

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS DE SOLO E ESCÓRIA DE ACIARIA PARA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA NA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA

Everton Bezerra Parente

Alvaro Holanda Boavista

Jorge Barbosa Soares

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos - LMP
Departamento de Engenharia de Transportes – DET
Universidade Federal do Ceará - UFC

RESUMO

A escória de aciaria é um resíduo sólido da produção do aço utilizado na construção civil. Para cada tonelada de aço produzido têm-se 15% em peso de escória de aciaria como material de descarte. Com o objetivo de utilizar o material na construção rodoviária, este agregado siderúrgico pode ser adicionado ao solo para utilização na construção de bases e subbases estabilizadas granulometricamente. Este trabalho apresenta os resultados de uma pesquisa em andamento que tem como objetivo principal avaliar o comportamento mecânico de misturas de solo e escória de aciaria a partir de resultados de ensaios triaxiais cíclicos e CBR. Nas misturas de solo-escória foi analisada a influência de se considerar diferentes percentuais de escória no processo de estabilização granulométrica. Foram também estudadas misturas de solo-brita para fins de comparação com as misturas solo-escória. Foram verificadas a influência do teor de escória no módulo de resiliência e CBR das misturas e a comparação destes parâmetros com os obtidos para as misturas compostas com brita.

ABSTRACT

The steel-slag is a solid byproduct of the steel production that has been used in the construction industry. For every ton of steel produced, there is 15% by weight of steel-slag. Meaning to use the material on roadways, this byproduct has been used as an aggregate mixed with natural soil for stabilized bases and subbases on pavements. This paper presents the results of a research under development to evaluate the mechanical behavior of soil and steel-slag mixtures by means of the dynamic triaxial and CBR tests. The effect of different percentages of steel-slag was analyzed with respect to the effectiveness in the stabilization. Mixtures of soil and crushed stone were also analyzed for comparison purposes. The effect of the steel-slag content on the resilient modulus and the CBR was studied. These same parameters were compared to the results of the mixture with crushed stone considering the same material contents.

1. INTRODUÇÃO

As usinas siderúrgicas geram, durante sua produção, além do aço, materiais de descarte diversos, dentre eles as escórias de alto forno e de aciaria. Tem-se procurado empregar este material nas áreas da construção civil e rodoviária (Machado, 2000; Filev, 2003). No Brasil, para cada tonelada de aço produzido das indústrias siderúrgicas, tem-se entre 70 e 170 kg de escória de aciaria como material de descarte.

O processo siderúrgico começa nas minerações, onde são extraídas as matérias-primas, tais como minério de ferro, minério de calcário, dolomito e carvão mineral. Essas matérias-primas são transportadas até as usinas, e após o beneficiamento, são levadas aos alto-fornos, onde, sob ação do calor e oxigênio, o minério de ferro é reduzido. Essa primeira redução tem como principal finalidade diminuir o teor de impurezas, ou seja, reduzir as quantidades das substâncias como Manganês (Mn), Fósforo (P) e Enxofre (S) existentes nos minérios, os quais são retirados parcialmente com escórias e/ou com os gases.

Após a separação do ferro gusa da escória de alto forno, aquele é encaminhado à aciaria, instalação destinada a transformá-lo em aço. Nessa segunda transformação, com o objetivo de reduzir o teor de carbono do gusa para a obtenção do aço é necessária a adição da cal (CaO)

(para remoção de C, Si e P), com um consumo de aproximadamente 24 a 32 kg/ton, e de dolomito ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) para a proteção do refratário do forno, sendo, portanto, a escória um produto resultante da combinação desses elementos (Machado, 2000). Nessa transformação tem-se a geração simultânea de aço, cujas porcentagens de carbono são inferiores a 2,04%, e escória de aciaria, em quantidade aproximada de 140 kg em peso de escória por tonelada de aço (Machado, 2000).

O potencial expansivo da escória ocasionado pelo processo de hidratação, devido a concentração de CaO e MgO, pode chegar a até 10%, o que inviabilizaria o material para o uso em questão. Entretanto, este potencial pode ser reduzido a limites aceitáveis através de um processo de cura que consiste na hidratação do material, por irrigação, no intervalo de 3 a 6 meses.

A presente escassez de recursos para melhoria da infraestrutura viária motiva a busca de alternativas para a implantação e/ou recuperação da malha rodoviária do país. Neste contexto, têm se procurado investigar novos materiais destinados à pavimentação. O uso de escória de aciaria como material de base para camadas de pavimentos vem sendo pesquisado por outros autores (Silva, 1991; Silva, 1994; Kandhal e Hoffman, 1998; Khan e Wahhab, 1998; Bagampadde *et al.*, 1999; Silva e Mendonça, 2001; Alverenga *et al.*, 2001 Rohde, 2002). Dentre os materiais convencionais destinados à pavimentação a ser substituído pela escória, o mais comum é a brita oriunda do desmonte de rocha viva até a granulometria desejada que, mesmo sendo um excelente agregado segundo as normas do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), possui custo elevado.

O objetivo principal do presente estudo é avaliar o comportamento mecânico de misturas de solo e escória de aciaria, a partir de resultados de ensaios triaxiais cíclicos (M_R) e Índice de Suporte Califórnia (CBR). Deverão ser analisados os M_R 's e CBR's das misturas considerando os percentuais de escória utilizados e a comparação com as misturas compostas com os agregados convencionais oriundos do desmonte de rocha.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Brasil, ainda há uma carência de pesquisas no que diz respeito à caracterização, em laboratório, de misturas solo-escória. Alverenga *et al.* (2001) analisaram e compararam as propriedades resilientes e custos de pavimentos flexíveis utilizando escória de aciaria como base. Neste estudo a escória de aciaria utilizada era proveniente da companhia Siderúrgica Nacional localizada no município de Volta Redonda/RJ. Os autores utilizaram os métodos de dimensionamento empírico e mecanístico baseados nos ensaio de CBR e módulo de resiliência, respectivamente. Sob o ponto de vista mecanístico, os pesquisadores concluíram que a escória de aciaria estudada mostrou-se adequada para o uso como camada de pavimento. Para a região investigada, e empreendimentos realizados até 120 km de distância dos centros geradores de escória, este material atende com eficiência as prescrições de ordem técnica, econômica e também ambiental.

Rohde (2002) avaliou o M_R , CBR, Abrasão Los Angeles, durabilidade ao sulfato de sódio e potencial expansivo de escória de aciaria pura. O material foi enquadrado no faixa C de DNER para utilização de material granular para pavimentos (DNER 10/94). Os ensaios para determinação do potencial expansivo foram executados conforme os procedimentos preconizados na norma ASTM D-4792.

Os autores concluíram que o tempo mínimo de estocagem para redução do potencial expansivo até os limites aceitáveis é de 4 meses. Estes pesquisadores constataram ainda que o valor de CBR da escória de aciaria é da ordem de 200% e o M_R , em média, é superior ao dos outros materiais granulares convencionais como basalto, saibro e granito.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A escolha preliminar do solo para composição das misturas do presente estudo foi baseada na condição deste material ter sido utilizado na execução do subleito da BR-116 no trecho compreendido entre os municípios de Fortaleza e Itaitinga-CE. A Tabela 1 mostra os índices físicos e as classificações HRB e USCS para o solo em questão.

Tabela 1: Resultados dos ensaios dos limites de Atterberg, massa específica dos sólidos e classificações HRB e USCS

Limite de liquidez (%)	30
Índice de plasticidade (%)	12
Classificação HRB	A-6
Classificação USCS	SC
Massa específica real dos sólidos (g/cm^3)	2,618

O agregado utilizado para as misturas de solo-brita é oriundo do desmonte de rocha viva da pedreira localizada no município de Itaitinga-CE a 25 km de Fortaleza.

A escória utilizada na pesquisa é proveniente da indústria siderúrgica Gerdal S/A, localizada no município de Maracanaú/CE a 30 km de Fortaleza. Após sua coleta, o material foi submetido a um processo de cura com intuito de reduzir seu potencial expansivo através da hidratação dos principais componentes responsáveis pela expansão, CaO e MgO. Neste sentido, o processo de cura consistiu em estocar o agregado a céu aberto regando-o duas vezes ao dia por um período de três meses. A Figura 1 ilustra a heterogeneidade na forma do agregado utilizado.



Figura 1: Foto dos grãos da escória

Após o período de cura, a escória foi submetida ao ensaio de determinação do potencial expansivo segundo os procedimentos preconizados pela norma PTM 130 adaptada para DMA-1/DER-MG/82 e baseada na norma ASTM D 4792/95. Este método consiste na medição volumétrica, durante 14 dias, de três corpos de prova da escória compactados na energia modificada do ensaio de Proctor. As amostras são acondicionadas a uma temperatura

constante de 70°C durante todo o ensaio. Nos primeiros 7 dias os corpos de prova são submetidos à imersão em água e nos 7 dias restantes à condição de saturação. Em todas as condições as leituras são efetuadas no intervalo de 24 horas. A amostra de escória utilizada na pesquisa foi ainda submetida aos ensaios de durabilidade ao sulfato de sódio (DNER, 1994a) apresentando uma perda em massa de 4,7%.

Foram realizados 2 ensaios de abrasão *Los Angeles* (DNER, 1994b) para as graduações B (34 e 37%) e C (36 e 38%). Os resultados encontrados para este ensaio são superiores ao limite estabelecido pelo DNER. Estes valores são semelhantes aos encontrados na literatura estudada (Rohde, 2002). Para agregados tradicionais o Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes (DERT-CE) estabelece um limite de até 55% (DERT, 1994) e o DNER estabelece um limite de 40% para agregados graúdos, inclusive escórias (DNER, 1994c). Este mesmo agregado siderúrgico está sendo utilizado em outra pesquisa desenvolvida pelos autores em substituição aos agregados convencionais para misturas asfálticas.

Para verificar o comportamento das misturas no tocante aos valores de CBR e M_R foram compostas misturas de solo-escória em dois diferentes teores de escória, 50% e 70%. Estes mesmos percentuais foram utilizados para as misturas de solo-brita obtendo-se misturas com curvas granulométricas coincidentes quando comparadas com as misturas solo-escória. Os ensaios de CBR e M_R foram executados segundo os procedimentos descritos nas normas DNER (1994d) e DNER (1994e), respectivamente. A Figura 2 mostra a granulometria do solo utilizado, da escória e os percentuais das misturas enquadradas na faixa D do DNER para material de base granular. As curvas granulométricas das misturas de solo-brita não são mostradas na Figura 2 por serem coincidentes com as das respectivas misturas de solo-escória.

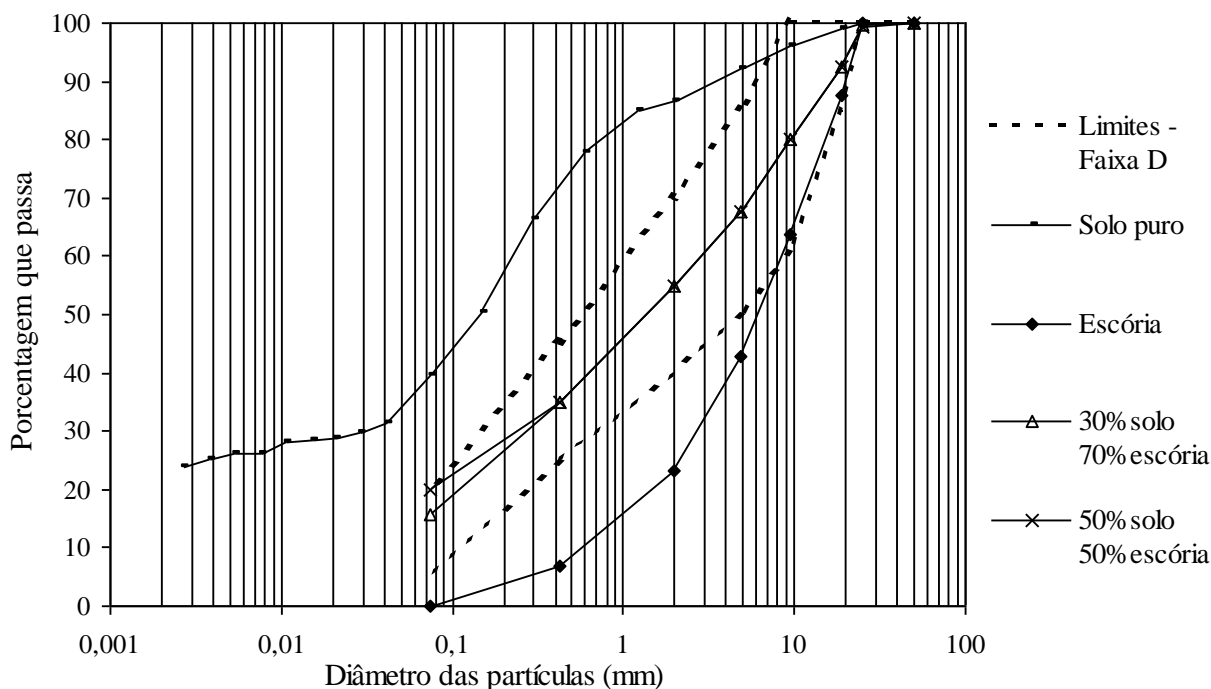


Figura 2: Granulometria do solo e das misturas solo-escória

Para verificar a influência do tipo de solo incorporado às misturas, outros solos de diferentes granulometrias serão selecionados posteriormente.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Expansibilidade

Para o ensaio da determinação do potencial expansivo da escória, o material foi compactado na energia normal do ensaio de Proctor. Durante a compactação contactou-se a baixa coesão do material e a dificuldade de obter uma curva de compactação bem definida. Após várias tentativas, a amostra de 6000 g foi assim obtida: 1000 g retidos na peneira de 2,0 mm; 1000 g retidos na peneira de 0,42 mm; 1000 g retidos na peneira de 0,18 mm; 1000 g passando na peneira de 0,18 mm e 2000 g não fracionados. Esta divisão foi efetuada para que os corpos de prova apresentassem coesão. Os CP's foram compactados em 5 camadas obtendo-se a massa específica seca máxima ($2,516 \text{ g/cm}^3$) e a umidade ótima (6,4%).

A Figura 3 apresenta a porcentagem de expansão acumulada e diária \times tempo de cura em dias. A amostra foi mantida na condição submersa para os 7 primeiros dias e para dias os restantes na condição saturada (adicionando-se 1000 ml de água por dia ao molde). A expansão volumétrica total após 14 dias de ensaio foi de 0,61%. A altura da amostra utilizada foi de 115,5 mm. A norma ASTM D 2940/1992 estabelece o limite máximo de 0,5% de expansão aos 7 dias (Rohde, 2002). Para o material utilizado neste estudo, este valor não foi ultrapassado, visto que nesta data a expansão foi de 0,34%.

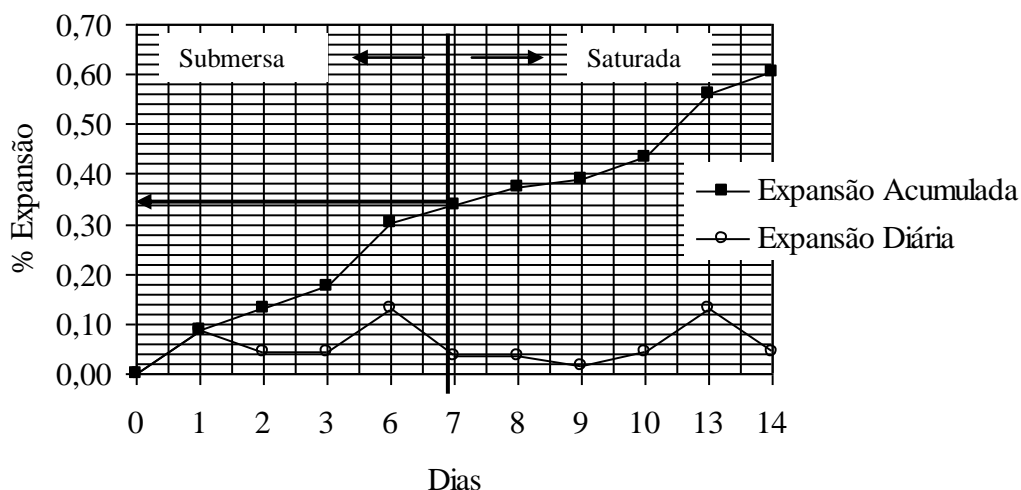


Figura 3: Porcentual de expansão acumulada e diária (Cavalcante *et al.*, 2003)

4.2. M_R e CBR

A Tabela 2 apresenta os valores de umidade ótima (w_o), massa específica seca máxima (ρ_{dmax}), CBR e expansão obtidos para as misturas solo-escória, solo-brita e solo puro compactados na energia intermediária do ensaio de Proctor. Analisando-se estes valores, observa-se que a adição de escória ao solo conduziu a menores valores de umidade ótima e maiores valores de massa específica seca máxima e CBR.

Tabela 2: Parâmetros dos materiais investigados

Material	ρ_{dmax} (g/cm^3)	w_o (%)	CBR (%)	Expansão (%)
Solo puro	1,940	11,0	17	0,7
50% Solo + 50% Brita	2,100	7,5	30	0,4
30% Solo + 70% Brita	2,150	7,0	35	0,5
50% Solo + 50% Escória	2,250	6,5	50	0,0
30% Solo + 70% Escória	2,325	6,0	70	0,0

*Os valores de CBR foram obtidos pela média de 2 corpos de prova

A Figura 4 ilustra, para o solo sem adição de escória, para as misturas de solo-escória e solo-brita, a variação de M_R com a tensão desvio. Optou-se por esta representação, em razão do bom desempenho do modelo correspondente e por possibilitar a construção de um gráfico bi-dimensional. Deve-se destacar que o equipamento utilizado para a realização dos ensaios triaxiais cíclicos só permitiu a leitura de deslocamentos para tensões desvio cíclicas superiores a 100 kPa.

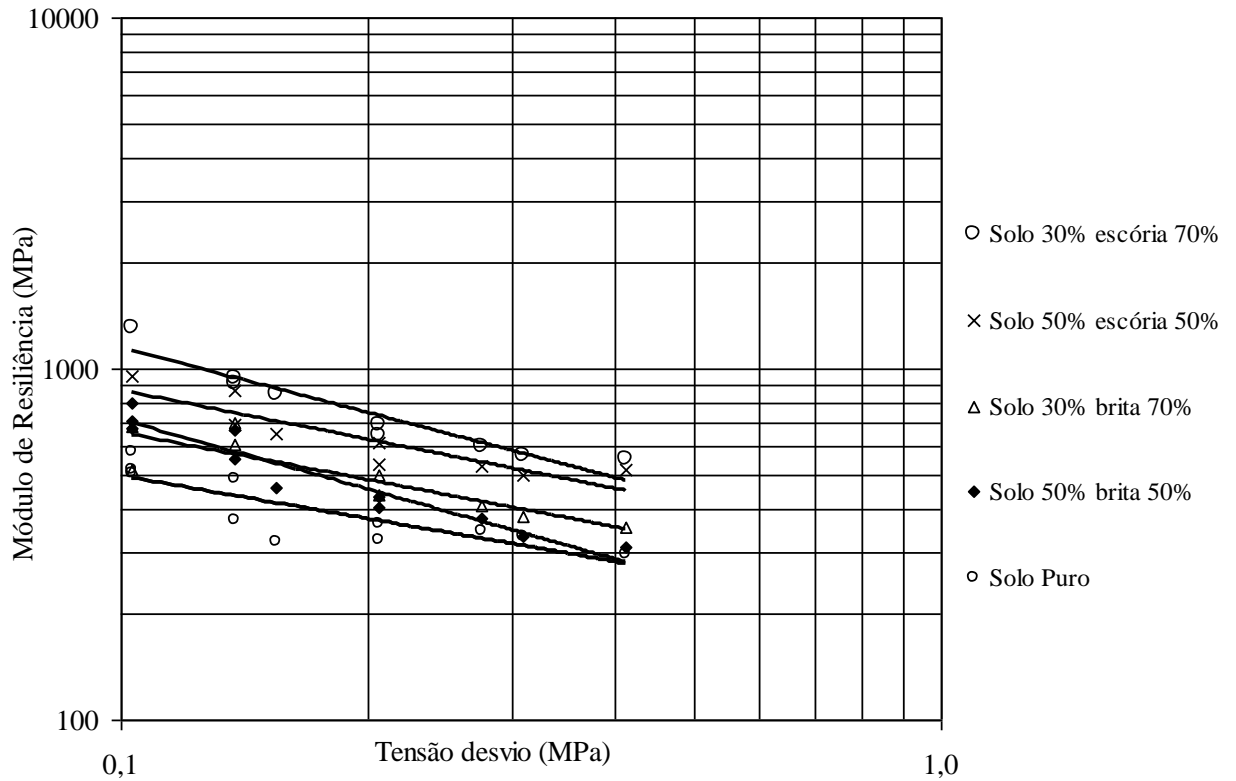


Figura 4: M_R para as misturas solo-escória, solo-brita e solo puro

Para investigar mais profundamente a variação do M_R com o estado de tensão, foram utilizadas três relações, que levam em conta respectivamente, a tensão desvio (σ_d), a tensão confinante (σ_c) e as tensões desvio e confinante simultaneamente. O diâmetro e altura dos corpos de prova para os ensaios de M_R eram respectivamente, 10 e 20 cm.

Analisando-se os valores de coeficientes de determinação R^2 para cada uma das relações e tomando-os como critério para medir a capacidade dos modelos representarem o M_R , a relação que considera o efeito da tensão desvio em conjunto com a tensão confinante ($M_R = K_1 \cdot \sigma_d^{K_2} \cdot \sigma_c^{K_3}$) mostra-se a mais satisfatória, seguida da relação que considera apenas a tensão desvio. A expressão, em função da tensão confinante, conduz a valores de R^2 muito baixos. Este fato indica que a influência da tensão confinante no M_R é pequena nas misturas estudadas e constituídas com solo argiloso. A Tabela 3 mostra os parâmetros de regressão K_1 , K_2 , K_3 e os coeficientes de determinação R^2 correspondes à melhor relação.

Tabela3: Modelos adotados para representar o M_R em função das tensões

MODELO	K_1	K_2	K_3	R^2	K_1	K_2	K_3	R^2
M_R (MPa)	50% Solo + 50% Escória				30% Solo + 70% Escória			
$M_R = K_1 \cdot \sigma_c^{K_2}$	227,43	-0,49	-	0,34	324,71	-0,276	-	0,16
$M_R = K_1 \cdot \sigma_d^{K_2}$	296,51	-0,56	-	0,93	297,58	-0,464	-	0,79
$M_R = K_1 \cdot \sigma_d^{K_2} \cdot \sigma_c^{K_3}$	337,42	-0,58	0,073	0,95	466,09	-0,576	0,269	0,95
M_R (MPa)	50% Solo + 50% Brita				30% Solo + 70% Brita			
$M_R = K_1 \cdot \sigma_c^{K_2}$	206,58	-0,361	-	0,24	206,62	-0,252	-	0,22
$M_R = K_1 \cdot \sigma_d^{K_2}$	235,28	-0,446	-	0,77	197,91	-0,393	-	0,65
$M_R = K_1 \cdot \sigma_d^{K_2} \cdot \sigma_c^{K_3}$	430,75	-0,559	0,337	0,91	230,71	-0,576	0,187	0,82
M_R (MPa)	Solo Puro							
$M_R = K_1 \cdot \sigma_c^{K_2}$	149,24	-0,469	-	0,39	-	-	-	-
$M_R = K_1 \cdot \sigma_d^{K_2}$	156,95	-0,652	-	0,92	-	-	-	-
$M_R = K_1 \cdot \sigma_d^{K_2} \cdot \sigma_c^{K_3}$	187,55	-0,825	0,191	0,98	-	-	-	-

6. CONCLUSÕES

As misturas solo-escória apresentaram maiores valores de massa específica seca máxima e menores valores de umidade ótima, quando comparadas com as misturas solo-brita e o solo sem adição de agregado. O valor de CBR para a mistura solo-escória é, em média, 3 vezes maior que o do solo puro e, em média, o dobro dos valores de CBR das misturas solo-brita.

Os valores de M_R das misturas solo-escória foram, considerando qualquer nível de tensão desvio, superiores aos M_R 's obtidos para as misturas solo-brita e solo sem agregado. Este comportamento pode ser justificado pela porosidade da escória proporcionar maior intertravamento na mistura. O efeito da tensão confinante no valor do módulo de resiliência em todos os materiais é pequeno se comparado com o efeito da tensão desvio. Observou-se também que os módulos de resiliência decrescem com o aumento da tensão desvio em todas as misturas analisadas.

A escória de aciaria, desde que seja submetida ao processo de cura por hidratação e seu potencial expansivo seja reduzido aos limites aceitáveis, poderá ser empregada como agregado para as camadas de base e sub-base de pavimentos. Sob o aspecto econômico, o emprego deste agregado siderúrgico é vantajoso visto que, seu preço de aquisição é 4 vezes menor que o agregado oriundo do desmonte de rocha viva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarenga, J.C.A. (2001) Um estudo de avaliação estrutural e econômica de pavimentos flexíveis de escória de aciaria. *Anais do XV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Campinas, v.1 p. 371-379.
- ASTM D 4792 (1995) – Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions. Philadelphia. 1995
- Bagampadde, U.; H.I.A. Wahhab e S.A. Aiban (1999) Optimization of steel slag aggregates for bituminous mixes in Saudi Arabia. *Journal of Materials in Civil Engineering*, p. 30–35.
- Cavalcante, V. T. F.; Motta, L. M. G.; Soares, J. B.; Aldigueri, D. R. e Parente, E. B. (2003) Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas com Utilização de Escória de Aciaria como Agregado. *Submetido para apreciação ao XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Rio de Janeiro, artigo científico.
- DERT (1994) *Especificações gerais para serviços e obras rodoviárias* (1ª ed.). Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes/CE.
- DNER (1994a) ME 089 – *Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER (1994b) ME 035 – *Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER (1994c) ME 262 – *Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER (1994d) ME 050 – *Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras trabalhadas*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER (1994e) ME 131 – *Determinação do módulo de resiliência de solos*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- Filev, R. (2003) www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria_de_aciaria.htm.
- Kandhal, P.S. e G.L Hoffman (1998) Evaluation of steel slag fine aggregate in hot-mix asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, Washington, D.C., n. 1583, p. 28–36.
- Khan, M. I. e H.I.A. Wahhab (1998) Improving slurry seal performance in Eastern Saudi Arabia using steel slag. *12º Construction and Building Materials*, p. 195–201.
- Machado, A.T. (2000) Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- PTM 130 (1978) *Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria*. Pennsylvania Testing Method. Adaptado pelo Departamento de Estradas e Rodagem de Minas Gerais – DMA-1/ DER-MGG-1982.
- Rohde, L. (2002) Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul- LAPAV.
- Silva, E.A. (1991) Uso de escoria de acerias tratadas com emulsiones catiónicas em varias pavimentaciones. *6º Congresso Ibero-Latino Americano Del Asfalto*, Santiago, Tomo I, p. 01–18.
- Silva, E.A. (1994) Uso de escória de aciaria em pavimentação viária. *28ª Reunião Anual de Pavimentação*, Belo Horizonte, v. 1, p. 261–283.
- Silva, E.A. e R.L. Mendonça (2001) Utilização da escória de aciaria em todas as camadas do pavimento. *Revista Engenharia Ciência e Tecnologia*, v. 4, n. 2, p. 7–20.