

Estabilização de taludes por meio de mistura de solo com escória de dessulfuração (KR)

Raphael de Martin Gonçalves

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

Neemias Almeida Dias

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, adneemias@gmail.com

Sidineidy Izoton

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

Guilherme Ventorim Ferrão

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, gventorim@hotmail.com

Patrício José Moreira Pires

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

RESUMO: Durante a produção do aço, o processo de dessulfuração do ferro-gusa dentro do Reator Kanbara gera um coproduto denominado escória KR, que apresenta potencial para utilização em obras de terra. Esse trabalho tem o objetivo de avaliar o uso deste material em misturas com solo para estabilização de encostas, vislumbrando acréscimo do ângulo de atrito do solo e coesão do solo e, conseqüentemente, aumentando o valor da resistência ao cisalhamento. A metodologia empregada consiste na realização de ensaios de cisalhamento direto em amostras de solo puro e misturas de solo-escória, na proporção de 20% de escória em relação à massa seca de solo, compactadas na energia do Proctor Normal, precedidos de modelagem em programa computacional para verificação do fator de segurança de um talude natural instável. Os resultados indicam acréscimo do ângulo de atrito de 36,26° para 41,74° e da coesão de 6,91 kPa para 13,74 kPa. A modelagem computacional mostrou que os fatores de segurança do talude original, inicialmente abaixo dos valores prescritos por norma, foram incrementados após o lançamento da camada de solo-escória, superando os valores mínimos na maior parte dos casos analisados.

PALAVRAS-CHAVE: escória KR, mistura solo-escória, modelagem de taludes

1 INTRODUÇÃO

A utilização de coprodutos industriais como materiais de estabilização de solos vem sendo motivo de pesquisas devido ao potencial de reaproveitamento 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 de

construção.

No estado do Espírito Santo, a ArcelorMittal Tubarão é uma grande empresa produtora de bobinas de aço e, por esse motivo, produz resíduos e coprodutos em grande quantidade. Um destes coprodutos, resultante da dessulfuração do gusa em Reator Kambara (Escória KR), tem por objetivo reduzir o teor de enxofre por meio da injeção de uma mistura dessulfurante (finos de cal com fluorita e finos de cal com borra de alumínio).

Esta escória já apresentou resultados satisfatórios quando utilizada em misturas com bentonitas, aumentando o valor da resistência não-drenada em 188%, medida pelo ensaio do Cone (TESSARI; COBE, 2015).

Neste trabalho foram avaliadas misturas de solo e escória KR, com 20% de escória em relação à massa seca do solo.

Foram avaliadas segundo o ensaio de cisalhamento direto para determinação do ângulo de atrito e da coesão dos solos e das misturas.

Posteriormente estes resultados foram inseridos em um programa de verificação de estabilidade de taludes para cálculo do Fator de Segurança.

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 Escória de alto-forno KR

A escória de alto-forno KR recebe este nome pois é gerada durante a dessulfuração do ferro gusa por um processo denominado *Kambara Reactor*.

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 concentra na parte superior do reator e são retirados por um separador

(CALVE, 2012).

Como característica importante, as escórias de alto-forno apresentam comportamento de ligantes hidráulicos. Esta característica está diretamente ligada ao teor de óxido de cálcio, da sua composição química e o tipo de resfriamento utilizado no processo obtenção da escória. Quanto ao resfriamento, se feito de forma rápida, a escória de alto forno apresentará maior hidráulidade, enquanto um resfriamento mais demorado reduzirá esta característica. (SANT'ANA, 2003)

Em obras de pavimentação, a utilização de escórias de alto-forno no Brasil ainda é feita em pequena escala, ao passo que em âmbito mundial este material é bastante utilizado em países como Estados Unidos e Alemanha. (SANT'ANA, 2003)

2.3 Uso de escórias para melhoramento de solos.

Pesquisas com solo e escória têm sido desenvolvidas para avaliar a utilização deste coproduto em obras geotécnicas.

Tessari e Cobe (2015) realizaram pesquisas com três tipos de escórias em misturas com bentonita. Os autores determinaram a resistência não drenada da bentonita pura e das misturas por dois métodos tradicionais, *Cone Fall* e *Vane Test* e compararam os resultados com misturas feitas entre bentonita e cimento.

Calve (2012) realizou pesquisa com dois tipos de escória, KR e LD, para emprego em obras rodoviárias. O autor realizou ensaios de ISC e expansão (PTM 130) para avaliar o comportamento das misturas feitas entre os solos e os dois tipos de escória.

Velten *et al* (2006) apresentou pesquisa para avaliar a utilização de escórias de alto-forno granulada moída em estradas florestais. Segundo o autor, a utilização da escória promoveu aumentos significativos nos valores de resistência mecânica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Amostragem dos materiais

O solo amostral foi empregado em obras rodoviárias no município de Santa Maria de Jetibá, município localizado na região serrana do estado do Espírito Santo.

Trata-se de um solo residual de coloração amarelada e com grande presença de finos.

A amostragem do solo foi superficial e feito em talude escavado. Não foi notada nenhuma característica de matéria orgânica na amostra.

A escória KR foi cedida pela empresa Arcelor Mittal Tubarão e tem granulometria compreendida entre 0 e 9mm. A amostragem da escória foi feita pela empresa fornecedora seguindo a recomendação da granulometria desejada.

3.1.1 Solo

A caracterização física do material é apresentada nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Granulometria das amostras de solo utilizadas

Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)
32,5	10,0	39,12	18,37

Tabela 2 – Propriedades e classificação dos solos utilizados

LL (%)	LP (%)	G _s (g/cm ³)	Cu	Cc	SUCS
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 disponibilizada pela empresa 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 - Principais componentes químicos da escória KR

Caracterização química da escória KR (%)				
ESCÓRIA	CaO	MgO	FeT	SiO ₂
KR	45,5	5,65	14,1	14,6

Notam-se grandes quantidades de óxidos de cálcio. Altas quantidades deste composto 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 à massa seca de solo.

Pesquisas podem ser encontradas com teores de escória maiores do que o utilizado neste trabalho. Calve (2012), por exemplo, avaliou a capacidade de suporte de misturas de solo com 60% e 80% de escória KR. 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

A metodologia de ensaio foi baseada no trabalho realizado por Dias *et al* (2015).

As amostras foram compactadas utilizando energia do Proctor Normal e depois foram moldado três anéis de cisalhamento direto.

Após a compactação, as amostras não foram submetidas a nenhum processo de cura, mesmo sabendo da característica de ligante hidráulico da escória, pois se pretendeu representar uma condição desfavorável para a mistura.

Os ensaios de cisalhamento direto foram conduzidos em três níveis de tensão normal, 50, 100 e 200 kPa, com as amostras submersas para representar a pior condição.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaios de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados de acordo com a norma NBR 7182 (1986).

Os resultados dos ensaios de compactação

podem ser observados pelo gráfico apresentado na Figura 1, que mostram o comportamento das amostras preparadas somente com o solo e com a mistura de solo e escória.

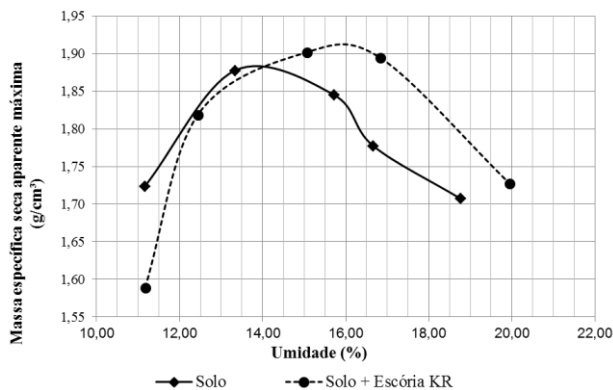


Figura 1 - Curva de compactação das amostras de Solo e Solo + escória

As respectivas umidades ótimas e densidades seca máximas constam na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de compactação dos solos e das misturas

Material	ρ (g/cm ³)	UMIDADE ÓTIMA (%)
Solo	1,88	13,8
Solo + Escória KR	1,91	16,0

4.2 Ensaios de cisalhamento direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram feitos de acordo com as diretrizes da norma ASTM D 3080 (2011). As tensões de ruptura, apresentadas na Tabela 5, foram utilizadas para traçar as envoltórias de Mohr (Figura 2).

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto

Material	Tensão normal na ruptura (kgf/cm ²)	Tensão cisalhante na ruptura (kgf/cm ²)
Solo	50	45
	105	82
	220	169
Solo + Escória	51	65
	105	100
	218	212

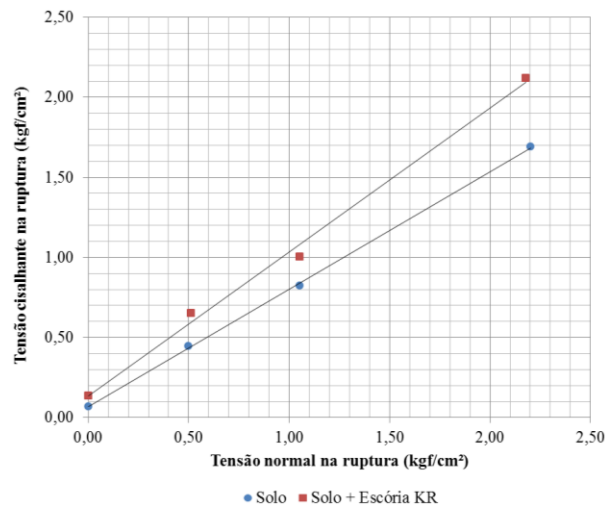


Figura 2 – Envoltórias de Mohr para o solo e mistura solo+escória

Da análise das envoltórias, pôde-se determinar o ângulo de atrito e a coesão dos materiais (Tabela 6).

Tabela 6 – Ângulo de atrito e coesão dos materiais

Material	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)
Solo	36,26	6,91
Solo + escória KR	41,93	13,74

4.3 Análise de estabilidade de taludes

A última etapa deste trabalho consiste na análise computacional de estabilidade de taludes, por meio do *software* GeoStudio Slope/W, aplicando os materiais previamente estudados.

A análise se baseou em um talude hipotético com baixo fator de segurança constituído do solo estudado – aqui chamado de “talude original” – (Figura 3) e sobre ele aplicada uma camada da mistura solo-escória visando sua estabilização.

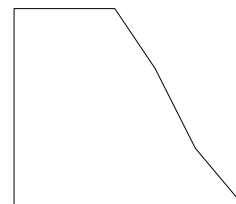
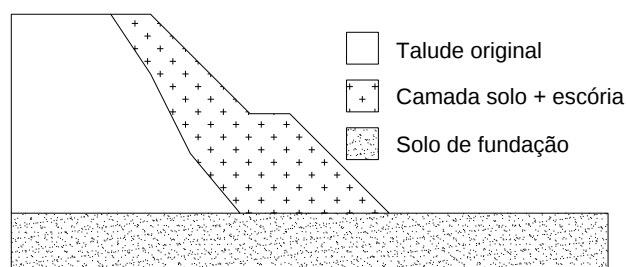


Figura 3 – Modelo de talude utilizado para as simulações

Foram simulados taludes de quatro alturas diferentes, 5m, 10m, 15m e 20m, e para cada um deles se variou a inclinação, 2:1, 1,5:1, 1:1, 1:1,5 e 1:2 (V:H). Como solo de fundação, lançou-se uma camada de aterro compactado (Gerscovich, 2012). A aplicação desta camada foi feita, pois em pesquisa anterior realizada por Dias *et al* (2015) em alguns casos a ruptura ocorreu na camada de fundação, sendo necessário lançar uma camada com as características descritas na Tabela 7 para não prejudicar a análise. Os parâmetros geotécnicos utilizados para esta camada representam valores comumente encontrados em obras deste tipo no Brasil. A Figura 4 ilustra a estrutura final.



Em síntese, as propriedades de cada camada constam na Tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades das camadas

Material	Peso específico (kN/m ³)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)
Solo	18,8	36,26	6,91
Solo + escória KR	19,1	41,93	13,74
Solo de fundação	20,00	35,00	15,00

As análises pelo programa resultaram nas superfícies críticas de ruptura de cada talude. Seus respectivos fatores de segurança, calculados pelo Método de Bishop, são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Fatores de segurança em função das alturas e inclinações

		Inclinações (V:H)					
		Original	2:1	1,5:1	1:1	1:1,5	1:2
Alturas	5m	1,273	1,147	1,433	1,991	2,774	3,439
	10m	0,987	0,881	1,132	1,678	2,273	2,83
	15m	0,869	0,792	1,038	1,537	2,074	2,593
	20m	0,799	0,726	1,039	1,451	1,964	2,468

Claramente se observa que apenas as inclinações mais suaves (1:1, 1:1,5 e 1:2) apresentam fatores de segurança próximos ou superiores a 1,5. Abaixo dessas inclinações, foram obtidos fatores de segurança extremamente baixos.

Outro ponto que deve ser analisado é a diminuição dos fatores de segurança dos taludes de inclinação 2:1 adicionados da camada de mistura em relação ao talude original. Isto ocorre pois a pequena camada de mistura contribui a favor do momento desestabilizante, ou seja, atuam favoravelmente ao deslizamento. Como solução, foram empregadas bermas de 2m de largura no meio da altura de todos os taludes. Os novos fatores de segurança constam na Tabela 9.

Tabela 9 – Fatores de segurança em função das alturas e inclinações após adição da berma

		Inclinações (V:H)					
		Original	2:1	1,5:1	1:1	1:1,5	1:2
Altura	5m	1,273	1,865	2,218	2,44	3,552	4,219
	10m	0,987	1,306	1,551	1,997	2,575	3,135
	15m	0,869	1,193	1,327	1,819	2,125	2,781
	20m	0,799	0,906	1,196	1,712	2,099	2,603

Os novos resultados mostram expressiva melhora dos fatores de segurança em relação ao talude original.

Diferentemente dos fatores de segurança do talude 2:1 sem a berma na análise mostrada na Tabela 9, os fatores de segurança para o talude 2:1 passam a aumentar com a adição da nova camada.

5 CONCLUSÕES

O acréscimo da escória KR implicou em um considerável ganho de resistência ao cisalhamento do solo, representado por um valor médio de 31%. Este ganho se evidencia novamente ao se analisar a melhora sobre ângulo de atrito, em torno de 16%, e da coesão, que dobrou de valor.

A análise de estabilidade inicial, sem aplicação da berma, resultou em fatores de segurança muito baixos nos casos de maior inclinação (2:1 e 1,5:1), sendo que apenas o

caso 1,5:1 com 5m de altura atingiu o mínimo de 1,2 determinado por norma . As inclinações de 1:1, 1:1,5 e 1:2 foram as mais favoráveis quanto ao fator de segurança, alcançando fatores de segurança próximos ou maiores que 1,5 para todas as alturas analisadas.

Ao se utilizar a berma, como esperado, houve melhora dos fatores de segurança. As inclinações de 2:1 e 1,5:1 praticamente satisfazem o fator de segurança igual a 1,2 determinado pela norma NBR 11682 (2006), exceto o caso 2:1 com 20m de altura; sendo que os casos 1,5:1 com 5 e 10m ultrapassaram o valor de 1,5.

Em geral, a proposta neste trabalho apresentada se mostrou satisfatória para taludes com inclinação igual ou inferior a 1:1, podendo ser aplicada a taludes um pouco mais acentuados desde que não ultrapassem os 10m de altura e/ou se utilize uma berma para aumentar o momento resistente.

Por fim, a utilização da escória neste tipo de obra se mostra viável. Além dos ganhos de resistência ocasionados por sua adição ao solo, é uma alternativa para a destinação adequada deste subproduto.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457 – *Amostras de solo: Preparação para ensaios de compactação e caracterização*. Rio de Janeiro, 1986.
- _____. NBR 7182 – *Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, 1986.
- _____. NBR 11682: *Solo – Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro, 2006.
- Araujo, A.F. (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
- ASTM – American Society for Testing and Materials. D3080 – *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- Calve, M.U.M. (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.
- Dias, N.A.; Pires, P.J.M.; Yin, M.F. e Ribeiro, R.C.H. (2015) *Slopes Stabilization Using Mixture of Soil and Dimension Stone Waste Chemically Stabilized with Portland Cement*, 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Buenos Aires, Argentina, p. 1504-1511.
- França, F.C. (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.
- Gerscovich, D.M.S (2012). *Estabilidade de taludes*. 1. Ed. São Paulo: Oficina de Textos. p. 98.
- Sant'anna, A.P. (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.
- Tessari, C.L. e Cobe, R.P. (2015) *Melhoramento de solo com incorporação de resíduos de siderurgia*. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo, 97 p.
- Velten *et al* (2006) *Caracterização Mecânica de Misturas Solo-Escória de Alto Forno Granulada Moída para Aplicações em Estradas Florestais*. *Revista Árvore*. Viçosa, MG, Vol. 30, n. 2, p. 235-240.