

Resistência à Compressão Simples de Solos Residuais Compactados Reforçados com Geossintético

Lucas Vinícius Costa de Oliveira

Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco-MG, Brasil, lucasvini13@gmail.com

Anne Karoline Fortunato do Carmo

Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco-MG, Brasil, annekarolinefc@gmail.com

Guilherme Antônio Almeida Fontes

Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco-MG, Brasil, guilhermeaafontes@gmail.com

Rafaela Reis Silva Sol

Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco-MG, Brasil, rafaelasol94@hotmail.com

Heraldo Nunes Pitanga

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, Brasil, heraldo.pitanga@ufv.br

Taciano Oliveira da Silva Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, Brasil, taciano.silva@ufv.br

RESUMO: O presente trabalho visou caracterizar tecnologicamente, em laboratório, o comportamento mecânico de três solos residuais típicos da região do Alto Paraopeba, estado de Minas Gerais, reforçados com geotêxtil não-tecido, com vistas à aplicação em obras rodoviárias regionais. Em caráter complementar, visou-se mostrar a viabilidade técnica do emprego do geotêxtil para fins de melhoria das propriedades de engenharia de solos regionais destinados à composição de camadas de solo compactado de estruturas de obras rodoviárias. A pesquisa envolveu a realização de ensaios de resistência à compressão simples (RCS) desses solos, considerando-se as condições reforçada e não-reforçada dos mesmos compactados na energia do Proctor Normal. Também foi avaliado o efeito da energia de compactação (energias do Proctor Normal, Intermediário e Modificado) sobre as respectivas respostas mecânicas de um dos solos nas condições reforçada e não reforçada. Considerando-se os solos estudados e o geotêxtil não-tecido de reforço empregado, os resultados demonstraram, para uma mesma energia de compactação (Proctor Normal), respostas diferenciadas dos sistemas investigados, conforme o tipo de solo considerado, realçando a importância de sua granulometria na mobilização do reforço. Considerando-se o efeito da variação da energia de compactação, para o solo investigado, constata-se o incremento da resistência mecânica do solo com a inserção do reforço para todas as energias estudadas, porém esse aumento não foi proporcional ao aumento da energia.

PALAVRAS-CHAVE: Solo compactado, Reforço geossintético, Energia de compactação, Resistência à compressão simples.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Bernucci *et al.* (2008), o objetivo principal da engenharia de pavimentação é garantir a trafegabilidade em qualquer época do

ano e sob quaisquer condições climáticas, proporcionando aos usuários condições adequadas de conforto ao rolamento e de segurança. Uma vez que o solo natural não é suficientemente resistente para suportar a

repetição de cargas de roda sem sofrer deformações significativas, torna-se necessária a construção de uma estrutura, denominada pavimento, que é construída sobre o subleito (terreno natural de fundação) para suportar as cargas dos veículos de forma a distribuir as solicitações às suas diversas camadas e ao subleito (Croney, 1977), limitando as tensões e as deformações de forma a garantir um desempenho adequado da via, por um longo período de tempo.

O desempenho adequado do conjunto de camadas do pavimento e do subleito relaciona-se à capacidade de suporte e à durabilidade compatíveis com o padrão da obra e com o tipo de tráfego, mas também com o conforto ao rolamento e com a segurança dos usuários.

O desafio de projetar um pavimento reside no fato, portanto, de conceber uma obra de engenharia que cumpra as demandas estruturais e funcionais exigíveis. Aliado a esses dois objetivos, o pavimento deve ainda ser projetado da forma mais econômica possível, atendendo às restrições orçamentárias.

Do ponto de vista do usuário, o estado da superfície do pavimento é o mais importante, pois os defeitos ou irregularidades nessa superfície são percebidos, uma vez que afetam seu conforto. Quando o conforto é prejudicado, significa que o veículo também sofre mais intensamente as consequências desses defeitos. Essas consequências acarretam maiores custos operacionais, relacionados a maiores gastos com peças de manutenção dos veículos, com o consumo de combustível e de pneus, com o tempo de viagem, dentre outros.

Segundo Ante (2012), falhas ou patologias nas rodovias devidas a deficiências estruturais podem acontecer precocemente ou ao longo do tempo por causa dos efeitos combinados de tráfego dos veículos, características do pavimento e fatores ambientais. A aparição de deformações permanentes na base e no subleito devido a cargas cíclicas pode eventualmente resultar em deformações excessivas ou no trincamento da superfície.

O dano por fadiga pode acontecer gradualmente ao longo da vida da estrutura e, desta maneira, o pavimento pode tornar-se inoperável antes do final da sua vida útil. Neste caso, o reforço de pavimentos usando

geossintéticos pode aumentar a resistência do pavimento e reduzir a incidência dessas patologias.

Dentre esses produtos, os geotêxteis e as geogrelhas correspondem àqueles que têm se notabilizado como os mais amplamente empregados em obras de pavimentação, devido as suas particulares propriedades de engenharia e às facilidades construtivas associadas a sua aplicação.

Salienta-se, porém, que a maioria das aplicações desses geossintéticos em pavimentação corresponde à restrição do mecanismo de propagação de trincas de deflexão na camada de revestimento asfáltico da estrutura do pavimento, quando tais produtos são colocados na interface entre o revestimento antigo e o novo revestimento executado na operação de restauração da via.

De forma similar à maioria dos municípios brasileiros, os municípios da região do Alto Paraopeba, estado de Minas Gerais, apresentam uma significativa malha rodoviária não-pavimentada, para a qual não apenas a pavimentação, mas também a adoção de técnicas adequadas de pavimentação se faz necessária.

Quanto a esse último aspecto, a constatação de que muitos solos empregados em tais obras perdem sua eficiência funcional muito tempo antes de expirada a vida útil de projeto, expondo o pavimento a defeitos precoces, justifica o desenvolvimento de pesquisas que, voltadas para a realidade regional, avaliem a viabilidade técnica do emprego de geossintéticos de reforço de solos visando às aplicações em obras rodoviárias.

Nesse contexto, o presente trabalho visou caracterizar tecnologicamente, em laboratório, o comportamento mecânico de três solos típicos da região do Alto Paraopeba, reforçados com geotêxtil não tecido, com vistas à aplicação em obras rodoviárias regionais.

Como objetivos secundários, buscou-se avaliar a influência da granulometria do solo sobre a eficiência da técnica de reforço geossintético estudada, além de avaliar o efeito da energia de compactação (Proctor Normal, Intermediário e Modificado) sobre o comportamento mecânico de solos reforçados com o geossintético empregado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Este programa de pesquisa contemplou o uso de solos residuais característicos da região do Alto Paraopeba, estado de Minas Gerais. Esses solos foram coletados de três jazidas de empréstimo em perfis de solos residuais existentes na zona rural do município de Ouro Branco-MG (Figura 1). Para avaliar a influência da granulometria do solo sobre a eficiência da técnica de reforço com geotêxtil, foram selecionados três solos granulometricamente distintos.



Figura 1. Perfis de solos residuais envolvidos no programa experimental de pesquisa.

Apresentam-se, na Tabela 1, os dados resultantes dos ensaios de granulometria conjunta, limites de Atterberg e peso específico dos grãos sólidos realizados sobre os solos residuais empregados na pesquisa.

A Tabela 2 contém os resultados das classificações USCS (*Unified Soil Classification System*) e TRB (*Transportation Research Board*) desses solos. Visando avaliar o efeito do reforço sobre as propriedades mecânicas dos solos compactados, foram determinados os dados de massa específica aparente seca máxima (ρ_{dmax}) e de umidade ótima (Wot) correspondentes aos respectivos pontos de ótimo derivados das curvas de compactação dos três solos investigados, na energia do Proctor Normal, conforme Tabela 3.

Visando avaliar o efeito da energia sobre tais propriedades, para o solo vermelho, foram determinados, complementarmente aos dados

pertinentes à energia do Proctor Normal, os dados correspondentes aos respectivos pontos de ótimo nas energias do Proctor Intermediário e do Proctor Modificado, conforme a Tabela 4.

Tabela 1. Resultados dos ensaios geotécnicos: granulometria, limites de Atterberg e peso específico dos grãos sólidos dos solos (Santos, 2013).

Propriedades analisadas (Caracterização geotécnica)		Solo Vermelho	Solo Rosa	Solo Amarelo
Frações granulométricas (%)	Argila ($\phi \leq 0,002$ mm)	4	8	0
	Silte ($0,002 < \phi \leq 0,06$ mm)	61	22	58
	Areia fina ($0,06 < \phi \leq 0,2$ mm)	22	42	9
	Areia média ($0,2 < \phi \leq 0,6$ mm)	12	24	29
	Areia grossa ($0,6 < \phi \leq 2$ mm)	0	3	4
	Pedregulho ($\phi > 2$ mm)	1	1	0
Limites de Atterberg (%)	LL	59	35	46
	LP	38	31	40
	IP	21	4	6
Peso específico (γ_s (kN/m ³))		28,7	29,7	28,7

Tabela 2. Classificação dos solos segundo os sistemas USCS e TRB (Santos, 2013).

Classificações	Solo	Solo	Solo
Geotécnicas	Vermelho	Rosa	Amarelo
Tradicionais			
USCS	MH	ML	ML
TRB	A-7-5	A-4	A-5

Tabela 3. Parâmetros de ótimo dos solos pesquisados para a energia Proctor Normal (Santos, 2013).

Solo	Parâmetros de ótimo da curva de compactação	
	ρ_{dmax} (g/cm ³)	Wot (%)
Vermelho	1,48	27,5
Rosa	1,61	16,6
Amarelo	1,56	15,2

Tabela 4. Parâmetros de ótimo do solo vermelho pesquisado para as energias Proctor Normal, Proctor Intermediário e Proctor Modificado (Santos, 2013).

Proctor Normal		Proctor Intermediário		Proctor Modificado	
ρ_{dmax} (g/cm ³)	Wot (%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	Wot (%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	Wot (%)
1,48	27,5	1,56	23,3	1,67	21,7

Como elemento de reforço desses solos, foi utilizado um geotêxtil não-tecido fornecido por uma empresa especializada em produtos geossintéticos (Figura 2).



Figura 2. Amostras do geotêxtil não-tecido empregado no programa experimental de pesquisa.

A Tabela 5 apresenta as especificações técnicas do geotêxtil empregado, segundo o catálogo fornecido pelo fabricante.

Tabela 5. Especificações técnicas do geotêxtil não-tecido empregado na pesquisa.

Propriedade	Unidade	Norma de ensaio	Magnitude
Gramatura	g/m ²	ABNT NBR 12568	130
Resistência à tração em faixa larga - transversal	kN/m	ABNT NBR 12824	7
Resistência à tração em faixa larga - longitudinal	kN/m	ABNT NBR 12824	6
Resistência ao rasgo trapezoidal - transversal	N	ASTM D 4533	160
Resistência ao rasgo trapezoidal - longitudinal	N	ASTM D 4533	170
Resistência ao puncionamento - CBR	kN	ABNT NBR 13359	1,20
Permissividade	s ⁻¹	ASTM D 4491	2,35
Permeabilidade normal	cm/s	ASTM D 4491	0,4
Transmissividade	m ² /s	ASTM D 4716	6.10 ⁻⁶
Abertura de filtração (O95)	μm	AFNOR G 38017	160

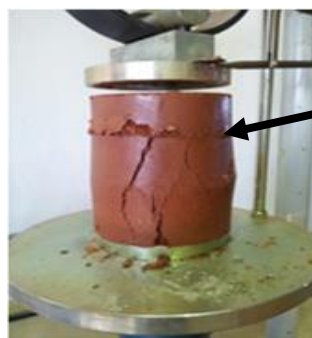
2.2 Métodos

A fase experimental do programa de pesquisa foi realizada nas instalações do Laboratório de Geotecnia e Estradas do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de São João Del Rei, Campus Alto Paraopeba (UFSJ/CAP). Essa fase consistiu, essencialmente, das seguintes etapas:

1. Coleta dos solos em campo (amostras deformadas);
2. Transporte e posterior armazenamento dos solos nos laboratórios;

3. Preparação dos solos para os ensaios (NBR 6457/86);
4. Ensaios de compactação dos solos e das misturas solo-geotêxtil nas energias do Proctor Normal, Intermediário e Modificado (NBR 7182/86);
5. Ensaios de resistência à compressão simples dos solos e das misturas solo-geotêxtil (NBR 12025/90).

Para os corpos de prova de solos compactados com a inserção do reforço, a posição do reforço correspondeu à interface entre a penúltima e a última camadas de solo compactadas no interior do cilindro de compactação, conforme ilustrado na Figura 3. Assim, foram cortadas amostras circulares do geotêxtil não tecido com diâmetro igual ao diâmetro interno do cilindro de compactação, as quais, para cada corpo de prova moldado, eram posicionadas na superfície da penúltima camada de solo compactada.



Posição do reforço geossintético no corpo de prova de solo compactado

Figura 3. Ilustração da posição do reforço geossintético em corpo de prova de solo compactado reforçado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Tabelas 6, 7 e 8 apresentam os respectivos valores de resistência à compressão simples (RCS) individuais e médios derivados dos ensaios de resistência à compressão simples realizados sobre corpos de prova compactados, com e sem reforço geossintético (geotêxtil não tecido), para os três solos investigados, considerando-se a energia do Proctor Normal.

Tabela 6. Resistência à compressão simples (RCS) do solo amarelo sem e com reforço geotêxtil (energia do Proctor Normal).

Corpo de prova	Solo amarelo sem reforço geotêxtil				Solo amarelo com reforço geotêxtil			
	W (%)	RCS (kPa)	RCSmédia (kPa)	Desvio padrão (kPa)	W (%)	RCS (kPa)	RCSmédia (kPa)	Desvio padrão (kPa)
1	14,4	140,9	141,0	0,9	15,2	148,9	145,9	2,0
2	14,9	142,3			15,1	144,3		
3	15,8	139,7			14,7	144,4		

Tabela 7. Resistência à compressão simples (RCS) do solo rosa sem e com reforço geotêxtil (energia do Proctor Normal).

Corpo de prova	Solo rosa sem reforço geotêxtil				Solo rosa com reforço geotêxtil			
	W (%)	RCS (kPa)	RCSmédia (kPa)	Desvio padrão (kPa)	W (%)	RCS (kPa)	RCSmédia (kPa)	Desvio padrão (kPa)
1	14,4	139,1	141,7	1,9	16,4	184,4	180,2	2,8
2	14,9	141,5			16,3	177,8		
3	15,7	144,5			15,9	178,5		

Tabela 8. Resistência à compressão simples (RCS) do solo vermelho sem e com reforço geotêxtil (energia do Proctor Normal).

Corpo de prova	Solo vermelho sem reforço geotêxtil				Solo vermelho com reforço geotêxtil			
	W (%)	RCS (kPa)	RCSmédica (kPa)	Desvio padrão (kPa)	W (%)	RCS (kPa)	RCSmédica (kPa)	Desvio padrão (kPa)
1	28,4	170,0			26,1	244,5		
2	26,3	188,2	182,2	7,8	27,3	267,8	251,5	10,5
3	27,8	184,3			27,1	242,2		

As Tabelas 9 e 10 apresentam os respectivos valores de resistência à compressão simples (RCS) individuais e médios derivados dos ensaios de compressão simples realizados sobre corpos de prova compactados, com e sem reforço geossintético, para o solo vermelho, considerando-se as energias do Proctor Intermediário e Modificado. Para esse solo,

apresentam-se, na Figura 4, os correspondentes incrementos percentuais de resistência do solo reforçado comparativamente ao solo não reforçado, para cada uma das energias de compactação (Proctor Normal, Intermediária e Modificado) a que foi submetido nesse programa experimental de pesquisa.

Tabela 9. Resistência à compressão simples (RCS) do solo vermelho sem e com reforço geotêxtil (energia do Proctor Intermediário)

Corpo de prova	Solo vermelho sem reforço geotêxtil				Solo vermelho com reforço geotêxtil			
	W (%)	RCS (kPa)	RCSmédica (kPa)	Desvio padrão (kPa)	W (%)	RCS (kPa)	RCSmédica (kPa)	Desvio padrão (kPa)
1	21,4	374,8			20,5	426,3		
2	20,9	419,0	401,1	17,5	20,8	480,4	465,6	26,2
3	20,9	409,4			20,7	490,0		

Tabela 10. Resistência à compressão simples (RCS) do solo vermelho sem e com reforço geotêxtil (energia do Proctor Modificado).

Corpo de prova	Solo vermelho sem reforço geotêxtil				Solo vermelho com reforço geotêxtil			
	W (%)	RCS (kPa)	RCSmédica (kPa)	Desvio padrão (kPa)	W (%)	RCS (kPa)	RCSmédica (kPa)	Desvio padrão (kPa)
1	22,9	593,8			22,6	634,1		
2	23,0	519,2	541,2	35,1	22,3	618,8	639,5	17,3
3	22,8	510,5			22,8	665,5		

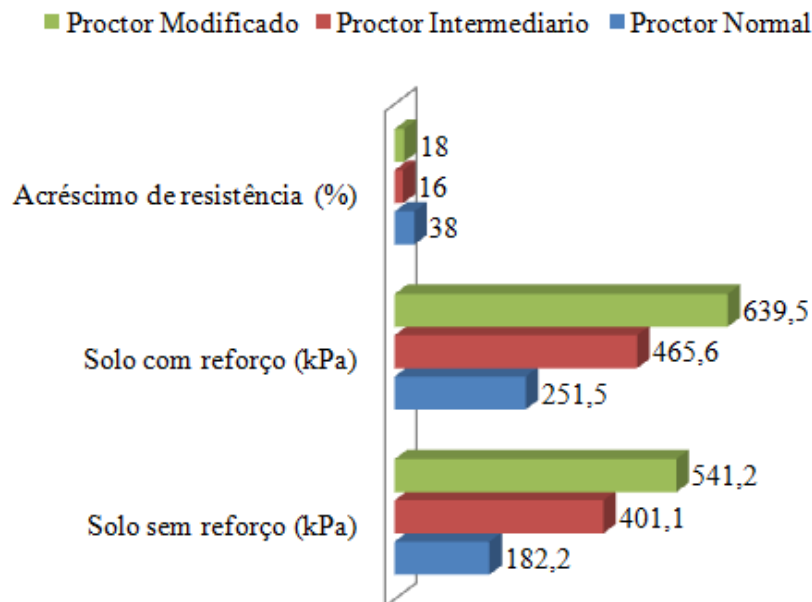


Figura 4. Resistência à compressão simples do solo vermelho compactado, com e sem reforço geossintético, a diferentes energias de compactação.

Para o solo estudado e para o reforço geossintético empregado, nota-se que o acréscimo de resistência devido à inserção do reforço, ainda que verificado para todas as energias aplicadas, não foi proporcional ao aumento dessa energia, visto que o acréscimo proporcionado pela energia Proctor Normal foi superior ao proporcionado pelas demais energias. Isso reforça o caráter particular da combinação tipo de solo-tipo de reforço-tipo de energia na mobilização da resistência mecânica do sistema solo-reforço geossintético.

4 CONCLUSÕES

Considerando-se os resultados obtidos no presente programa de pesquisa, observou-se que, fixando-se a energia de compactação (Proctor Normal) e o tipo de reforço geossintético (geotêxtil não tecido), os respectivos incrementos de resistência mecânica dos solos compactados devidos à inserção do reforço foram dependentes do tipo de solo, incluindo situações em que esse incremento foi desprezível (solo amarelo). Para os casos em que o tipo de solo (solo vermelho) e o tipo de reforço geossintético (geotêxtil não tecido) foram fixados, variando-se a energia de compactação, constatou-se que os acréscimos de resistência proporcionados pelo reforço não

foram proporcionais ao aumento da energia de compactação. Essas constatações experimentais realçam que, para os tipos particulares de ensaio mecânico e de reforço considerados nessa pesquisa, a resposta mecânica do sistema solo compactado-reforço dependeu do tipo de solo considerado e da energia de compactação adotada no ensaio, reforçando a interferência desses fatores na interação solo-reforço entre os materiais envolvidos no programa experimental.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à UFSJ, à Ober S.A. Indústria e Comércio e ao CNPq pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 6457/1986 – Amostra de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 7181/1984 – Análise Granulométrica.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 6508/1984 – Determinação da Massa Específica.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 7180/1984 – Solo - Determinação do Limite de Plasticidade.

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas:
NBR 6459/1984 – Solo - Determinação do Limite de Liquidez.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas:
NBR 9895/87 -Ensaio de Compactação.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas:
NBR 12025/90 –Solo-Cimento - Ensaio de Compressão Simples de Corpos-de-Prova Cilíndricos.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas:
NBR 9895 – Índice de Suporte Califórnia.
- Ante, J.R.O (2012). Geossintéticos como reforço de revestimentos em pavimentação. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Universidade de Brasília, Brasília, 116pg.
- Balbo, J. T. (2007). Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. Oficina de Textos, 558p.
- Bernucci, L.B.; Motta, L.M.G.; Ceratti, J.A.P.; Soares, J.B. (2008).Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. PETROBRAS: ABEDA, 504p.
- Croney, D. (1977).The design and performance of road pavements.London: HerMajesty'sStationery Office, 1977.
- Haas, R.; Hudson, W.R. (1978).Pavement management systems. New York, McGraw-Hill Book Company, 1978. 455p.
- Santos, A. L. (2013). Caracterização do comportamento mecânico de misturas de solo-escória de aciaria-cinza volante visando a aplicação em pavimentação. Dissertação de Mestrado em Ciências. Universidade Federal de São João del Rei, Ouro Branco-MG, 183pg.