em estudo nas siderúrgicas (Oliveira, 2006)

Para a caracterização das escórias de aciaria em estudo foram realizados, devido à ausência de métodos de ensaio específicos para este tipo de material, os ensaios habitualmente utilizados para materiais naturais tradicionalmente utilizados na engenharia rodoviária. O Quadro 1 reúne as principais características e classificação segundo o Sistema Unificado de Classificação (SUC) das escórias de aciaria utilizadas no presente trabalho. As escórias de aciaria em estudo apresentam partículas angulosas a sub-angulosas, o peso específico dos sólidos entre 33.43 e 39.41 kN/m³, abrasão Los Angeles variando de 11% a 21%, absorção entre 0,5 e 5,2% e são classificadas segundo o Sistema Rodoviário de Classificação como A-1a. As amostras das escórias de aciaria estudadas quanto à toxicidade, analisada pelo ensaio de lixiviação, foram caracterizadas como não tóxicas e quanto à inerticidade, analisada pelo ensaio de solubilização, foram caracterizadas como não-inertes segundo a norma NBR 10004/04, Classificação de Resíduos Sólidos, da ABNT (Vancini, 2005).

Quadro 1 - Características das amostras de escória de aciaria estudadas

Características	Amostras					
	A - LD	B - LD	C - LD	D - LD	F - LD	K-EAF
Plasticidade	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.
D10 (diâmetro efetivo) [mm]	8,10	6,50	5,30	4,70	10,07	10,07
Coefficiente de uniformidade	30,00	76,47	35,33	42,73	59,24	59,24
Coefficiente de curvatura	2,63	16,29	1,52	0,48	5,61	5,61
% de Pedregulho	57,32	45,23	43,71	40,29	64,37	64,37
% de Areia grossa	10,10	9,92	18,50	15,19	10,17	10,17
% de Areia média	13,27	13,75	14,84	17,60	9,32	9,32
% de Areia fina	10,66	22,54	17,09	20,26	11,78	11,78
% de Finos (<0,075 mm)	2,64	8,56	5,86	6,66	4,78	4,78
Classificação SUC	GW	SP-SM	SW-SM	SP-SM	GP	GW

2.2 Determinação da expansão das escórias de aciaria

2.2.1 Breve descrição do procedimento dos métodos MLE-EEAP em estudo

O Quadro 2 apresenta as principais características dos três métodos laboratoriais de ensaio utilizados neste estudo para medição da expansão de escórias de aciaria para uso em base e sub-base de pavimentos: PTM-130/78 (Pennsylvania Test Method, origem no Canadá e Estados

Unidos), JIS A 5015/92 (norma Japonesa) e ASTM D 4972/00 (norma americana). Os métodos de ensaios MLE-EEAP em estudo estabelecem que os corpos-de-prova cilíndricos de escória de aciaria ensaiados sejam compactados na umidade ótima estabelecida no ensaio de compactação realizado na energia especificada (NBR 7182/86). Entretanto, Raposo (2005) mostrou através de resultados experimentais que os ensaios de compactação das amostras de uma escória de aciaria LD não apresentaram umidade ótima de compactação, tendo um comportamento típico de solos granulares.

Quadro 2 - Métodos laboratoriais de determinação do potencial de expansão das escórias de aciaria utilizados na avaliação experimental (Oliveira, 2006)

Métodos	Características
ASTM D 4792/00	Energia de compactação: Proctor Normal; Mecanismo de aceleração da expansão: Imersão em água aquecida; Temperatura de imersão: $70 \pm 3^{\circ}\text{C}$; Período ensaio: 07 dias (mínimo); Limite de expansão: 0,5% (aos 07 dias).
JIS A 5015/92	Energia de compactação: Proctor Modificado; Mecanismo de aceleração da expansão: Imersão em água, com períodos diários de aquecimento de 6 horas; Temperatura de imersão: $80 \pm 3^{\circ}\text{C}$; Período de ensaio: 10 dias; Limite de expansão: 2,0% (aos 10 dias); Observação: granulometria específica (ver Quadro 3)
DMA-1/DER-MG/92 (PTM-130/78)	Energia de compactação: Proctor Normal; Mecanismo de aceleração da expansão: Imersão em água aquecida e aquecimento em estufa; Temperatura de imersão: $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$; Período de ensaio: 14 dias (imersão: 07 dias; estufa: 07 dias); Limite de expansão: 3,0% (aos 14 dias).

2.2.1.1 Método DMA-1/DER-MG/92 (PTM-130/78)

O método do ensaio de expansão PTM-130/78 do Departamento de Transportes da Pensilvânia, EUA, foi adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem do estado de Minas Gerais, Brasil, originando o ensaio DMA-1/DER-MG/92. Este ensaio consiste na imersão de corpos de prova cilíndricos compactados na energia Proctor normal em um banho térmico com água a $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$ por um período de 7 dias sendo feitas leituras diárias da variação volumétrica em função do aumento de altura do corpo de prova. Em seguida, os corpos-de-prova são retirados do banho térmico e levados para uma estufa elétrica à mesma temperatura de $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$. O método de ensaio estabelece que o corpo-de-prova deve ser mantido na condição de “saturação” (não submersa) por mais sete dias, fazendo-se as leituras diárias da expansão por igual período.

A percentagem de expansão volumétrica total é aquela obtida após os 14 dias. O limite estabelecido pelo DNIT-PRO 262/94 para cada ensaio é de 3% para expansão acumulada após os 14 dias de ensaio. Raposo (2005) complementa tais especificações e sugere que o lote de escória de aciaria somente deve ser aceito quando a expansão de todos os corpos-de-prova ensaiados para cada amostra for inferior ao limite de 3% pelo método PTM-130/78. Raposo (2005) também recomenda que seja adotada uma metodologia estatística para o cálculo do número mínimo de corpos-de-prova a serem ensaiados por esse método de ensaio de expansão.

2.2.1.2 Método JIS A 5015/92

A norma japonesa JIS A 5015/92 (*Japanese Industrial Standard*) que foi estabelecida em 1979, e revisada em 1985 e em 1992, descreve um método de ensaio de expansão, denominado “Método de ensaio de expansão em água para escória siderúrgica”. Esse método, assim como os demais métodos avaliados neste estudo, utiliza corpos-de-prova compactados em moldes cilíndricos metálicos, porém a amostra de escória de aciaria ensaiada deve ser preparada para atender à granulometria especificada no Quadro 3.

Os corpos-de-prova compactados com a energia Proctor Modificado são submersos em um banho térmico com água e sujeitos a ciclos de aquecimento. Os ciclos consistem de 6 horas de aquecimento, à temperatura de 80°C, e 18 horas sem aquecimento, a cada 24 horas, repetindo-se este processo por 10 dias. A expansão, assim como no método PTM-130/78, é medida diariamente através de um relógio comparador instalado no topo de cada corpo-de-prova, e a expansão é expressa em porcentagem da altura do corpo-de-prova aos 10 dias desse ensaio.

Quadro 3 - Distribuição granulométrica da escória de aciaria - JIS A 5015/92

Abertura	31,5mm	26,5mm	13,2mm	4,75mm	2,36mm	0,425mm	0,075mm
% que passa	100	97,5	70	47,3	35	20	6

2.2.1.3 Método ASTM D 4792/00

No método de ensaio de expansão ASTM D 4792/00 (*Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions*) os corpos de prova cilíndricos compactados na energia Proctor normal são submersos em um banho térmico com água a temperatura de $70 \pm 3^\circ\text{C}$ e instala-se um relógio comparador no topo de cada corpo-de-prova para acompanhar-se a expansão vertical. As leituras iniciais dos relógios comparadores são feitas 30 minutos após a colocação dos corpos-de-prova no banho térmico. Essa precaução deve ser tomada para permitir o equilíbrio térmico, e a conseqüente expansão dos materiais e dos aparatos utilizados, devido ao aquecimento. O valor lido após este período é considerado como a leitura inicial, que será tomada como referência para a determinação da expansão em relação às leituras posteriores.

A partir da primeira leitura, faz-se leituras diárias, no mesmo horário, durante pelo menos sete dias. Se a taxa de expansão não apresentar uma pronunciada redução após esse período, o ensaio pode continuar para se obterem dados adicionais. Porém, a norma ASTM D 2940/03, para utilização de escórias de aciaria em bases e sub-bases, estabelece uma expansão máxima de 0,5% medida aos sete dias de ensaio.

2.2.1.4 Comentários gerais

Devido à exigência de uma granulometria específica para a amostra de escória de aciaria ensaiada segundo o método JIS A 5015/92, é necessário uma verificação da granulometria da amostra imediatamente disponível e caso necessário o processamento do material para obter-se a granulometria especificada no método.

O método PTM-130/78 tem a primeira etapa idêntica ao método ASTM D 4792/00 acrescido de uma segunda etapa que consiste em colocar as amostras de escória de aciaria em uma estufa na temperatura de $71 \pm 3^\circ\text{C}$ por mais 7 dias, fazendo ainda a ressalva para que seja mantida sua saturação por adição de água.

A etapa de imersão de corpos de prova cilíndricos em água aquecida é comum aos três métodos avaliados neste trabalho, tendo a função de acelerar as reações que ocorrem na escória de aciaria que levam à sua expansão. Entretanto, os métodos diferem entre si quanto ao tempo e à temperatura de imersão. O método JIS A 5015/94, além de um valor de temperatura cerca de 10°C mais alto que o dos demais ensaios (80°C), utiliza períodos diários de 6 horas de aquecimento, enquanto os outros dois métodos utilizam aquecimento ininterrupto durante todo o período de ensaio. A eficiência da imersão da amostra em água aquecida é questionada por Motz e Geiseler (2001), que afirmam que esse procedimento não permite correlações com resultados obtidos em campo. Raposo (2005) verificou que a temperatura tem uma influência altamente significativa na expansão das amostras de uma escória de aciaria LD pelo método de ensaio PTM-130/78 e, deve ser um fator bastante controlado durante o ensaio, tanto através de equipamentos que mantenham a temperatura correta, quanto pela verificação da temperatura com termômetros ao longo de todo ensaio de expansão por esse método.

Raposo (2005) complementa as especificações do método PTM-130/78 sugerindo que o lote de escória de aciaria somente deve ser aceito quando a expansão de todos os corpos-de-prova ensaiados para cada amostra for inferior ao limite de 3%. Raposo (2005) também recomenda que seja adotada uma metodologia estatística para o cálculo do número mínimo de corpos-de-prova a serem ensaiados por esse método de ensaio de expansão.

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os métodos MLE-EEAP avaliados neste trabalho recomendam que os corpos-de-prova cilíndricos de escória de aciaria ensaiados sejam compactados na umidade ótima estabelecida no ensaio de compactação (NBR 7182/86). Entretanto, os resultados dos ensaios de compactação das amostras de escórias de aciaria estudadas não apresentaram uma umidade ótima de compactação, o que confirma os dados apresentados por Raposo (2005). Apesar de ter sido constatado que o resultado da expansão, provavelmente, não tem correlação com a umidade de compactação (Raposo, 2005; Oliveira, 2006), decidiu-se estabelecer uma mesma condição de umidade para os corpos-de-prova ensaiados pelos métodos MLE-EEAP e os ensaios de expansão foram realizados em corpos-de-prova compactados com as escórias de aciaria secas ao ar.

Os métodos MLE-EEAP em estudo determinam que sejam feitas no mínimo três determinações para cada amostra. Entretanto, devido a grande heterogeneidade das escórias de aciaria, foram realizados ensaios de expansão piloto, para definir o número mínimo de determinações (n) necessárias para a avaliação estatística dos três métodos avaliados neste estudo. O valor de n para cada método de ensaio em estudo foi calculado usando a equação:

$$n = \left(\frac{zs}{d} \right)^2 \quad (1)$$

onde: z é igual a 1,96 para o nível de confiança de 95% (Cochran, 1977), s é o desvio padrão e d a precisão considerada (0,2 %). Assim, de posse dos valores de desvio padrão (s), igual a 0,51% para escórias de aciaria do tipo LD e de 0,11% para escórias de aciaria do tipo EAF, obtidos nos ensaios de expansão piloto, foi definido um número mínimo de 25 determinações para cada método MLE-EEAP avaliado para as escórias do tipo LD e 5 determinações para cada método em estudo para as escórias do tipo EAF. As 25 determinações mínimas necessárias para cada método de ensaio em estudo para as escórias do tipo LD foram obtidas através da realização de ensaios nas cinco amostras de escórias de aciaria (A – LD, B – LD, C – LD, D – LD e F – LD), cada uma com cinco determinações, e as cinco determinações para cada método para as escórias

do tipo EAF foram realizadas na amostra K – EAF. Os resultados dos ensaios segundo os três métodos, ASTM D 4792/00, JIS A 5015/92 e PTM-130/78, foram submetidos à análise estatística.

As Figuras 2 e 3 apresentam os resultados do método de ensaio PTM-130/78 nas amostras de escórias de aciaria A-LD e K-EAF, respectivamente. Os resultados apresentados pela amostra A – LD ficaram acima do limite estabelecido segundo a norma DNIT-PRO 262/94 já no terceiro dia (A-LD 1 e A-LD 5 na Figura 2), e no décimo quarto dia, todos os resultados do ensaio, são superiores ao limite (3%). Dessa forma, a amostra A - LD não pode ser utilizada para pavimentação, sendo necessário algum tratamento para o controle de seu potencial de expansão.

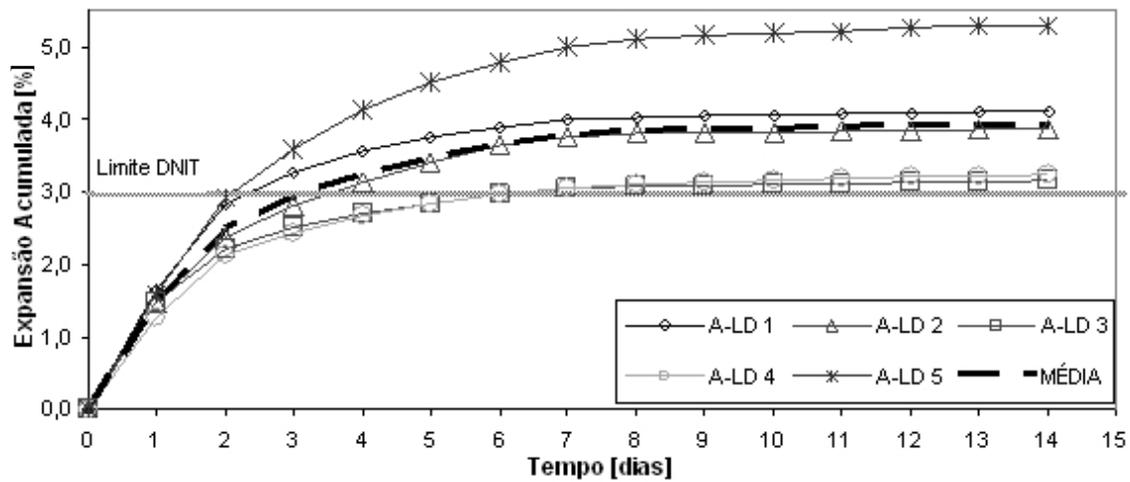


Figura 2 - Resultados da expansão acumulada da amostra A – LD (método PTM-130/78)

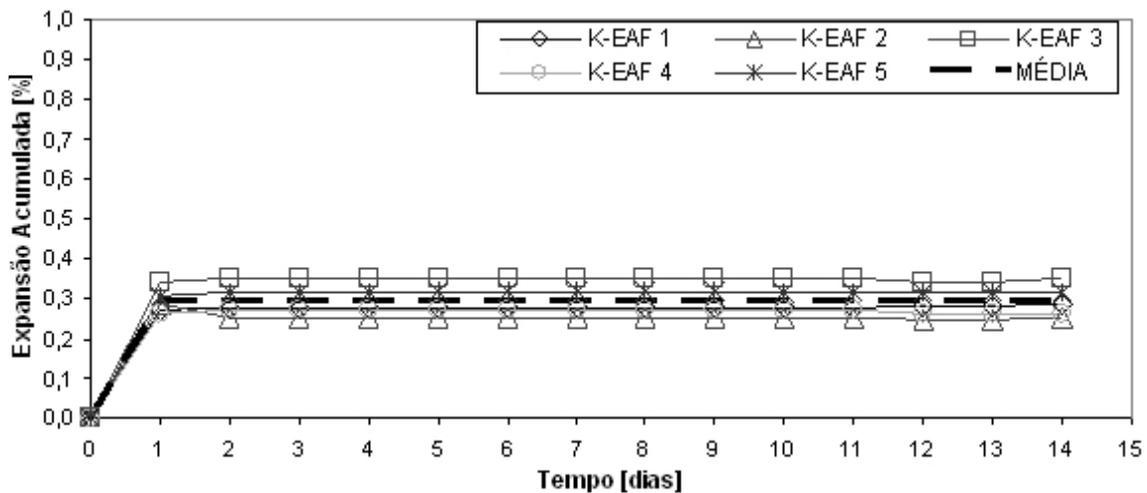


Figura 3 - Resultados da expansão acumulada da amostra K – EAF (método PTM-130/78)

A amostra K – EAF obteve uma expansão acumulada em torno de 0,3% na primeira leitura, e uma aparente estabilização da expansão nos dias seguintes, sendo que ao final dos quatorze dias, os resultados da expansão acumulada foram menores que 0,4%, valor muito inferior ao limite de 3% da norma DNIT-PRO 262/94 (Figura 3).

3.1 Análise estatística dos resultados dos três métodos MLE-EEAP em estudo

A comparação foi feita utilizando o método estatístico de análise de variância, ou ANOVA. Para os testes adotou-se um nível de significância¹ de 5%. Também foi feito o cálculo do coeficiente de variação, que é o resultado do valor desvio-padrão dividido pelo valor da média, em porcentagem. O resultado dessa operação indica se um ensaio tem variação maior ou menor em comparação a outro.

Os resultados da avaliação estatística dos resultados de 25 determinações para cada método de ensaio para as amostras de escórias de aciaria do tipo LD em estudo são apresentados na Quadro 4. O teste de ANOVA mostra que as médias dos resultados para os diferentes métodos não apresentam diferenças estatisticamente significantes, ($p\text{-valor} = 0,480 > 0,05$). Outra afirmação que pode ser feita é que o método PTM-130/78 apresentou o menor coeficiente de variação (21,732%), apesar de os valores encontrados para os três métodos serem próximos.

Quadro 4 - Resultado da análise estatística dos resultados dos métodos de ensaios MLE-EEAP para amostras de escórias de aciaria do tipo LD estudadas

Expansibilidade	Métodos			ANOVA
	ASTM D 4792/00	JIS A 5015/92	PTM 130/78	p-valor
n (número de determinações)	25	25	25	
Mínima [%]	1,705	1,845	1,827	
Máxima [%]	4,990	4,770	5,280	0,480
Média [%]	3,220	3,252	3,469	
Desvio-padrão [%]	0,788	0,816	0,754	
Coeficiente de variação [%]	24,464	25,099	21,732	

O teste de ANOVA para os resultados das escórias de aciaria do tipo EAF estudadas indica que há diferença entre as médias dos resultados ($p\text{-valor} = 0,00 < 0,05$), e o método que apresentou o menor valor para o coeficiente de variação foi o PTM-130/78 (13,425), corroborando o resultado obtido para as amostras de escórias de aciaria do tipo LD, e indicando que este método é o que apresenta menor variabilidade de resultados. Observa-se uma diferença significativa nos valores obtidos para os coeficientes de variação de cada um dos métodos para as amostras de escória de aciaria do tipo EAF, sendo que o coeficiente de variação para o método ASTM D 4792/00 foi 2,34 vezes maior que o obtido para o método JIS A 5015/92, que, por sua vez, foi 4,75 vezes maior que o coeficiente de variação do método PTM-130/78.

Verifica-se que o ensaio PTM-130/78 apresentou menor variabilidade dentre os métodos verificados, sendo o indicado através das análises estatísticas para a determinação do potencial de expansão das amostras de escória de aciaria em estudo.

¹ Nível de significância é a probabilidade de erro ao se aceitar a hipótese de que não há diferença entre os métodos.

Quadro 5 - Resultado da análise estatística dos resultados dos métodos de ensaio MLE-EEAP para amostras de escórias de aciaria do tipo EAF estudadas

Expansibilidade	Métodos			ANOVA
	ASTM D 4792/00	JIS A 5015/92	PTM 130/78	p-valor
n (número de determinações)	5	5	5	
Mínima [%]	0,000	0,000	0,253	0,000
Máxima [%]	0,018	0,288	0,350	
Média [%]	0,005	0,182	0,294	
Desvio-padrão [%]	0,008	0,116	0,039	
Coefficiente de variação [%]	149,250	63,747	13,425	

4. CONCLUSÕES

As seguintes conclusões foram obtidas na avaliação comparativa dos três métodos MLE-EEAP em estudo para as escórias de aciaria ensaiadas:

- Devido a grande heterogeneidade das escórias de aciaria recomenda-se uma amostragem criteriosa do lote de escória de aciaria a ser avaliado, tal como os procedimentos de amostragem utilizados neste estudo.
- O método ASTM D 4792/00 apresenta o procedimento de ensaio mais simples. Entretanto, este método apresenta um limite de 0,5% para expansão acumulada medida aos sete dias de ensaio, o que torna restritivo, e praticamente inviabiliza o uso de escórias de aciaria LD em pavimentação. As escórias LD apresentam valores de expansão acumulada neste período usualmente acima de 1%.
- Na segunda etapa do ensaio PTM-130/78 ainda se observa expansão da escória de aciaria (principalmente nas escórias do tipo LD). Entretanto, a taxa de variação nos valores medidos é praticamente insignificante face aos valores de expansão medidos no período de 7 dias em imersão em água aquecida (Figuras 2 e 3). Uma opção para simplificação do método PTM-130/78 é a eliminação desta etapa, juntamente com a revisão dos limites aceitáveis de expansão segundo o DNIT -PRO 262/94.
- A análise estatística mostrou que para as amostras de escória de aciaria EAF ensaiadas, os ensaios apresentaram resultados diferentes ($p\text{-valor} < 0,05$) e o coeficiente de variação indica que o método PTM-130/78 foi o que obteve menor variação entre os resultados (coeficiente de variação = 13,425%). Para as amostras de escória de aciaria LD ensaiadas, a avaliação estatística dos resultados não encontrou diferenças estatisticamente significantes ($p\text{-valor} > 0,05$), e os valores do coeficiente de variação obtido para os três métodos foram bem próximos, sendo que o que apresentou o menor valor foi o do método PTM-130/78 (coeficiente de variação = 21,732%).

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS) e Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo apoio técnico e financeiro ao projeto de pesquisa, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas de graduação e de pós-graduação, e à professora da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) Eliana Zandonade e sua equipe pelo apoio nas análises estatísticas.

6. REFERÊNCIAS

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D 4792/00 - Potencial de expansão de agregados em reações de hidratação, (2000).
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 10007 - Amostragem de resíduos sólidos, (2004).
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR NM 26 - Amostragem de agregados, (2001).
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7182 – Ensaio de compactação, (1986).
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 10004 – Resíduos sólidos- Classificação, (2004).
- [6] COCHRAN, W. Sampling Techniques. John Wiley, 3ª ed., New York, (1977).
- [7] DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS DMA-1/DER-MG/92 Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria – Adaptação do PTM-130, (1982).
- [8] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURAS DE TRANSPORTES - DNIT. Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários - DNIT-PRO 262/94. Rio de Janeiro, (1994), 4p.
- [9] JIS - JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS – JIS A 5015/92 – Escória siderúrgica para construção de estradas, (1992).
- [10] MOTZ, H; GEISELER, J. Products of steel slag an opportunity to save natural resources. Waste Management 21, Duisburg, Alemanha, (2001), p. 285 – 293.
- [11] OLIVEIRA, F. U., Avaliação de três métodos de ensaio para determinação do potencial de expansão de escórias de aciaria para uso em pavimentação. Dissertação de mestrado, Programa Pós-Graduação Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, (a ser publicada), (2006).
- [12] PENNSYLVANIA TESTING METHOD – PTM-130/78. Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria - Departamento de Transportes da Pensilvânia, (1978).
- [13] RAPOSO, C. O. L., Estudo laboratorial de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação, Dissertação de mestrado, Programa Pós-graduação Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, 138p., (2005).
- [14] ROHDE, L. Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos - Estudo Laboratorial. Dissertação de mestrado, Programa Pós-Graduação Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRGS, 101p., Porto Alegre, Brasil, (2002).
- [15] VANCINI, G. L. Avaliação de metais e não-metais da escória de aciaria de usinas siderúrgicas brasileiras conforme NBR 10004/2004. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, 164 p, Vitória, ES, Brasil, (2005).