

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS SOLO-ESCÓRIA DE ALTO-FORNO GRANULADA MOÍDA PARA APLICAÇÕES EM ESTRADAS FLORESTAIS¹

Rodrigo Zorzal Velten², Alexandre Pelissari Sant'Ana³, Dario Cardoso de Lima⁴, Cláudio Henrique de Carvalho Silva⁴, Carlos Alexandre Braz de Carvalho⁴, Lauro Gontijo Couto⁴ e Carlos Cardoso Machado⁵

RESUMO – O presente artigo objetivou avaliar a resistência mecânica de misturas solo-escória de alto-forno granulada moída e ativada com cal hidratada, para aplicações como camada de pavimentos de estradas florestais. O solo analisado é um residual jovem de gnaiss da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, de textura arenosilto-argilosa, classificado como A-2-4 (0) pelo Sistema TRB e como NS' pela Metodologia MCT. A escória de alto-forno granulada moída empregada foi fornecida pela companhia brasileira Valemassa Indústria e Comércio de Argamassa Ltda. Utilizou-se uma cal hidratada comercial como agente ativador das reações de hidratação da escória. Trabalhou-se com teores de escória de 5, 10 e 15%, em relação à massa de solo seco, e de cal hidratada de 5, 10 e 20%, em relação à massa seca de escória. O estudo englobou a realização de ensaios de caracterização química da escória e de caracterização geotécnica do solo, bem como ensaios de compactação e de compressão não-confinada das misturas na energia de compactação do Proctor intermediário, considerando-se os períodos de cura em câmara úmida de 1, 7 e 28 dias. Os resultados indicaram ganhos significativos de resistência mecânica das misturas com relação ao solo, observando-se aumentos expressivos na resistência mecânica, com aumentos nos teores de escória, cal e período de cura.

Palavras-chave: Estradas florestais, misturas solo-escória de alto-forno granulada moída e resistência mecânica.

MECHANICAL CHARACTERIZATION OF SOIL AND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG MIXTURES FOR FOREST ROAD APPLICATIONS

ABSTRACT – This paper addresses the evaluation of the mechanical strength of mixtures of a soil and a granulated blast furnace slag activated with hydrated lime for forest road engineering applications. The tested soil is a young residual gneiss soil classified as A-2-4 (0) by the TRB System and as NS' by the MCT Methodology. The slag was supplied by the Brazilian company Valemassa Indústria e Comércio de Argamassa Ltda. A commercial hydrated lime was used to activate slag hydration reactions. The laboratory testing program encompassed the following: geotechnical soil characterization; specimens prepared at slag contents of 5, 10 and 15 % related to the soil dry mass, and lime contents of 5, 10 and 20 % related to the dry slag mass; specimens compacted at the intermediate Proctor compaction effort; unconfined compression strength tests performed in specimens at the curing times of 1, 7 and 28 days. Data from the laboratory testing program supported significant increase in mechanical strength of mixtures when increasing slag and lime contents, as well as curing time.

Keywords: Forest roads, soil and granulated blast furnace slag mixtures and mechanical strength.

¹ Recebido em 30.03.2005 e aceito para publicação em 10.11.2005.

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa. E-mail: <rzorzal@bol.com.br>.

³ Furnas Centrais Elétricas S.A.

⁴ Departamento de Engenharia Civil da UFV. E-mail: <declima@ufv.br>.

⁵ Departamento de Engenharia Florestal da UFV. E-mail: <machado@ufv.br>.

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos (ABEDA, 2001), a malha rodoviária nacional apresenta uma extensão da ordem de 1.725.000 km, com aproximadamente 10% pavimentados; desse total, 83% enquadram-se na categoria de rodovias municipais e vicinais, dos quais 1,2% encontra-se pavimentado. Com relação ao setor florestal, Machado e Malinovski (1986) estimaram a extensão da malha viária em aproximadamente 600.000 km.

Supondo que a grande parcela das rodovias em terra justifique os serviços de pavimentação ou outras melhorias que envolvam camadas do pavimento estabilizadas quimicamente, seja pelo número de veículos, seja pela importância regional e estratégica, provavelmente algumas centenas de milhares de quilômetros necessitarão ser pavimentados no médio e longo prazos, nos setores público e florestal do Brasil.

O presente trabalho insere-se em uma abordagem do emprego de resíduos industriais na melhoria do pavimento de estradas, em especial de estradas florestais. Nele, apresenta-se um estudo dirigido ao uso da escória de alto-forno em misturas com um solo para aplicação como camada de pavimento de estradas, abrindo-se um campo de interesse para estradas florestais que estejam inseridas nas áreas de atuação de companhias siderúrgicas.

2. ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

A escória de alto-forno é um resíduo siderúrgico industrial constituído, basicamente, de aluminossilicatos cálcicos, como resultado da combinação da ganga do minério de ferro com as cinzas do coque e do calcário utilizado como fundente no processo siderúrgico da fabricação do ferro fundido (“ferro-gusa”).

A composição química e o processo de resfriamento da escória de alto-forno são fatores determinantes na sua capacidade aglomerante. A escória, quando submetida a condições de resfriamento brusco na saída do alto-forno (processo chamado de granulação da escória), apresenta propriedades hidráulicas latentes (escória vítrea); mas, se o processo empregado for o contrário (resfriamento lento), a escória se cristaliza, formando-se um produto sem atividade hidráulica.

Assim, pode-se associar a reatividade da escória de alto-forno à sua forma de obtenção no estado vítreo.

Todavia, deve-se ressaltar que essa condição apenas não é suficiente para o seu emprego como aglomerante, pois é necessário que a escória seja solúvel, isto é, passível de ataque pela água, para que os elementos formadores dos compostos hidráulicos sejam liberados. Essa solubilidade é favorecida pelo teor de óxido de cálcio presente na escória. Dessa forma, a reação é lenta, mas, em meio fortemente alcalino ou através da ação de sulfatos ou de ambos, torna-se acelerada, sendo a velocidade de reação favorecida pela finura da escória (CINCOTTO et al., 1992).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

3.1.1. Solo

Trabalhou-se com um solo residual jovem de gnaisses da Zona da Mata Norte de Minas Gerais. A amostra foi coletada no horizonte C de um talude de corte localizado na Vila Secundino, no Campus da Universidade Federal de Viçosa, na cidade de Viçosa.

3.1.2. Escória de alto-forno granulada moída

A escória de alto-forno granulada utilizada foi produzida pela empresa *Aço Minas Gerais S. A. – Açominas*, com composição química apresentada no Quadro 1. Esse resíduo foi moído pela empresa *Valemassa Indústria e Comércio de Argamassa Ltda.*, que forneceu uma amostra desse material para ser utilizada no presente trabalho.

Quadro 1 – Composição química da escória de alto-forno granulada moída

Table 1 – Chemical composition of the granulated blast furnace slag

Característica Química	Resultados (%)
SiO ₂	34,3
Al ₂ O ₃	11,9
CaO	42,0
Fe ₂ O ₃	0,4
FeO	0,2
MgO	3,2
K ₂ O	0,7
Na ₂ O	0,1
Mn ₂ O ₃	0,9
SO ₃	0,03
S	0,06

3.1.3. Cal hidratada

Foi empregada uma cal hidratada comercial adquirida no comércio da cidade de Viçosa, Minas Gerais, da marca SUPERCAL e fabricada pela companhia ICAL. Sua função nas misturas foi atuar como elemento ativador das reações de hidratação dos compostos químicos da escória de alto-forno granulada moída.

3.2. Métodos

No presente estudo, trabalhou-se com: (i) caracterização geotécnica do solo e química da escória de alto-forno granulada moída; (ii) teores de escória de alto-forno granulada moída de 5, 10 e 15% em relação à massa seca de solo; (iii) teores de cal hidratada de 5, 10 e 20% em relação à massa seca de escória; (iv) compactação de corpos-de-prova do solo e de suas misturas com escória de alto-forno e cal hidratada na energia do ensaio Proctor intermediário; (v) ensaios de compressão não-confinada realizados nos corpos-de-prova do solo e misturas compactados, nos períodos de cura de 1, 7 e 28 dias.

Os ensaios foram realizados segundo as seguintes Normas Técnicas: granulometria (ABNT, 1984a), limites de Atterberg (ABNT, 1984bc), massa específica dos grãos (ABNT, 1984d), compactação (ABNT, 1986) e compressão não-confinada (DNER, 1994). Considerando que, presentemente, não se dispõe de norma técnica brasileira específica para a determinação da resistência mecânica das misturas em estudo, adotou-se aquela preconizada pelo extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1994) para a caracterização de misturas solo-cimento, envolvendo as etapas de compactação, cura, imersão em água e ruptura dos corpos-de-prova.

Quadro 2 – Resultados dos ensaios de laboratório de caracterização geotécnica do solo

Table 2 – Laboratory soil geotechnical characterization testing data

Parâmetros Geotécnicos		Resultados
Limites de Atterberg (%)	LL	30
	LP	19
	IP	11
Peso específico dos grãos (kN/m ³)	γ_s	26,15
	< 0,005	8
Granulometria (%)	0,005=%<0,05	11
	0,05=%<2,00	81
Classificação Geotécnica	TRB	A-2-4 (0)
	MCT	NS'

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 2, apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica realizados com o solo em estudo. Observa-se, nesse quadro, que o solo apresenta plasticidade relativamente baixa, com IP da ordem de 11% e textura areno-argilo-siltosa, sendo classificado como A-2-4 (0), segundo o sistema TRB, e como NS', segundo a Metodologia MCT.

No Quadro 3, mostram-se os resultados dos ensaios de compactação, englobando os parâmetros umidade ótima (h_{ot}) e peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}) das misturas solo e escória, nas nove combinações de solo, escória de alto-forno granulada moída e cal hidratada consideradas no presente trabalho. Para fins práticos, observou-se que a adição de escória de alto-forno granulada moída e cal hidratada aos solos não conduziu a variações significativas nos parâmetros ótimos de compactação.

Os Quadros 4, 5 e 6 trazem os resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada das misturas solo, escória de alto-forno granulada moída e cal realizados, respectivamente, nos períodos de cura de 1, 7 e 28 dias. Com relação aos dados apresentados nesses quadros, como já relatado por Sant'Ana et al. (2004), informa-se que as misturas com 5% de escória ativada com 5 e 10% de cal hidratada e 10% de escória ativada com 5% de cal hidratada não resistiram à imersão em água por quatro horas nos ensaios de compressão axial realizados em corpos-de-prova cilíndricos segundo a metodologia recomendada pelo DNER (1994) para misturas solo-cimento, considerando-se os períodos de cura de 1, 7 e 28 dias.

Quadro 3 – Umidade ótima (h_{ot}) e peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}) das misturas

Table 3 – Optimum moisture content (h_{ot}) and maximum dry density (γ_{dmax}) of mixtures

% Escória de Alto-Forno Granulada Moída	% Cal Hidratada	Parâmetros Ótimos de Compactação: Energia do Ensaio Proctor Intermediário	
		h_{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)
5	5	13,14	18,16
	10	13,43	18,09
	20	13,80	18,08
10	5	13,25	18,27
	10	13,34	18,20
	20	13,29	18,25
15	5	13,52	18,30
	10	13,77	18,21
	20	13,41	18,31



No presente trabalho, o mesmo comportamento foi, também, observado na mistura com 15% de escória ativada com 5% de cal hidratada, nos períodos de cura de 1 e 28 dias. Acredita-se que o desempenho dessa mistura aos sete dias de cura possa estar relacionado com possível desvio ocorrido no processo de compactação dos corpos-de-prova, embora se deva ressaltar que os valores de resistência à compressão não confinada, obtidos nesse período de cura (Quadro 5), são de pequena monta, da ordem daqueles associados às misturas com 5% de escória e 20% de cal e 10% de escória e 10% de cal, no primeiro dia de cura (Quadro 4).

Observa-se também, no Quadro 4, que, independentemente do período de cura considerado, aumentando os teores de escória e cal, aumentaram, significativamente, as resistências mecânicas das misturas, o que comprovou a ação positiva da escória, como agente estabilizante do solo analisado, e da cal,

como agente de ativação de reações de hidratação da escória. Outro aspecto de interesse observado foi a influência positiva do período de cura nos ganhos significativos de resistência mecânica das misturas, observando-se o desenvolvimento de reações de cimentação com o tempo, como ilustra a Figura 1, com preponderância para os ganhos ocorridos nos primeiros sete dias de cura.

Considerando os teores de escória de alto-forno granulada moída e cal hidratada empregados no presente trabalho, bem como a recomendação da Norma Técnica NBR 12253 (ABNT, 1992) para misturas solo-cimento, que destaca que a resistência mínima dessas misturas deve ser igual ou superior a 2,1 MPa para um período de cura de sete dias, conclui-se que a mistura com 10% de escória ativada com 10% de cal praticamente atendeu às exigências de misturas solo-cimento para emprego como camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

Quadro 4 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada das misturas, no período de cura de um dia
Table 4 – *Unconfined compression testing data of mixtures for 1 day curing time*

% Escória	% Cal	Tensão de Ruptura (MPa) – 1 Dia de Cura				
		Corpo-de-Prova			Média	Desvio-Padrão
		1	2	3		
5	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	20	0,40	0,41	0,43	0,41	0,02
10	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10	0,47	0,43	0,49	0,46	0,03
	20	1,78	1,75	1,75	1,76	0,02
15	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10	1,28	1,38	1,51	1,39	0,12
	20	2,37	2,13	2,02	2,17	0,18

Quadro 5 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada das misturas, para o período de cura de 7 dias
Table 5 – *Unconfined compression testing data of mixtures for 7 days curing time*

% Escória	% Cal	Tensão de Ruptura (MPa) – 7 Dias de Cura				
		Corpo-de-Prova			Média	Desvio-Padrão
		1	2	3		
5	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	20	0,67	0,71	0,73	0,70	0,03
10	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10	1,97	2,02	2,11	2,03	0,07
	20	4,47	4,42	3,97	4,29	0,28
15	5	0,42	0,42	0,41	0,42	0,01
	10	3,42	3,25	3,16	3,28	0,13
	20	4,12	5,14	5,21	4,82	0,61

Quadro 6 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada das misturas, no período de cura de 28 dias
Table 6 – *Unconfined compression testing data of mixtures for 28 days curing time*

% Escória	% Cal	Tensão de Ruptura (MPa) – 28 Dias de Cura				
		Corpo-de-Prova			Média	Desvio-Padrão
		1	2	3		
5	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	20	1,47	0,95	1,61	1,34	0,35
10	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10	2,42	2,74	2,68	2,61	0,17
	20	5,42	5,56	5,38	5,45	0,09
15	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10	5,85	5,32	5,19	5,45	0,35
	20	*	7,12	6,94	7,03	0,13

*corpo-de-prova danificado.

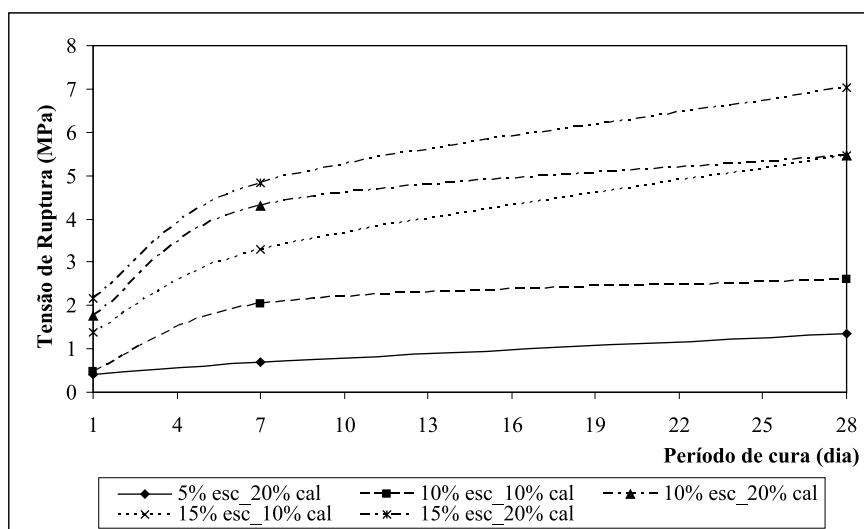


Figura 1 – Resistência à compressão não-confinada das misturas solo-escória de alto-forno granulada moída e com cal hidratada, nos períodos de cura de 1, 7 e 28 dias.

Figure 1 – *Unconfined compression strength of mixtures of soil, granulated blast furnace slag and hydrated lime for curing times of 1, 7 and 28 days.*

5. CONCLUSÃO

A análise dos resultados do programa experimental leva às seguintes conclusões: (i) a escória de alto-forno granulada moída ativada com cal hidratada mostrou-se um agente químico eficiente na estabilização do solo residual jovem em estudo; (ii) a adição de escória ao solo não causou variações significativas nos parâmetros ótimos de compactação desse solo; (ii) considerando-se o desvio-padrão observado, a mistura

de 10% de escória ativada com 10% de cal atingiu aos sete dias de cura, para fins práticos, as exigências mínimas de resistência mecânica para o emprego de misturas solo-cimento como camadas de base de pavimentos rodoviários, segundo a NBR 12253.

6. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela concessão de bolsas de iniciação científica ao primeiro autor; à companhia Valemassa

Indústria e Comércio de Argamassa Ltda., pelo fornecimento da escória de alto-forno granulada; e à Universidade Federal de Viçosa, pela infra-estrutura de laboratório e pessoal para a realização do presente trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO – ABEDA. **Manual básico de emulsões asfálticas: soluções para pavimentar sua cidade.** Rio de Janeiro: 2001. 134p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7181/84, Solo – Análise Granulométrica – Procedimento.** Rio de Janeiro: 1984a. 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6459/84, Solo – Determinação do Limite de Liquidez – Procedimento.** Rio de Janeiro: 1984b. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7180/84, Solo – Determinação do Limite de Plasticidade – Procedimento.** Rio de Janeiro: 1984c. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6508/84, Solo – Determinação da Massa Específica Aparente – Procedimento.** Rio de Janeiro: 1984d. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7182/84, Solo – Ensaio de Compactação – Procedimento.** Rio de Janeiro: 1986. 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12253/92, Solo – Cimento – Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento.** Rio de Janeiro: 1992. 7p.
- CINCOTTO, M. A.; BATTAGIN, A. F.; AGOPYAN, V. **Características da Escória Granulada de Alto-Forno e seu Emprego como Aglomerante e Agregado.** São Paulo: IPT, 1992. (Boletim, 65).
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER–ME 201/94, Solo-cimento – Compressão Axial de Corpos-de-prova Cilíndricos – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro: Norma Rodoviária, 1994. 4p.
- MACHADO, C. C.; MALINOVSKI, J. R. **Rede viária florestal.** Curitiba: FUPEF, 1986. 157p.
- SANT’ANA, A. P. et al. Avaliação da resistência mecânica de misturas solo-escória de alto-forno granulada moída para fins rodoviários. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS, 1., 2004, São Carlos. **Simpósio...** São Carlos: EESC/Universidade de São Paulo, 2004. 6p. (CD-ROM).