

ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA: UMA ALTERNATIVA AOS MATERIAIS GRANULARES TRADICIONAIS

Luciana Rohde¹

Washington Peres Núñez²

Jorge Augusto Pereira Ceratti³
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil

Recebido: 15/06/2002 - Aprovado: 15/08/2002

RESUMO

São apresentados os resultados de um estudo sobre o emprego da escória de aciaria elétrica como agregado para pavimentação. Este resíduo é gerado na produção do aço em siderúrgicas que utilizam fornos elétricos a arco. As características físicas e mecânicas do agregado foram determinadas através de ensaios de granulometria, durabilidade ao sulfato de sódio, abrasão no equipamento de Los Angeles, compactação, Índice de Suporte Califórnia e módulo de resiliência. Constatou-se a necessidade de corrigir a granulometria da escória, procedimento que melhorou a capacidade de suporte e a trabalhabilidade do material, gerando módulos de resiliência superiores aos de materiais granulares tradicionais. Através da avaliação do potencial expansivo do material concluiu-se que o tempo de estocagem mínimo para liberação do agregado é 4 meses. Os resultados do estudo permitem concluir que a escória de aciaria elétrica pode ser empregada como material de pavimentação proporcionando boa qualidade técnica e benefícios ambientais e econômicos.

Palavras-chave: Escória de aciaria, pavimentos, bases, comportamento mecânico, materiais alternativos.

ABSTRACT

This paper presents the results of a study of the use of electric arc furnace slag as pavement aggregates. This waste is generated during steel production using electric arc furnace. The following tests were carried out in order to determine the aggregate characteristics: grain size distribution, soundness, Los Angeles abrasion, compaction, CBR and resilient modulus. In order to use the slag as granular layer, its grain size distribution must be corrected. This procedure increased the material bearing capacity and workability. The evaluation of expansion potential allowed concluding that the slag must be cured for at least four months before being used in pavement construction. The slag presented resilient modulus that exceeded those of traditional materials; its use resulting in thinner and less costly pavements. The study results led to the conclusion that the use of electric arc furnace slag as pavement material is possible, providing good technical quality and economic advantages.

Keywords: Steel slag, pavements, bases, mechanical behavior, alternative materials.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento econômico tem contribuído para o aumento da demanda por agregados para o uso em obras de engenharia. A carência de materiais rodoviários tradicionais aliada às exigências e limitações ambientais impostas na construção de pavimentos tornaram imperativa a investigação cuidadosa de materiais alternativos, procurando-se com isso, soluções técnicas mais econômicas e que minimizem os impactos ao meio ambiente.

Além de minimizar as agressões ao meio ambiente, como as causadas pela deposição de resíduos em aterros e a emissão de gases poluentes, como o CO₂, a reciclagem ou a utilização de subprodutos também é responsável pela redução da extração predatória de recursos naturais, como a exploração de jazidas de agregados. A escória de aciaria tem sido utilizada em um número crescente de aplicações nos últimos tempos. Entre as diversas aplicações destaca-se o emprego como agregado para pavimentação.

Países como Austrália, Bélgica, Canadá, Estados Unidos, Finlândia, Holanda, Índia, Inglaterra e Suécia têm utilizado a escória de aciaria como agregado nas diferentes camadas dos pavimentos. Alemanha e Japão possuem várias especificações visando o processamento e a utilização do agregado de escória de aciaria (Chesner *et al.*, 2001). Na França, têm sido desenvolvidas especificações para o uso de escórias de aciaria, conhecidas como *Grave-Laitier* - mistura de agregado pétreo e escória ou somente escória com adição de cal hidratada apresentando comportamento similar ao de materiais semi-rígidos e podendo ser usada como base ou sub-base de pavimentos. Esta técnica é a mais utilizada na execução de bases de pavimentos na França e estima-se que cerca de 65% das rodovias francesas tenham uma camada do pavimento constituída de *grave-laitier*. Uma técnica similar ao processo francês é usada também na África do Sul (Sherwood, 1995).

No Brasil, o uso da escória de aciaria em pavimentação não é recente, havendo vários trechos executados há mais de 20 anos (Lima *et al.*, 2000). A escória compete principalmente com areia e brita nesta aplicação. Atualmente apenas 35% da escória de aciaria elétrica gerada é utilizada, especialmente como agregado para construção de estradas, sendo o restante estocado (IBS, 1998).

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo realizado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em parceria com uma indústria siderúrgica localizada na região metropolitana de Porto Alegre visando avaliar a viabilidade técnica do emprego da escória de aciaria elétrica como agregado para base e sub-base de pavimentos destinados a rodovias de baixo volume de tráfego como substituição ao material tradicionalmente empregado, a brita graduada.

2. A ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA

Nos processos de produção do aço são gerados diversos tipos de escória. Basicamente existem três processos, caracterizados pelo emprego de diferentes fornos de refino: o Siemens-Martin (*Open Heart - OH*), o conversor a oxigênio (*Linz e Donawitz - LD ou Blast Oxygen Furnace - BOF*) e o forno elétrico a arco (*Electric Arc Furnace*). Os dois processos mais utilizados mundialmente são o de fusão e refino de sucata em fornos elétricos a arco e o de refino do ferro-gusa líquido em conversores a oxigênio. A utilização de fornos do tipo *Siemens-Martin* está em declínio, não ocorrendo no Brasil. Observa-se uma tendência mundial de aumentar a utilização de fornos elétricos, visando a utilização da sucata metálica gerada com consequente benefício ambiental.

O Brasil produziu no ano 2000 aproximadamente 28 milhões de toneladas de aço. Deste total 21% foi produzido por

siderúrgicas que utilizam fornos elétricos (IBS, 2001). Dessa forma, por ser produzida em menor escala e em áreas concentradas, a escória de aciaria elétrica é pouco conhecida, restringindo-se os estudos às áreas onde é gerada.

A Figura 1 apresenta um esquema simplificado da geração de escórias na aciaria elétrica, com a geração específica aproximada em cada etapa. Ao sair do forno elétrico o aço ainda apresenta impurezas indesejáveis. Um dos métodos para levar o metal à composição desejada é a combinação de um refino oxidante (que ocorre no forno elétrico) e de um refino redutor (que ocorre normalmente na panela ou no forno-panela) (Lúcio, 1981).

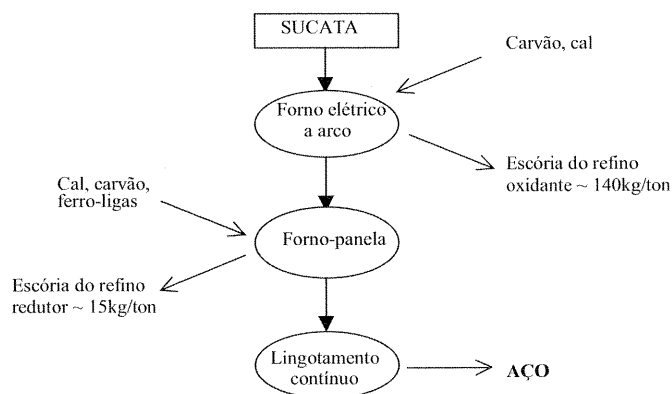


Figura 1: Esquema simplificado da geração de escórias na aciaria elétrica (Geyer, 2000).

A escória de aciaria elétrica é o produto resultante da combinação de CaO e MgO com os elementos a serem retirados por oxidação da sucata metálica, formando silicatos e óxidos. Além das fases não metálicas, a escória de aciaria pode conter partículas de aço ou ferro metálico. A Tabela 1 apresenta as composições típicas das escórias de refino oxidante e escórias de refino redutor no Brasil.

Tabela 1: Composições químicas típicas de escórias dos refinamentos oxidante e redutor no Brasil (Geyer, 2000).

	CaO (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	FeO (%)	MnO (%)	SO ₃ (%)
Refino oxidante	30-35	8-12	15-20	3-9	25-35	3-6	-
Refino redutor	45-55	8-12	20-25	3-9	0,5-3,5	0,5-3,5	0,5

A hidratação da cal livre (CaO) e do periclásio (MgO) e a corrosão e oxidação do ferro metálico residual são responsáveis pela característica expansiva da escória. Estas reações podem provocar aumento de volume de até 14% em relação ao volume inicial da escória, podendo causar fragmentação do agregado (Machado, 2000).

O procedimento mais empregado para reduzir ao mínimo o fenômeno de expansão é o de envelhecer ou "curar" a escória no pátio, regando-a com água natural ou aquecida buscando a hidratação dos elementos instáveis, em especial a cal livre e o periclásio. O período de estocagem é função do conteúdo de cal livre, podendo oscilar entre 3 meses e um ano, ainda que alguns países utilizem escória fresca para algumas aplicações. Porém, o período de cura normalmente adotado é de 6 meses.

Kandhal e Hoffman (1998) avaliaram a expansibilidade de amostras de escória de aciaria de diferentes siderúrgicas que passaram por período de cura superior a seis meses e amostras não expostas utilizando o método PTM 130 e observaram porcentagens de expansão de até 0,3% para as amostras curadas e 2,8% para as não curadas, sendo o máximo especificado 0,5%. Estes autores concluíram ser necessário curar o material para garantir a redução da expansibilidade a níveis não prejudiciais à qualidade do agregado.

3. MÉTODOS UTILIZADOS

Para a realização desta pesquisa foi formada uma pilha de estocagem com a escória de aciaria elétrica gerada durante o período de um mês, visando garantir a representatividade do resíduo gerado pela siderúrgica estudada. A pilha formada apresentou dimensões aproximadas de 20x25x3 (m) contendo cerca de 2500 t de agregado com diâmetro máximo de 1 polegada.

A partir do término da formação da pilha de estocagem, foram realizadas amostragens mensais durante 6 meses, buscando avaliar o comportamento do material quando exposto a diferentes períodos de envelhecimento ao ar livre.

Tendo em vista as limitações dos métodos de amostragem recomendados pelas normas utilizadas no Brasil, optou-se por empregar um método alternativo para a coleta das amostras. Dividiu-se horizontalmente a pilha em seis quadrantes e verticalmente em duas profundidades. A cada amostragem, com o auxílio de uma máquina retroescavadeira com pá pequena, foram coletadas amostras de pelo menos três quadrantes distintos, tanto na parte superior da pilha quanto na inferior, sendo retiradas a cada mês cerca de 500 kg de agregado.

As características físicas e mecânicas do agregado foram determinadas através de ensaios de granulometria, durabilidade ao sulfato de sódio, abrasão no equipamento de Los Angeles, compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e módulo de resiliência, seguindo as especificações do extinto DNER.

A expansibilidade da escória de aciaria foi avaliada utilizando o método ASTM D-4792 – *Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions*. Este método foi escolhido por ser o mais utilizado e recomendado na bibliografia internacional (Coomarasamy e Walsak, 1995; Chesner *et al.*, 2001). Este ensaio consiste basicamente na medição da expansão volumétrica de três amostras compactadas de escória, imersas em água à temperatura de $(70 \pm 3)^\circ\text{C}$ durante um período de 7 dias (168 horas). A expansão dos corpos de prova é determinada a partir das leituras dos deslocamentos verticais. Para possibilitar leituras quase contínuas, foram instalados sensores de deslocamento conectados a um sistema de aquisição de dados que executa medições a cada 30 minutos, com resolução de 0,01 mm. Os dados obtidos são então colocados em gráficos mostrando a variação do percentual de expansão em função do tempo de imersão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o resfriamento, a escória de aciaria passa por um processo de beneficiamento que consiste basicamente da britagem e da separação da fase metálica que ainda pode estar presente. O processo de britagem não possui nenhum controle quanto à distribuição granulométrica do material, apenas observa-se o diâmetro máximo (bitola).

Por outro lado, o processo de amostragem adotado garantiu amostras com distribuições granulométricas bem semelhantes nos diferentes tempos de estocagem. A análise granulométrica das amostras revelou que a granulometria da escória estudada não se enquadra em nenhuma das faixas exigidas pela especificação do DNER (1994) para a utilização como base granular de pavimentos (DNER-ES 010/94), aproximando-se mais ao limite inferior da distribuição da Faixa C. Este fato alerta para a necessidade de corrigir-se a granulometria da escória estudada, através de britagem e composição.

Além disso, durante a execução do ensaio de compactação enfrentou-se dificuldade de obter uma boa compactação dos corpos de prova, que por sua vez dificultaria a desmoldagem das amostras, inviabilizando a realização dos ensaios de módulo de resiliência.

Alguns autores relatam que escórias de aciaria podem apresentar ISC acima de 100%, alcançando até 300% (Chesner *et al.*, 2001; Silva, 1994; Lima *et al.*, 2000). Dessa forma a obtenção de

valores de ISC inferiores aos esperados, aliado aos fatores já expostos, deixaram clara a necessidade das alterações na distribuição granulométrica das amostras.

Sendo assim optou-se pela correção granulométrica, que se iniciou com as amostras referentes ao quarto mês de estocagem, tendo em vista que não havia material disponível para realizar o processo de fracionamento para os meses anteriores. O material resultante da correção granulométrica foi denominado Escória com Granulometria Corrigida (EGC). A Figura 2 apresenta a curva granulométrica da EGC, bem como a granulometria original da escória, em comparação aos limites da Faixa C.

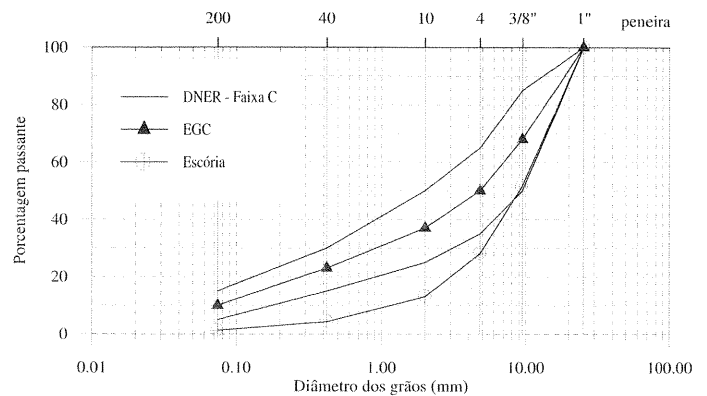


Figura 2: Distribuição granulométrica da escória nas granulometrias original e corrigida em comparação aos limites da Faixa C do DNER.

Conforme era esperado, a alteração da distribuição granulométrica do material proporcionou melhorias na trabalhabilidade, na compactação e nos resultados de ISC. A Figura 3 apresenta a variação do ISC das amostras em função do tempo. Pode-se observar que os valores de ISC para a EGC ficaram sempre acima de 100%, verificando-se um aumento da capacidade de suporte do material quando empregado com a granulometria corrigida se comparado ao agregado com a granulometria original (meses 1 a 3).

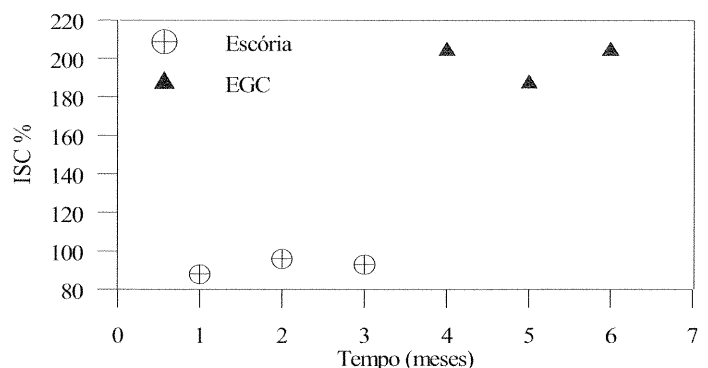


Figura 3: Variação do ISC das amostras de escória e EGC em função do tempo de cura.

Características como a perda de massa por abrasão no equipamento de Los Angeles, a perda de massa devida ao ataque por sulfatos, a densidade e a absorção de água não sofreram variações significativas em função do tempo de exposição. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 2: Características da escória de aciaria estudada.

Perda de massa por abrasão Los Angeles	38%
Perda de massa devida ao ataque por sulfatos	0,5%
Densidade	3,4
Absorção de água	2,6%

Ao realizar-se os ensaios de expansão com as amostras de escória na granulometria original observou-se a ocorrência de uma provável distorção de resultados em função da compactação

deficiente, sendo observada contração inicial das amostras. A deficiência da compactação é uma consequência da predominância da fração pedregulho na distribuição granulométrica do material. Durante os três primeiros meses os ensaios de expansão foram realizados utilizando a escória com granulometria original.

Para caracterizar a influência da distribuição granulométrica e, por conseguinte, da compactação das amostras, foi coletada uma nova amostra que não passou por período de estocagem. Foram realizados ensaios para a verificação do potencial expansivo com amostras com a granulometria corrigida e com amostras com granulometria original. Os resultados obtidos para estas amostras são apresentados na Figura 4.

A norma americana ASTM D-2940/92 - *Standard specification for graded aggregate material for bases or subbases for highways or airports*, que fixa os requisitos dos agregados para utilização como base ou sub-base de rodovias e aeroportos, estabelece para o ensaio de expansão um limite máximo de 0,5% de expansão aos sete dias (168 horas) de ensaio.

Comparando-se os resultados apresentados na Figura 4 conclui-se que a correção granulométrica era fundamental para a quantificação do potencial expansivo da escória de aciaria. Tendo em vista que esta característica é função também da distribuição granulométrica, é essencial que os ensaios sejam realizados com amostras com a granulometria proposta para a utilização do agregado.

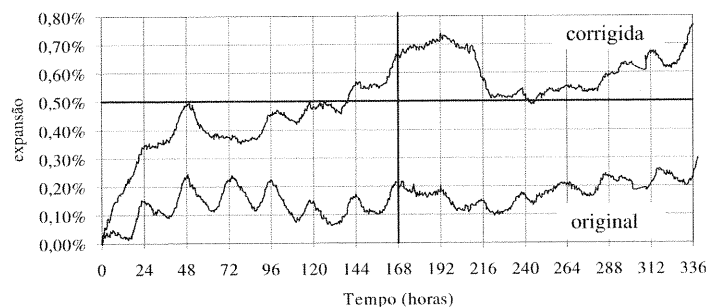


Figura 4: Variação da expansão média em função do tempo de ensaio para escória sem período de estocagem com granulometrias original e corrigida.

A Figura 5 apresenta as médias de expansão dos corpos de prova ensaiados com amostras de EGC não exposta e curada por 4 meses. A análise dos resultados permitiu concluir que a escória de aciaria estudada pode ser liberada para utilização como agregado para pavimentação após quatro meses de cura.

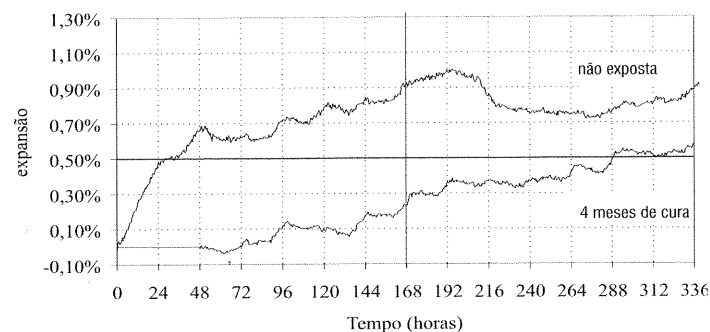


Figura 5: Variação da expansão média em função do tempo de ensaio para amostras de EGC não curada e exposta por 4 meses.

Tendo em vista que a EGC pode ser empregada como substituta de materiais convencionais, é interessante comparar o seu comportamento quanto a deformabilidade elástica com o verificado para alguns agregados tradicionalmente empregados nas camadas de base e sub-base de pavimentos. A Figura 6

compara os módulos de resiliência da EGC com os obtidos para britas de basalto (Marmitt, 2002), granito (Ceratti, 2000) e saibro (LAPAV, 2001).

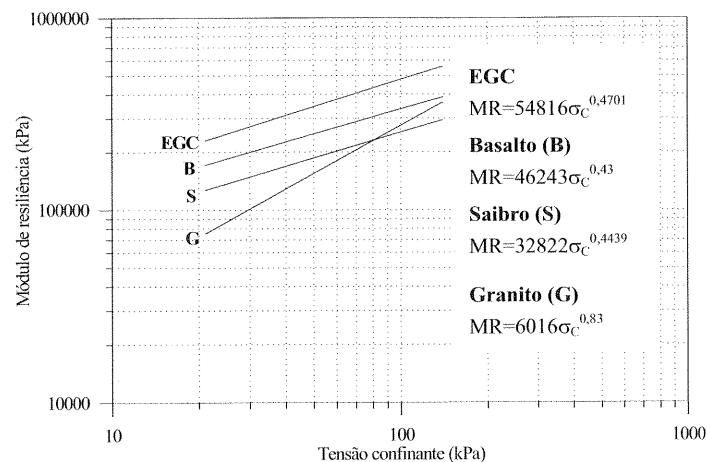


Figura 6: Módulos de resiliência da EGC e de materiais granulares convencionais.

Observa-se que a EGC apresenta módulo de resiliência superior aos dos outros materiais granulares para qualquer nível de tensão confinante, comprovando o seu excelente comportamento quanto a deformações elásticas. Tal diferença pode ser função da forma e textura superficial rugosa do agregado que garantiriam um maior intertravamento entre as partículas de escória em relação aos agregados tradicionais. Vários autores citados por Lekarp *et al.* (1999) concluíram em seus estudos que agregados com partículas com superfície rugosa apresentam módulos de resiliência superiores aos de agregados com superfície lisa. Barksdale e Itani (1989) ao estudarem diversos tipos de agregados observaram que o módulo de resiliência de agregados com partículas angulares e com superfície rugosa são superiores aos de agregados com partículas arredondadas.

5. CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos por esta pesquisa permite concluir que:

- A escória de aciaria elétrica pode ser empregada como agregado para base e sub-base de pavimentos.
- A correção granulométrica da escória de aciaria elétrica estudada foi fundamental para a melhoria de suas características, como a capacidade de suporte e trabalhabilidade.
- O Índice de Suporte Califórnia (ISC) da EGC é da ordem de 200%, ou seja, cerca de duas vezes a capacidade de suporte do material padrão (brita graduada).
- A durabilidade das amostras de EGC ao ataque por sulfatos é muito elevada, com perdas de massa total máxima de 0,5%, muito abaixo do limite especificado para a escória de aciaria (5%).
- A escória de aciaria elétrica apresenta natureza expansiva devido, principalmente, à presença de CaO e MgO livres. Nesta pesquisa mostrou-se que um período de 4 meses de cura através de estocagem a céu aberto é suficiente para garantir níveis de expansão não prejudiciais à qualidade do agregado. É fundamental que os ensaios de expansão sejam realizados com amostras com a distribuição granulométrica proposta para utilização, visto que esta característica interfere nos resultados.
- Para qualquer nível de tensão confinante a EGC apresenta módulo de resiliência superior ao de materiais granulares tradicionalmente empregados em pavimentação, comprovando seu excelente comportamento quanto a deformações elásticas.

Finalizando, o emprego de escória de aciaria elétrica em camadas granulares permitirá a construção de pavimentos de melhor qualidade técnica e contribuirá de forma expressiva na redução de problemas ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM (1992) *ASTM D 2940* – Standard specification for graded aggregate material for bases or subbases for highways or airports. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM (1995) *ASTM D 4792* – Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- BARKSDALE, R. D. e S. Y. ITANI (1989) Influence of aggregate shape on base behaviour. *Transportation Research Record*, Washington, D.C., n 1227, p. 173-182.
- CERATTI, J. A. P. (2000) *Disciplina de Mecânica dos Pavimentos*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- CHESNER, W.H.; STEIN, C.W.; COLLINS, R.J. e L. VAN HELDEN (2001) Waste and Recycled Materials in the Transportation Industry. *NCHRP 4-21 – Information Database, version 1.0.8*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Em CD-ROM.
- COOMARASAMY, A. e T. L. WALZAK (1995) Effects of moisture on surface chemistry of steel slags and steel slag-asphalt paving mixes. *Transportation Research Record*, Washington, D.C., n. 1492, p.85-95.
- DNER (1994) *DNER-ES-P 010/94* - Base estabilizada granulometricamente. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- GEYER, R. M. (2000) *Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto*. 173p. Tese de Doutorado em Engenharia (Construção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- IBS (1998) Escórias Siderúrgicas – Novas Tendências. *Anais da IX Reunião de Pavimentação Urbana*, ABPv, Vitória.
- IBS (2001) *Anuário Estatístico da Indústria Siderúrgica Brasileira*. Instituto Brasileiro de Siderurgia, Rio de Janeiro.
- 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.
- LAPAV (2001) *Comunicação interna*. Laboratório de Pavimentação, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- LEKARP, F.; ISACSSON, U. e A. DAWSON (2000) State of the Art – I: Resilient Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, New York, v.126, n.1, p.66-75.
- LIMA, N. P.; NASCIMENTO, J. F.; FILHO, V. P. V. e C. A. V. ALBERNAZ (2000) Pavimentos de alto desempenho estrutural executados com escória de aciaria. *Anais da X Reunião de Pavimentação Urbana*, ABPv, Uberlândia.
- LÚCIO, A (1981) Físico-química metalúrgica – 2ª parte. Belo Horizonte, p.555-599.
- MACHADO, A. T. (2000) *Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria*. São Paulo. 153p. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MARMITT, H. M. (2002) *Efeito das características de compactação no módulo resiliente de britas graduadas*. Dissertação a ser defendida para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SHERWOOD, P. T. (1995) *Alternative materials in road construction*. London: Thomas Telford, 124p.
- SILVA, E. A. (1994) Uso de escória de aciaria em pavimentação viária. *Anais da XXVIII Reunião Anual de Pavimentação*, ABPv, Rio de Janeiro, p.261-283.

CONTATOS

¹ Luciana Rohde

E-mail: lurohde@ppgec.ufrgs.br

² Washington Peres Núñez

E-mail: wpnunez@ppgec.ufrgs.br

³ Jorge Augusto Pereira Ceratti

E-mail: lapav@ppgec.ufrgs.br