

Utilização de Escória de Dessulfuração (KR) em Camadas de Base e Sub-Base de Pavimentos.

Raphael de Martin Gonçalves

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil; raphaelmgoncalves@yahoo.com.br

Sidineidy Izoton

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil; sidineidy.izoton@hotmail.com

Patrício José Moreira Pires

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil; patricio.pires@gmail.com.

RESUMO: O objetivo deste trabalho é apresentar como alternativa de uso em camadas de base pavimentos o co-produto gerado no processo de dessulfuração do ferro gusa denominado Escória KR. A proposta é realizar misturas desta escória com dois tipos de solos (A e B) que não apresentam Índice de Suporte Califórnia mínimo exigido para esta camada. A proporção de escória adotada nas misturas é de 20% em relação a massa seca de solo. Assim foram realizados ensaios para determinação do Índice de Suporte Califórnia dos solos e das misturas, ensaios para determinação da resistência mecânica (compressão axial) e do potencial expansivo desta escória (*Steam Test*®). Analisando os resultados obtidos observa-se que a escória KR contribui para o aumento da capacidade de suporte dos solos, aumentando o valor do ISC em 172,8% para o solo A e em 112,5% para o solo B, para aumento da resistência mecânica, aumentando os valores de resistência a compressão em 2289,1% para o solo A e em 301,9% para o solo B. Os testes de expansibilidade apresentaram valores fora do limite para a utilização em camadas de base, quando analisados valores máximos de expansão, tendo a escória KR uma expansão máxima de 7,13% acima dos permitidos, 3% e 5%, estabelecidos respectivamente pelas normas NBR 16364/2015 e BS EN 13242/13. No entanto devido ao *Steam Test*® ser um ensaio que leva a valores de expansão maiores do que os obtidos na metodologia exigida pela norma brasileira NBR 16364/15, conclui-se que a escória KR pode ser utilizada para bases de pavimentos desde que seja dada uma atenção especial e controlada sua expansão.

PALAVRAS-CHAVE: pavimentação, escória KR, base de pavimentos, *Steam Test*®.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de resíduos industriais como material de estabilização de solos, para camadas de base pavimentos, vem sendo motivo de pesquisas devido ao potencial de reaproveitamento dos resíduos industriais nestes tipos de obras.

Neste contexto as escórias geradas no processo de fabricação do aço, escórias de aciaria, e no processo de fabricação do gusa, escória de alto-forno apresentam grande

potencial de utilização como material estabilizante.

No estado do Espírito Santo a ArcelorMittal Tubarão é uma grande empresa produtora de bobinas de aço gerando grande quantidade de resíduo oriundo do processo produtivo. Devido ao potencial de utilização desse resíduo, consolidadas pesquisas e, pelo potencial valor agregado, as empresas produtoras passaram a chamá-los de co-produtos ao contrário do termo escória utilizado no passado. Um desses co-produtos é gerado durante a produção do ferro

gusa no processo de dessulfuração em Reator Kambara e denominado de Escória KR.

Calve (2012) apresentou pesquisa onde realizou ensaios para determinação do ISC de misturas de argila e escória KR, com teores de mistura de 60% a 80% de escória em relação a massa seca da mistura solo e escória. Neste trabalho a mistura de 80% de escória KR com 20% de argila apresentou ISC maior que 80% e expansão menor do que 3%, mínimos exigido por NBR 16364/2015.

Neste trabalho serão também avaliadas misturas porém em diferentes proporções de escória e solo, com vista a aplicação desta em obras de pavimentação.

Serão determinadas as capacidades de suporte (ISC) das misturas e comparadas com as capacidades das amostras padrão de solos coletados no estado do Espírito Santo.

O potencial expansivo da escória será através do ensaio *Steam Test*®, desenvolvido especificamente para determinar o potencial expansivo de escórias. Este ensaio consiste em percolação de vapor de água pela amostra durante uma semana. Este vapor então promove a hidratação dos constituintes da escória que conduzem ao processo expansivo da mesma.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estabilização de solos

Estabilizar um solo é dotá-lo das condições necessárias para resistir as ações climáticas, esforços e desgates produzidos pelo tráfego (FRANÇA, 2003)

O processo de estabilização pode ser de dois tipos principais: mecânica e química. No processo mecânico altera-se apenas o arranjo ou a granulometria das partículas do solo, como nos processos de compactação e correção granulométrica. No processo de estabilização química, são utilizados aditivos que alteram as propriedades dos solos possibilitando seu uso em construções e projetos. (GONDIM, 2008 apud ARAÚJO, 2009)

2.2 Uso de escórias em obras de pavimentação

O uso de escória para obras de pavimentação no Brasil não é recente, embora ainda seja pequeno. Este material compete com os materiais já tradicionalmente utilizados, areia e brita, tendo como vantagens a elevada resistência, durabilidade e dureza. A desvantagem relacionada à escória é o alto potencial expansivo gerado no processo de hidratação. (ROHDE, 2002)

Como característica importante para construção de estradas, as escórias apresentam comportamento de ligantes hidráulicos, favorecendo o processo de estabilização de um solo. Esta característica está diretamente ligada ao óxido de cálcio e ao óxido de magnésio presentes na sua composição química. Estes dois compostos reagem com a água e o gás carbônico formando um hidrato na superfície da escória cimentando e ligando os grãos do solo conferindo a estrutura um comportamento rígido. (SANT'ANA, 2003; LIMA *et al*, 2000 apud ROHDE, 2002)

Gimenes *et al* (2008) apresentou estudo de base e sub-base estabilizada com teores de escória de aciaria de 30% na sub-base e 75% na base da rodovia ES-446 entre o município de Colatina e Itambé. A incorporação de escória aumentou a capacidade de suporte, tanto na base quanto na sub-base, passando do ISC 14% para argila para o ISC 120% na base estabilizada com a escória. No entanto houve aparecimento de trincas devido ao processo expansivo das escórias.

Resende (2010) apresenta resultados de ensaios realizados em trechos da MG-232, entre Santana do Paraíso e Mesquita que utilizaram a escória de aciaria LD pura e com adição de argila além de cascalho para camadas de base de pavimentos. No estudo o autor dividiu o trecho em sete partes, cada uma com um tipo de base executada em material diferente. Os resultados dos ensaios mostram que o comportamento das bases executadas com a escória são superiores aos executados em cascalho tanto para parâmetros físicos, como o IP e expansibilidade, quanto para parâmetros de resistência, como ISC e resistência à tração.

Calve (2012) em estudo utilizou amostras de escória KR em misturas com 60% e 80% em relação à massa de argila na mistura. A pesquisa mostrou que a capacidade de suporte, medida pelo ISC, das amostras passou de 9,8% para a argila para 71% na amostra com 80% e para 65% na amostra com 60% de escória KR.

2.3 Escória KR

A escória KR recebe este nome pois é gerada durante a dessulfuração do ferro gusa por um processo no interior de um reator denominado Kambara Reactor. Este processo é anterior ao refino no convertedor da aciaria sendo assim essa escória é gerada numa etapa intermediária do processo de produção do aço.

Os agentes dessulfurantes utilizados neste processo retiram o enxofre produzido na obtenção do ferro gusa transformando-o em sulfeto de cálcio (CaS) que pela diferença de densidade se concentram na parte superior do reator e são retirados por um separador. (CALVE, 2012).

O processo de dessulfuração embora tenha sido desenvolvido na década de 60, estava em desuso, pois o refratário do rotor, responsável pela mistura dos agentes dessulfurantes no ferro gusa, apresentava limitações, inviabilizando o processo no Kambara Reactor. Este processo voltou a ser utilizado no final da década de 90 devido aos avanços tecnológicos. (MANSUR, 2010 *apud* LEMOS, 2011).

2.4 O ensaio a vapor Steam Test®

O ensaio a vapor Steam Test® surgiu da necessidade de se avaliar com maior precisão a expansão de amostras de escória, visto que, os ensaios de imersão utilizados não representavam o comportamento real destas em contato constante com a umidade (MOTZ; GEISELER, 2001 *apud* RODRIGUES, 2007)

A amostra preparada deve ser compactada em molde cilíndrico e colocada sobre recipiente com água aquecida a 100° C. O vapor gerado pelo calor percola pela amostra promovendo a hidratação do CaO e do MgO presentes nas escórias. (MOTZ; GEISELER, 2001 *apud*

RODRIGUES, 2007)

Este ensaio está normatizado pela norma europeia prEN 1744-1 – Testes para propriedades químicas de agregados – análises químicas. O tempo de ensaio pode variar de no mínimo 24h até 168h, dependendo do teor de MgO presente na amostra.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho está dividida em dois grupos principais. O primeiro diz respeito a determinação da capacidade de suporte das misturas realizadas através de ensaios CBR.

A segunda parte é composta pela determinação da resistência mecânica das misturas através de ensaios de compressão axial.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados foram todos coletados próximos à região da Grande Vitória para facilidade de transporte até o laboratório.

3.1.1 Solos

Os solos utilizados nesta pesquisa são de dois tipos: o primeiro, trata-se de um solo residual, com característica mais arenosa e coloração mais avermelhada e foi nomeado SOLO A.

O segundo também está classificado como areia, cuja origem é também residual mais intemperizada, cuja quantidade de material passante na peneira 200 é superior ao Solo A. Esta amostra foi nomeada de SOLO B

A granulometria e propriedades dos dois tipos de solo são apresentados nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Granulometria das Amostras de Solo

Solo	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)
A	6,2	18,4	59,5	15,9
B	32,5	10,0	39,12	18,37

Tabela 2 – Propriedades e Classificação dos Solos

Solo	LL (%)	LP (%)	Gs (g/cm³)	Cu	Cc	SUC
A	NL	NP	2,74	141,8	2,82	SW
B	51	28	2,67	-	-	SC

3.1.2 Escória KR

A escória utilizada nesta pesquisa foi cedida pela empresa ArcelorMittal Tubarão e é do tipo KR com granulometria na faixa de 0 até 9 mm.

Conforme análise química realizada e disponibilizado pela ArcelorMittal a escória está classificada como um resíduo não-inerte classe II-A.

Os componentes químicos e suas quantidades estão descritos na tabela 3.

Tabela 3 - Componentes Químicos da Escória KR

Principais componentes químicos da escória (%)				
Escória	CaO	MgO	FeT	SiO ₂
KR	45,5	5,65	14,1	14,6

Na tabela 2 pode-se perceber grandes quantidades de óxidos de cálcio. Altas quantidades deste elemento químico tornam a escória mais reativa quando em contato com água potencializando sua propriedade de ligante hidráulico.

3.2 Misturas

A dosagem das misturas foi feita de acordo com pesquisas encontradas na bibliografia e procurando utilizar uma quantidade mínima de escória possível que promovesse a estabilização dos solos.

Assim adotou-se a mistura de 20% de escória em relação a massa seca de solo.

Pesquisas podem ser encontradas com teores de escória maiores do que o utilizado neste trabalho, porém o objetivo deste não é utilizar a escória como principal material da mistura e sim como uma adição ao solo para melhorar suas propriedades mecânicas e de resistência.

3.3 Metodologia

Os ensaios empregados nesta pesquisa conduzem para a avaliação do potencial de utilização da escória KR em obras de pavimentação. Sendo assim os ensaios clássicos de CBR e compactação são necessários para que se possa obter a capacidade de suporte dos solos

e das misturas.

Outros ensaios também são propostos para que se determine a resistência a compressão das amostras preparadas. Assim são realizados ensaios de compressão axial nas amostras e nas misturas de solo e escória.

Para avaliar o potencial de expansão da amostra de escória foi realizado o ensaio denominado de *Steam test*®, desenvolvido especificamente para este tipo de material.

3.3.1 Preparação das amostras

A preparação das amostras seguiu conforme a norma NBR 6457/86 com o peneiramento dos solos na peneira P#4 para e posterior secagem até a umidade higroscópica.

A fração retida após o peneiramento foi desprezada, pois representava menos de 7% da massa total de solo.

A preparação da amostra de escória seguiu o mesmo procedimento de peneiramento e secagem.

Para o *Steam test*® a amostra foi preparada e secada em estufa até remoção por completo da água presente na amostra.

3.4 Cura dos materiais

Devido a característica de ligante hidráulico descrito das escórias as misturas foram submetidas ao processo de cura, em câmara úmida, para realização dos ensaios de compressão axial por 28 dias.

Isto se deve ao fato de que para hidratação da escória é necessário o contato constante com água além do que assim evitou-se a perda de umidade das amostras.

Nos ensaios de ISC as amostras não foram submetidas a nenhum processo de cura visto que o procedimento de ensaio requer imersão completa das amostras para sua saturação. Mesmo assim vale dizer que o procedimento de ensaio pede que as amostras fiquem submersas por 96 horas o que potencializa as reações de hidratação da escória.

4 RESULTADOS

4.1 Ensaios de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados de acordo com a norma NBR 7182/86.

Os resultados dos ensaios de compactação podem ser observados pelos gráficos apresentados nas Figuras 1 e 2 que mostram o comportamento das amostras preparadas somente com o solo puro e com a mistura de solo e escória.

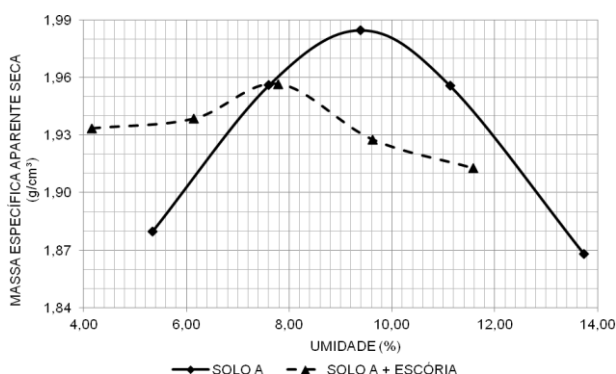


Figura 1 - Curva de Compactação das Amostras de Solo A e Solo A + Escória

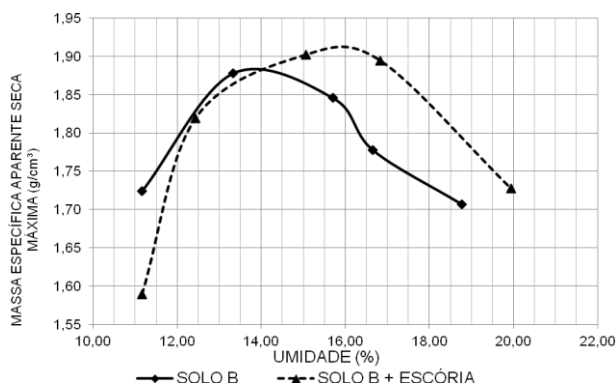


Figura 2 - Curva de Compactação das Amostras de Solo B e Solo B + Escória

As respectivas umidades ótimas e densidades seca máxima estão mostradas na tabela 4

Tabela 4 - Resultados dos Ensaios de Compactação dos Solos e das Misturas

Amostra	ρ (g/cm³)	Umidade ótima (%)
Solo A	1,98	9,4
Solo A + escória	1,96	7,7
Solo B	1,88	13,8
Solo B + escória	1,91	16,0

4.2 Ensaios ISC

Os ensaios ISC visam determinar a capacidade de suporte que a amostra tem quando submetida a penetração de um pistão.

Os ensaios ISC foram realizados de acordo com a norma NBR 9895/87.

Também são determinados valores de expansão das amostras quando imersas em água por período de 96 horas.

Os resultados são apresentados na tabela 5, com os valores de ISC na umidade ótima e valores máximos com o valor de umidade correspondente.

Tabela 5 - Resultados dos Ensaios ISC nas Amostras e nas Misturas

Amostra	Umidade ótima	ISC máximo	
	ISC / EXP (%)	ISC / EXP (%)	UISCM*
Solo A	56,0 / 0,30	56,1 / 0,31	9,25
Solo A + escória	152,8 / 0,11	162,5 / 0,07	8,80
Solo B	40,0 / 0,03	42,5 / 0,03	13,30
Solo B + escória	85,0 / 0,02	195,0 / 0,08	12,70

*UISCM = Umidade do ISC máximo

4.3 Ensaio de compressão axial

Os ensaios de compressão axial foram realizados de acordo com a norma DNIT-ME 201/94 sem a imersão que precede o rompimento na prensa.

A etapa de imersão, anterior à ruptura das amostras não foi realizada por experiências em ensaios anteriores mostrarem que o período de imersão provocou a desintegração das amostras e consequentemente a perda do corpo de prova.

A Figura 3 ilustra o procedimento adotado para realização do ensaio de compressão axial.

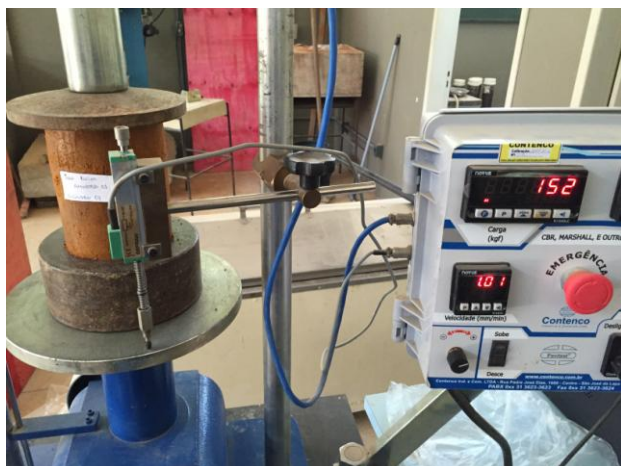


Figura 3 - Ensaio de Compressão axial

Os resultados dos ensaios de compressão axial estão indicados na tabela 6.

Amostra	Resistencia a compressão axial (kPa)			
	CP 01	CP 02	CP 03	Média
Solo A	83,51	86,08	97,15	88,91
Solo A + escória	2113,80	1757,66	2501,08	2124,18
Solo B	198,28	392,06	1505,90	698,75
Solo B + escória	2966,44	2599,73	2859,23	2808,46

4.4 Determinação do potencial expansivo pelo método do *Steam test*®

A determinação do potencial expansivo da escória foi feita com base no procedimento descrito em norma BS EN 1744-1.

Ressalta-se que a granulometria das amostras não foi a mesma, uma vez que nas misturas compactadas utilizou-se apenas a fração da escória que passa na peneira P#4 (abertura de malha de 4,75mm).

Sendo assim as amostras foram preparadas com somente a fração da escória que passa nessa peneira.

Os resultados do ensaio de expansão são mostrados no gráfico da Figura 4 e em resumo na Tabela 7.

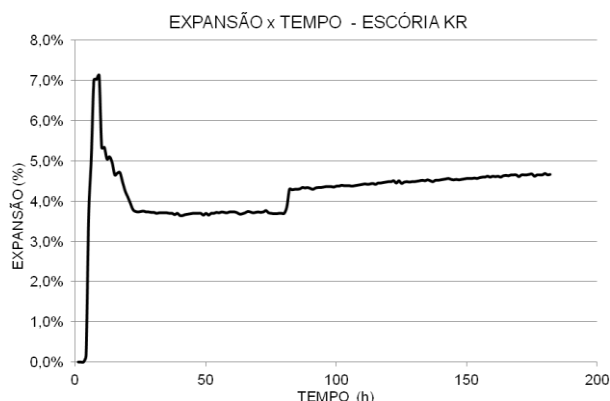


Figura 4 - Resultado do ensaio *Steam Test*® para a escória KR

Tabela 7 - Resumo do Ensaio *Steam Test*®

Amostra	Exp. Max (%)	Exp final (%)	Limites exigidos	
			NBR	BS EN
Escória KR	7,89	4,66	16364/15 < 3%	13242/13 < 5%

5 DISCUSSÕES

5.1 Resultados dos ensaios de ISC

Os resultados indicam que a utilização da escória do tipo KR aumenta a capacidade de suporte do solo medido através do Ensaio ISC.

O aumento foi de 172,8%, para o solo A, e de 112,5%, para o solo B, quando observados os resultados na umidade ótima e de 189,7%, para o solo A, e de 358,8%, para o solo B, quando observados os resultados máximos obtidos no ensaio ISC.

Esse fato pode ser explicado pela escória ter características ligante hidráulico promovendo a cimentação das partículas do solo aumentando a capacidade de suporte para as amostras.

5.2 Resultados dos ensaios de compressão axial.

Quando analisados os resultados dos ensaios de compressão axial verifica-se que a adição de escória promove também um acréscimo no valor da resistência à compressão.

Para a amostra de solo A o aumento foi de 2289,1% quando comparados os valores para a amostra de solo A puro e de solo A + escória.

Para a amostra de solo B o aumento foi de

301,9% quando comparadas as amostras de solo B puro e solo B + escória.

Novamente tal fato pode ser explicado pela característica de ligante hidráulico que é presente na escória.

Essa característica aumenta a resistência do solo promovendo maior capacidade de resistir as cargas aplicadas.

5.4 Resultados do ensaio *Steam Test*®

Uma grande adversidade encontrada nos resultados dos ensaios foi o potencial expansivo da escória KR.

Pelos resultados encontrados a escória teve expansão máxima de 7,89%, acima do limite permitido tanto pela norma européia BS EN 13242/13 quanto pela NBR 16364/15.

Porém quando analisados os resultados ao final do ensaio nota-se que a escória continua tendo a expansão acima do permitido pela norma NBR 16364/15 porém abaixo do valor adotado pela norma BS EN 13242/13.

No entanto resultados de ensaios realizados pelo método PTM 130, disponibilizados pela empresa KAEME/ARCELOR, indicam que o potencial expansivo da escória KR é menor que o máximo permitido pela NBR 16364/2015.

Os resultados dos ensaios PTM para a escória KR estão mostrados na Figura 5 e na Tabela 8.

Observa-se que o ensaio *Steam Test*® expõe a amostra a condições muito mais agressivas do que os ensaios PTM utilizado pela NBR 16364/15. Isso porque a circulação de vapor de água é mantida constante durante intervalo de 1 semana, ao passo que no PTM 130 a condição de saturação na estufa tem que ser estabelecida pelo menos duas horas antes da medição.

Essa circulação de vapor constante promove a hidratação de longa prazo do MgO presente na amostra de escória aumentando o potencial expansivo da escória.

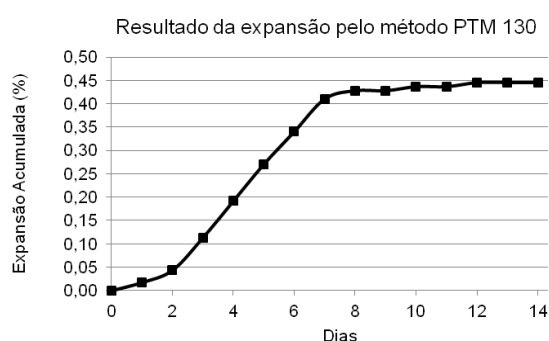


Figura 5 - Resultados do Ensaio PTM 130 para a Escória KR.

Tabela 8 - Resumo do Ensaio PTM 130 para a Amostra de Escória KR

Amostra	Expansão diária máx. (%)	Expansão acumulada (%)
Escória KR	0,08	0,45

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16364/15 – *Execução de Base e Sub-base estabilizadas granulométricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária: Procedimento*. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. NBR 6457/86 – *Amostras de Solo: Preparação para Ensaios de Compactação e Caracterização*. Rio de Janeiro, 1986.
- _____. NBR 7182/86 – *Ensaio de Compactação*. Rio de Janeiro, 1981.
- _____. NBR 9895/87 – *Solo: Índice de Suporte Califórnia*. Rio de Janeiro, 1987.
- BRITISH STANDARD. BS EN 13242 – *Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering and road construction*. 2002
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 201/94 – *Solo-Cimento: Compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos*. São Paulo, 1994.
- Araujo (2009). *Avaliação de Misturas de Solos Estabilizados com Cal, em Pó e em Pasta, para Aplicação em Rodovias do Estado do Ceará*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia do Transportes, Universidade Federal do Ceará, 175 p.
- Calve (2012). *Análise da viabilidade da utilização de misturas de escórias de aciaria para aplicação em pavimentação rodoviária*; Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Metalurgia e Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo, 83 p.
- França (2003). *Estabilização Química de Solos para Fins Rodoviários: Estudo de Caso com o Produto “RBI Grade 81”*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, 104 p.
- Gimenes et al (2008). *Aplicação de Escória de Aciaria em Sub-Base e Base da ES-446*. 39º RPAV/13º ENACOR. Recife, PE. 11 p.
- Lemos (2011) Aumento da Eficiência de Dessulfuração do Gusa Líquido em Um Reator Kanbara. *Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração*. ABM, São Paulo, SP, v. 8, p. 31-36.
- Resende (2010). *Utilização da escória de aciaria pura e com adição de argila como camada de base em pavimentação rodoviária*. Dissertação de Mestrado. Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, 210 p.
- Rodrigues (2007). *Caracterização e avaliação da expansibilidade de escórias de aciaria LD não tratadas e tratadas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, 147 p.
- Rohde (2002). *Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – estudo labora*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 118 p.
- Sant’ana (2003). *Caracterização tecnológica de misturas de solo-escória de alto-forno granulada moída para fins rodoviários*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 88 p.
- Velten et al (2006). Caracterização mecânica de misturas solo-escória de altoforno granulada moída para aplicações em estradas florestais. *Revista Árvore*, SIF, Viçosa, MG, Vol. 30, p. 235-240.