

Estudo do Agregado Siderúrgico para Uso em Drenagem Profunda

Silvana Fava Marchezini
IFMT/UnB, Brasília-DF, Brasil, smarchezini@gmail.com

Taowami Barbosa da Gama
UnB, Brasília-DF, Brasil, taow.gama@gmail.com

Tiago Henrique de Oliveira Rosa
UnB, Brasília -DF, Brasil, tiagohenri86@gmail.com

José Maycon de Araújo Estanislau
UnB, Brasília -DF, Brasil, jmaraujoe@yahoo.com.br

Maria Helena Gomes Pereira Fonseca
Usiminas, Belo Horizonte, Brasil, maria.fonseca@usiminas.com

Henrique Helcio Eleto Santos
Usiminas, Belo Horizonte, Brasil, henrique.santos@usiminas.com.br

Sandro de Oliveira Almada
Arcelor Mittal, Vitória, Brasil, sandro.almada@arcelormittal.com.br

Marina Reno Barbosa
Gerdau, Belo Horizonte, Brasil, marina.barbosa@gerdau.com.br

Luís Fernando Martins Ribeiro
UnB, Brasília -DF, Brasil, lmartins@unb.br

André Luís Brasil Cavalcante
UnB, Brasília -DF, Brasil, abrasil@unb.br

RESUMO: A preocupação da sociedade com os problemas em relação a disposição de resíduos no meio ambiente tem-se intensificado. A geração de resíduos é uma das principais causas de degradação ambiental. Uma das alternativas para mitigar esse problema é a reutilização dos resíduos. A escória resultante do processo siderúrgico vem sendo amplamente estudada e utilizada como material de construção civil. Ao se produzir aço a partir do ferro gusa e da sucata de ferro em alto fornos ou em fornos conversores a oxigênio formam-se as escórias AF e LD, respectivamente. Este subproduto tem sido utilizado em um número crescente de aplicações. Com o intuito de propor nova alternativa para a reutilização desse material, este trabalho apresenta os resultados dos ensaios de granulometria realizados em amostras de escórias, agregado siderúrgico, para potencializar seu uso como material drenante. Foi realizado o ensaio de granulometria por peneiramento em cada amostra e sua análise nos critérios de material granular de Terzaghi. Definiu-se faixas granulométricas que atendessem os critérios de coeficiente de não uniformidade e curvatura para fins de drenagem. Com a composição granulométrica, concluiu-se que, o material resultante do processo de produção de aço, escórias siderúrgicas, apresenta características granulométricas drenantes, com impacto na redução de grandes volumes de escória sem reutilização.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaios de Granulometria, Agregado Siderúrgico, Drenos Profundos, Colchão Drenante.

1 INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica brasileira é responsável pela geração de elevada quantidade de resíduos sólidos, como as escórias provenientes da produção do aço, a partir do ferro gusa e da sucata de ferro em fornos elétricos. Embora haja reaproveitamento do material, como agregado para a pavimentação em misturas asfálticas, para construção do leito de estrada de ferro, como base e sub-base para pavimento rodoviário, dentre outros, seu reuso ainda é insuficiente para consumir a grande quantidade de resíduo produzido. Neste contexto, grande parte desse material não possui destinação final.

Além do uso já citado do resíduo siderúrgico, há registros desse material na redução da drenagem ácida de rochas, proveniente da extração de metais pesados, (Almeida et al. 2015); como corretivo da acidez do solo para agricultura (Correa, 2006). Estudos do seu uso na construção da camada de coleta de chorume e remoção de resíduos sólidos urbanos de aterro sanitário, (Almeida et al. 2014). Este trabalho, objetiva definir faixa granulométrica para uso desse resíduo como material drenante. É parte de um estudo mais amplo que verificará a possibilidade das escórias serem aplicadas como material drenante e filtrante, em drenos profundos e colchões drenantes em obras rodoviárias.

Segundo DNIT (2006), a drenagem de uma rodovia destina-se a protegê-la das águas que de algum modo interfiram ou a prejudiquem. Realiza-se a drenagem pela captação, condução e deságue em lugar seguro das águas que existem nos subleitos sob a forma de lençóis freáticos e artesianos e as que penetram por infiltração, através do revestimento.

Como material drenante em obras rodoviárias, até o momento, não há registros a nível mundial. O trabalho proporcionará condições de análise para uso como agregado ao fim proposto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Agregado Siderúrgico

A obtenção do aço ocorre por diferentes processos produtivos. No Brasil, os mais utilizados pelas siderúrgicas, são os de fornos conversores a oxigênio, denominados LD (Linz –Donawitz) ou BOF (*Basic Oxynen Furnace*) e o do forno de arco elétrico, denominado EAF (*Electric Arc Furnace*).

As escórias são resíduos gerados no processo de redução de minérios para a obtenção do ferro gusa, como também na etapa subsequente da produção do aço. Neste processo, as escórias chamadas de alto-forno, obtidas pela fabricação do ferro gusa, são obtidas diretamente do alto-forno, com elevado teor de carbono e várias impurezas. As escórias de aciaria são obtidas nos conversores a oxigênio e fornos elétricos, durante a conversão do ferro gusa líquido e sucata em aço. O tipo das escórias de aciaria diferem de acordo com o refino utilizado, que pode ser refino oxidante e refino redutor. As escórias provenientes do refino oxidante são as escórias geradas em forno elétrico a arco ou fusão e, a escória de aciaria são resultantes do conversor a oxigênio, denominados LD/BOF. Detalhes dos processos produtivos do aço estão descritos em Silva (2010), Sousa (2007), Barbosa (2013) dentre outros.

A textura superficial, a granulometria e a densidade, características físicas dos grãos, variam conforme o processo de resfriamento, (Rohde 2002; Castelo Branco 2004; Oliveira 2006).

A Figura 1 apresenta dois tipos de escórias.

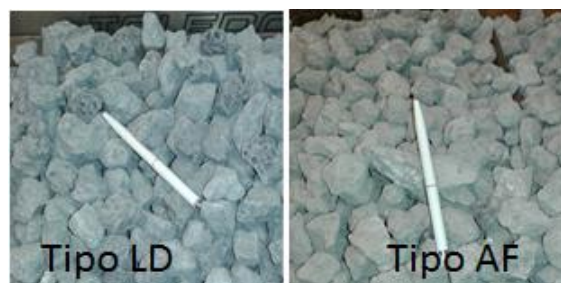


Figura 1: Escória Tipo LD forno Conversor a Oxigênio LD e Escória de Alto Forno Tipo AF – Arquivo pessoal

Após o processo de resfriamento já em forma cristalina, a escória de aciaria é transportada para uma planta de beneficiamento, onde basicamente ocorre a britagem, separação magnética, classificação

granulométrica e em alguns casos cura com umidificação e aeração.

2.1.1 Uso das Escórias na Construção

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da Norma Brasileira de Referência (NBR 5019/82), diz que as escórias de aciaria, tanto de alto forno como as elétricas depois de beneficiadas se tornam agregados siderúrgicos.

Diversas pesquisas foram desenvolvidas nas décadas de 70, 80 e 90 com o objetivo principal de analisar o emprego das escórias de aciaria LD em estradas e pavimentação. A maior parte das escórias de aciaria é aplicada na forma de agregados, na estabilização de solos, em lastros de ferrovias, contenções executadas com gabiões e enrocamentos, construção de bases, sub-bases e revestimento asfáltico de rodovias, bem como materiais para aterros e obras hidráulicas. Como pode ser constatado em Silva (2010) e Freitas (2007).

Países como o Japão, Canadá, Austrália e alguns países da Europa já exibem consideráveis índices de aproveitamento das escórias de aciaria em obras de engenharia, principalmente na área de pavimentação (Motz & Geiseler, 2001). No Brasil, as escórias de aciaria 62% foram utilizadas para bases de estradas, 5% na produção do cimento e 1% para lastro rodoviário, (IAB, 2014).

2.2 Drenagem Subterrânea

A drenagem subterrânea ou profunda objetiva interceptar as águas que possam atingir o subleito, rebaixar o lençol freático, manter umidade de equilíbrio compatível com as condições de tráfego e desempenho estrutural e a estabilidade de taludes. Para alcançar o objetivo da drenagem profunda diversos dispositivos são utilizados, tais como dreno horizontal profundo e colchão drenante.

Os drenos profundos têm por objetivo principal interceptar o fluxo da água subterrânea através do rebaixamento do lençol freático, impedindo-o de atingir o subleito. O colchão drenante horizontal, objetiva remover as águas

subterrâneas de gravidade e das fontes artesianas.

Os dispositivos são constituídos por materiais drenantes e filtrantes. Os materiais filtrantes são constituídos por areia, agregados britados e geotêxtil. Os materiais drenantes por materiais de granulometria mais grosseira como britas e cascalho grosso lavado.

No caso dos drenos profundos, a vala pode ser preenchida por material filtrante ou drenante. O material filtrante tem a função de permitir o escoamento da água sem carrear finos e evitar a colmatção do dreno. Por outro lado, a função do material drenante é a de captar e ao mesmo tempo conduzir as águas a serem drenadas, devendo apresentar uma granulometria adequada à vazão escoada.

Segundo DNIT (2006), há casos de drenos onde se utilizam tubos, e pode-se utilizar somente o material drenante, com a finalidade de aumentar o raio hidráulico na interface solo-envelope, direcionando o fluxo da água do solo para o tubo, com a função de captação ou de envoltório, pois a medida que se aumenta o raio hidráulico do dreno, reduz-se a possibilidade de arraste de finos do solo, reduzindo a colmatção.

As granulometrias dos materiais drenantes e filtrantes, e outras considerações, são obtidas pelo processo de Terzaghi, pelas determinações do Bureau of Reclamation e Soil Conservation Service, e no caso de geotêxteis pelo método do Comité Francês de Geotêxteis e Geomembranas. Na Tabela 1 estão apresentadas as considerações de Terzaghi para os critérios de permeabilidade, de não entupimento do material filtrante e de não entupimento do tubo e de não uniformidade do material granular.

Na Tabela 1, d_x refere-se ao diâmetro em milímetros abaixo do qual se situam $x\%$ em peso das partículas, d_e refere-se ao diâmetro das ranhuras ou fendas dos tubos. Além disso, o coeficiente de não uniformidade é dado por:

$$C_u = \frac{d_{60\text{Filtrante}}}{d_{10\text{Filtrante}}} \quad (1)$$

O valor de C_u maior que 2, minimiza os problemas de segregação.

Segundo Suzuki et al. (2013), a análise granulométrica é um importante processo para se avaliar as características físicas do material.

Tabela 1 Critérios de Material Granular - Terzaghi	
Critérios Terzaghi	Condição
Permeabilidade	$d_{15_{Filtrante}} \geq 5d_{15_{Solo}}$
Não entupimento do material Filtrante	$d_{15_{Filtrante}} \leq 5d_{85_{Solo}}$
	$d_{15_{Filtrante}} \leq 40d_{15_{Solo}}$
	$d_{50_{Filtrante}} \leq 25d_{50_{Solo}}$
Não Entupimento do Tubo	$d_{85_{Filtrante}} \geq d_e$
Não Uniformidade do Material Granular	$2 \leq C_u \leq 20$

O coeficiente de curvatura (C_c) é outro parâmetro comumente avaliado. Para materiais permeáveis o coeficiente de curvatura situa-se entre:

$$0,63 < C_c < 1,64 \quad (2)$$

onde,

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (3)$$

3 MATERIAIS E MÉTODO

As amostras foram fornecidas pelo Instituto Aço Brasil, em granulometrias com tamanhos de 12 mm x 25 mm; 19 mm x 32 mm e 32 mm x 75 mm, provenientes de dois processos diferentes, AF e LD.

Na Figura 2 apresenta-se a imagem da amostra de escórias de aciaria tipo LD (conversor a LD), de 19 mm x 32 mm e na Figura 3, a da amostra AF (alto forno), de 19 mm x 32 mm.

Inicialmente realizou-se o ensaio de granulometria por peneiramento, com as sete amostras, identificadas como A1, A2, A3, B1 e B2, tipo LD e B3 e B4, tipo AF, descritas na Tabela 2.

Em seguida, a partir dos critérios de Terzaghi, procedeu-se a identificação dos materiais adequados para uso em drenagem.

Em uma outra etapa, com intuito de obter uma gama maior de alternativas, procedeu-se através de uma combinação linear entre as diferentes curvas granulométricas obtidas para as diferentes amostras, uma bateria de simulações com a finalidade de se definir faixas granulométricas que atendessem aos critérios estabelecidos para os parâmetros C_u e C_c .



Figura 2: LD - A2 (19 mm x 32 mm)



Figura 3: AF – B3 (19 mm x 32 mm)

Tabela 2 Amostras originais		
Amostra	Tamanho (mm)	Tipo
A1	12 x 25	LD
A2	19 x 32	LD
A3	32 x 75	LD
B1	19 x 32	LD
B2	32 x 75	LD
B3	19 x 32	AF
B4	32 x 75	AF

A combinação linear entre as diferentes curvas granulométricas foi realizada com base

nas Equações 4 e 5, dadas por:

$$CG_{comb} = \sum_{i=1}^3 p_i CG_{Ai} + \sum_{i=1}^4 p_{i+3} CG_{Bi} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^7 p_i = 100\% \quad (5)$$

onde,

CG_{Ai} é a curva granulométrica da amostra A_i ,

CG_{Bi} é a curva granulométrica da amostra B_i ,

p_i é a porcentagem da contribuição da curva granulométrica CG_{Ai} ou CG_{Bi} .

Após definida a faixa granulométrica que atendeu aos critérios estabelecidos para os parâmetros C_u e C_c , procedeu-se a definição da faixa granulométrica do solo de transição.

4 RESULTADO

No gráfico apresentado na Figura 4 observam-se as curvas granulométricas das amostras originais (A1, A2, A3, B1, B2, B3 e B4).

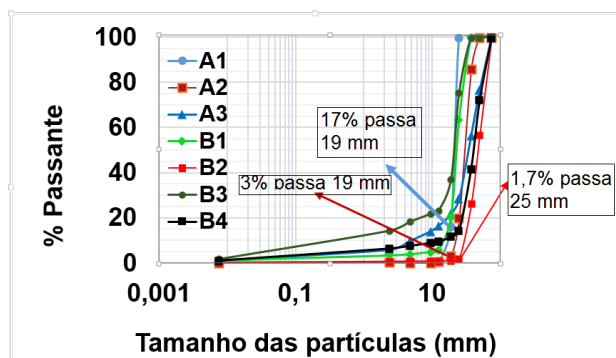


Figura 4: Granulometria das Amostras Originais

Na Tabela 3 apresentam-se os parâmetros C_u e C_c obtidos após a realização do ensaio com as amostras originais fornecidas pelo Instituto Aço Brasil.

Tabela 3. Parâmetro das amostras originais.

Amostra	Tamanho (mm)	Tipo	C_u	C_c
A1	12 x 25	LD	1,34	1,09
A2	19 x 32	LD	1,49	1,14
A3	32 x 75	LD	7,74	3,24
B1	19 x 32	LD	1,70	1,17
B2	32 x 75	LD	1,77	1,00
B3	19 x 32	EAF	17,13	8,28
B4	32 x 75	EAF	3,19	1,62

Com os resultados apresentados na Tabela 3, verifica-se que apenas uma das amostras (B4) atendeu aos critérios estabelecidos para os parâmetros de coeficiente de curvatura e não uniformidade.

Diante dos resultados apresentados na Tabela 3, centenas de combinações lineares com as amostras originais foram realizadas. Os resultados eram escolhidos entre aqueles que apresentavam as possíveis combinações lineares entre as diferentes granulometrias originais, nas quais os parâmetros C_u e C_c fossem atendidos.

Como o propósito desta análise era o de tão somente se obter percentuais passantes em cada peneira que, em seu conjunto atendessem aos critérios dos coeficientes C_u e C_c , não se levou em consideração o tipo de escória, mas apenas os tamanhos de suas partículas. Alguns arranjos foram feitos com escórias do tipo A e tipo B, independente do tipo de forno (LD e AF), uma vez que a classificação dos grãos nas siderúrgicas é realizada por peneira vibratória.

Na Tabela 4 são apresentadas onze das combinações lineares realizadas que atenderam aos critérios estabelecidos nas Equações 1 a 3.

Tabela 4 Faixas obtidas com combinação linear

Faixa	Amostras originais em %						
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4
C1	20	10	70	-	-	-	-
C2	30	10	60	-	-	-	-
C3	10	30	60	-	-	-	-
C4	-	-	-	70	-	30	-
C5	-	-	-	60	10	30	-
C6	-	-	-	-	60	40	-
C7	-	-	-	60	20	20	-
C8	-	-	-	40	60	-	-
C9	-	-	-	-	70	30	-
C10	-	-	-	50	20	30	-
C11	10	40	50	-	-	-	-

Na Tabela 5, são apresentados os parâmetros d_{10} , d_{30} , d_{60} , C_u e C_c obtidos a partir das faixas apresentadas na Tabela 4. Observa-se, que os coeficientes de não uniformidade e de curvatura estão compreendidos entre os limites definidos para fins de drenagem.

Em relação aos critérios de Terzaghi, com a granulometria das faixas obtidas pelas combinações lineares foram definidos os

parâmetros d_{15} , d_{50} e d_{85} para realização da análise do material como filtrante e/ou drenante (Tabela 1). Esses parâmetros encontram-se na Tabela 6.

Tabela 5. Parâmetro das composições simuladas

Faixas	d_{60} (mm)	d_{30} (mm)	d_{10} (mm)	C_u	C_c
C1	33,69	21,95	9,79	3,44	1,46
C2	30,90	21,32	12,54	2,46	1,17
C3	34,25	23,99	12,52	2,73	1,34
C4	23,99	19,69	9,92	2,42	1,63
C5	24,86	20,07	11,11	2,23	1,46
C6	40,50	24,56	12,68	3,19	1,17
C7	27,57	20,83	13,5	2,04	1,16
C8	40,50	26,54	19,45	2,08	0,89
C9	44,40	28,18	16,22	2,73	1,10
C10	27,18	20,55	12,5	2,17	1,24
C11	33,65	24,32	14,53	2,31	1,21

Tabela 6. Parâmetros d_{15} , d_{50} , d_{85} (mm)

Faixas	d_{15}	d_{50}	d_{85}
C1	15,68	28,91	52,25
C2	16,55	25,55	49,20
C3	18,50	30,83	49,34
C4	14,35	22,56	31,81
C5	14,80	23,26	34,51
C6	18,56	34,64	60,61
C7	16,34	24,38	37,42
C8	21,14	35,10	60,62
C9	20,60	38,55	62,67
C10	15,36	24,16	37,42
C11	19,47	30,55	47,45

Com os valores da Tabela 6, obteve-se os diâmetros d_x para o solo, Tabela 7. Na Tabela 7, C= combinação linear.

Observa-se que os diâmetros d_x encontrados para os solos, encontram-se nos intervalos de tamanhos das partículas entre areia fina à areia grossa.

A Figura 5 apresenta a curva granulométrica da combinação linear C1, onde os parâmetros do solo estão representados. Para o material drenante ou filtrante, da faixa C1, para atender os critérios de Terzaghi, o solo tem que estar compreendido nos limites apresentados na Figura 5 e na Tabela 7.

Tabela 7. Valores d_x do solo para critérios Terzaghi

C	Permeabilidade	Não entupimento do material		
	$d_{15_{Solo}} \leq$	$d_{85_{Solo}} \geq$	$d_{15_{Solo}} \geq$	$d_{50_{Solo}} \geq$
1	3,14	3,14	0,39	1,15
2	3,31	3,31	0,41	1,02
3	3,70	3,70	0,46	1,23
4	2,87	2,87	0,36	0,90
5	2,96	2,96	0,37	0,93
6	3,71	3,71	0,46	1,38
7	3,27	3,27	0,41	0,97
8	4,23	4,23	0,53	1,40
9	4,12	4,12	0,51	1,54
10	3,07	3,07	0,38	0,96
11	3,89	3,89	0,48	1,22

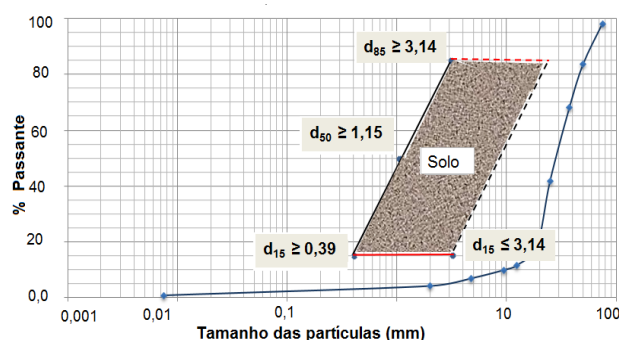


Figura 5: Curva granulométrica da combinação linear C1

Para todas as combinações lineares elaborou-se a curva granulométrica, com a inserção dos parâmetros do solo e, o material obtido comportou-se de forma bem homogênea.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que é possível utilizar o agregado siderúrgico e, obter granulometrias compatíveis com os parâmetros exigidos para os sistemas de drenagem avaliados pelos critérios de Terzaghi. No entanto, para viabilizar o seu uso no estudo proposto neste trabalho, é necessário que ocorra uma readequação por parte das siderúrgicas para o fornecimento da faixa granulométrica que, atenda aos critérios de dimensionamento do material. Por último, conclui-se que o reaproveitamento beneficia o meio ambiente, apresentando mais uma alternativa para o uso do agregado siderúrgico e, conseqüentemente, uma possível ação de redução na exploração das jazidas naturais de material pétreo, reduzindo o

impacto ambiental.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao Instituto Federal de Mato Grosso (IFMT), à Universidade de Brasília (UnB), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT) e ao Instituto Aço Brasil.

REFERÊNCIAS

- ABNT (1982). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5019. Produtos e Ligas de Cobre. Terminologia. Rio de Janeiro. 16p.
- Almeida, R. P., do Lago Leite, A., & Soares, A. B. (2015). *Reduction of acid rock drainage using steel slag in cover systems over sulfide rock waste piles*. *Waste Management & Research*, 33(4), 353-362, <http://scholar.google.com.br>. acessado em 15 fevereiro 2016.
- Almeida, R., Roque, A. J., & da Silva, A. P. F. (2014). *Study of the hydraulic behaviour of steel slag and CDW recycled aggregates to MSW landfill leachate*. <http://scholar.google.com.br>. acessado em 15 fevereiro 2016.
- Barbosa, M. R. (2013). *Caracterização geoambiental das escórias de aciaria de cinco estados brasileiros*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 157p.
- Castelo Branco, V. T. F. (2004). *Caracterização de Misturas Asfálticas com Uso de $d_{15_{Solo}} \leq 4,23$ Escória de Aciaria como Agregado*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ. 135p.
- Corrêa, M. L. T. (2006). *Utilização de escória de aciaria como corretivo da acidez de solos para cultivos de soja e cana-de-açúcar e avaliação da contaminação ambiental*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa). 187p. <http://scholar.google.com.br>. acessado em 04 julho 2014
- DNIT (2006). Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte. Manual de Drenagem de Rodovias. 2ª edição. Publicação IPR – 724, Rio de Janeiro. 337p.
- Freitas, H. B. (2007) *Misturas Asfálticas de Módulo Elevado com Uso de Escória de Aciaria como Agregado*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ. 173p.
- IAB (2014). Relatório de Sustentabilidade. Publicação Instituto Aço Brasil. 49p. www.acobrasil.org.br. Acessado 5 abril 2016, às 10h15.
- Motz, H.; Geiseler, J. (2001). *Products of steel slags na opportunity to save natural resources*. *Waste Management*. N. 21, p. 285-293
- Oliveira, F. U.(2006) *Avaliação de Três Métodos de Ensaio para Determinação do Potencial de Expansão de Escórias de Aciaria para uso em pavimentação*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Es. 141p.
- Rohde, L.(2002) *Escória de Aciaria Elétrica em Camadas de Pavimentos – Estudo Laboratorial*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação da Escola de Minas. UFOP. Ouro preto. Minas Gerais. 132p.
- Silva, R.G.O da (2010) *Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 101p.
- Sousa, G. M. (2007). *Estudo Experimental de Escorias de Aciaria para Fins de Caracterização Tecnológica como Material de Lastro Ferroviário em Vias Sinalizadas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 124p
- Suzuki, C.Y. Azevedo, A.M. Kabbach Junior, F.I. (2013). *Drenagem subsuperficial de pavimentos: conceitos e dimensionamento*. Oficina de Textos, São Paulo. 240p.