



Revista Árvore

ISSN: 0100-6762

r.arvore@ufv.br

Universidade Federal de Viçosa  
Brasil

Cardoso Machado, Carlos; Pereira, Reginaldo Sérgio; Cardoso de Lima, Dario; Braz de Carvalho, Carlos Alexandre; Machado Pires, Danuse  
Caracterização tecnológica de misturas solo-grits para pavimentos de estradas florestais: influência do tratamento térmico do grits na resistência mecânica das misturas  
Revista Árvore, vol. 31, núm. 3, maio-junho, 2007, pp. 487-494  
Universidade Federal de Viçosa  
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48831314>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica  
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# **CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MISTURAS SOLO-GRITS PARA PAVIMENTOS DE ESTRADAS FLORESTAIS: INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO DO GRITS NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS MISTURAS<sup>1</sup>**

Carlos Cardoso Machado<sup>2</sup>, Reginaldo Sérgio Pereira<sup>3</sup>, Dario Cardoso de Lima<sup>4</sup>, Carlos Alexandre Braz de Carvalho<sup>4</sup> e Danuse Machado Pires<sup>5</sup>

**RESUMO** – Analisou-se a influência do tratamento térmico do resíduo grits na resistência mecânica de misturas solo-grits para aplicações em pavimentos de estradas florestais. O programa de ensaios de laboratório englobou: (i) dois solos residuais de gnaiss da Zona da Mata Norte de Minas Gerais; (ii) um resíduo da indústria da celulose denominado grits, que é composto de cal não-hidratada e areia, entre outros produtos; (iii) amostras de grits submetidas ao tratamento térmico em mufla sob temperaturas de 600, 700, 800 e 900 °C antes da moldagem dos corpos-de-prova das misturas solo-grits; (iv) corpos-de-prova das misturas preparadas com o grits tratado termicamente, com 24% de grits em relação ao peso seco dos solos, compactados nas energias dos ensaios Proctor intermediário e modificado e curados por 7 e 28 dias em câmara úmida, sob condições de aproximadamente 22 °C de temperatura e 100% de umidade relativa do ar; e (v) imersão completa dos corpos-de-prova das misturas solo-grits em água, pelo período de quatro horas, antes da determinação de suas resistências em ensaios de compressão não-confinada. Os resultados do programa de ensaios de laboratório indicaram que o tratamento térmico produziu amostras de grits mais reativas, podendo-se associar melhor desempenho mecânico às temperaturas de 800 e 900 °C para o solo 1 e 800 °C para o solo 2.

**Palavras-chave:** Estabilização de solos, resíduo grits e tratamento térmico.

## ***TECHNOLOGICAL CHARACTERIZATION OF SOIL-GRITS MIXTURES FOR FOREST ROAD PAVEMENTS: INFLUENCE OF GRITS THERMAL TREATMENT ON THE MECHANICAL STRENGTH OF MIXTURES***

**ABSTRACT** – *The objective of this paper was to analyze the influence of grits thermal treatment on the mechanical strength of soil-grits mixtures. The laboratory testing program included: (i) two residual gneiss soils from the Zona da Mata, Northern Minas Gerais; (ii) waste from the cellulose industry, namely grits, composed by non-hydrated lime and sand, among others by-products; (iii) grits samples submitted to thermal treatment in a muffle at the temperatures of 600, 700, 800 and 900 °C before soils-grits specimens preparation; (iv) soils-grits specimens containing 24% of treated grits in relation to soil dry unit compacted at the intermediate and modified Proctor compaction test, and cured during 7 and 28 days in a moist room at the temperature of 22 °C and relative humidity close to 100 %; and (v) complete immersion of cured specimens in water (4 hours) before testing for compressive strength using the unconfined compression test. Data from the laboratory testing program support that: (i) thermal treatment produced more reactive grits samples; and (ii) best soils-grits mechanical responses were associated to grits treatment temperatures of 800 and 900 °C for soil 1, and to 800 °C for soil 2.*

**Keywords:** *Soils stabilization, grits waste and thermal treatment.*

<sup>1</sup> Recebido em 07.07.2006 e aceito para publicação em 12.03.2007.

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa. E-mail: <machado@ufv.br>.

<sup>3</sup> Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília. E-mail: <reginaldos@unb.br>.

<sup>4</sup> Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa. E-mail: <declima@ufv.br>; <cabraz@ufv.br>.

<sup>5</sup> Bolsista de Iniciação Científica da FAPEMIG.

## 1. INTRODUÇÃO

Toneladas de resíduos são geradas pela indústria de celulose e papel, sendo cada um desses possuidores de composição química das mais variadas possíveis (CPRH, 1998). A finalidade final de tais resíduos, quando não são reaproveitados no processo industrial, são os aterros industriais. Consoli (2003) chamou a atenção para a disposição de resíduos em aterros, descrevendo que, além do limitado espaço para a disposição, incorrem os riscos ambientais passíveis de ocorrência, como contaminações do solo e do lençol freático.

Matos et al. (1996) mencionaram que, devido às necessidades de se encontrarem alternativas para a disposição dos resíduos gerados no processo industrial de celulose, estudos de técnicas de manejo, bem como a sua aplicação, devem ser executados de forma a permitir a incorporação segura ao solo, com o mínimo impacto sobre o meio ambiente. Segundo Albuquerque et al. (2002), certos resíduos estão sendo utilizados por produtores rurais com o objetivo de correção da acidez do solo, pelo fato de apresentarem hidróxido em suas composições. Os referidos autores ressaltaram, também, que nenhum critério é adotado para quantificar a dose a ser aplicada, o que pode comprometer as propriedades físicas e químicas do solo. Estudos nesse sentido foram desenvolvidos por Bellote et al. (1998), que apontaram para uma geração de 48 Mg de resíduos para cada 100 Mg de celulose produzida, destacando a inviabilidade da opção de disposição em aterro devido aos altos custos para implantação e manutenção e aos cuidados especiais no manuseio.

Resultados de estudos sobre a aplicabilidade do resíduo grits da indústria de celulose na estabilização de solos, com vistas à melhoria de subleitos de estradas florestais, foram apresentados por Pereira et al. (2006). Em prosseguimento a esses estudos, neste artigo, objetivou-se analisar a influência do tratamento térmico do resíduo grits na resistência mecânica de misturas solo-grits após a compactação, cura e imersão em água, para aplicações em pavimentos de estradas florestais.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Material

Duas amostras de solo foram utilizadas neste estudo, representando solos residuais característicos da microrregião de Viçosa, MG, sendo designados por solo 1 e solo 2. De acordo com Ferraz (1996), a amostra 1, de avançada evolução pedológica, é classificada como Latossolo variação Una, profundo, bem drenado, proveniente do intemperismo de gnaisses, de ocorrência nas encostas mais suavizadas e com predominância da composição mineralógica presente nos argilominerais 1:1 e sesquióxidos de ferro e alumínio. O solo 2 é arenoso, de origem saprolítica, quartzoso, com horizonte C profundo e coloração acinzentada (FERRAZ, 1996). A Tabela 1 traz as características físicas dessas amostras, bem como as respectivas classificações rodoviárias pelo sistema americano Transportation Research Board (TRB). Ressalta-se que, segundo as especificações técnicas do Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transportes (DNIT), constantes em seu manual de 1996, os solos 1 e 2, em suas formas naturais, não apresentam os valores mínimos de capacidade de suporte CBR (80%) para serem empregados como camada de base de pavimentos rodoviários, mesmo quando de compactação em energia modificada.

Empregou-se, também, uma amostra do resíduo sólido industrial grits, obtida do processo de recuperação da soda cáustica durante a extração de celulose de madeira de eucalipto, que foi fornecida pela empresa CENIBRA S.A., situada na microrregião de Ipatinga, MG. O grits é constituído por areia, pedregulho, calcário ( $\text{CaCO}_3$ ) e outras impurezas que não reagiram no processo, podendo possuir, também, quantidades de  $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Esse resíduo foi coletado no pátio da empresa, imediatamente, à sua geração, em virtude da possível alteração de sua constituição química decorrente da exposição às intempéries climáticas no aterro industrial onde é depositado. Na Tabela 2, encontram-se os principais componentes químicos desse resíduo; resalta-se que 42% do cálcio presente no grits encontra-se na forma de óxido de cálcio e o restante na forma de carbonato de cálcio, segundo dados de Machado et al. (2003).

**Tabela 1** – Índices físicos e classificação TRB dos solos de Viçosa, MG  
**Table 1** – Physical index and TRB classification for soils from Viçosa, MG

Solo	Granulometria (%)			$\gamma_s$ * (kN/m <sup>3</sup> )	Limites de Atterberg (%)		Classificação TRB
	Areia	Silte	Argila		LL	IP	
1	23	7	70	27,63	73	33	A-7-5 (20)
2	72	22	6	27,01	27	10	A-2-4 (0)

\*Peso específico dos sólidos.

**Tabela 2** – Principais componentes químicos do resíduo grits  
**Table 2** – Main chemical compounds of the grits waste

Constituinte Químico	P	K	Na	Ca	Mg	S	Al
(%)	0,26	0,12	0,70	53,50	0,60	0,18	0,09

Fonte: Machado et al., 2003.

## 2.2. Metodologia de laboratório

### 2.2.1. Teor de resíduo e tratamentos térmicos

Nas misturas solo-grits, utilizou-se o teor de 24% de grits, calculado em relação à massa de solo seco. Esse teor está associado aos melhores resultados de resistência mecânica encontrados por Pereira et al. (2006), em que as misturas solo-grits apresentaram os maiores valores para o Índice de Suporte Califórnia (CBR), suplantando, no caso da mistura solo 2+24% grits, o valor recomendado pelo DNIT para material a ser empregado em camada de base de pavimentos rodoviários. Com relação aos tratamentos térmicos, o grits foi submetido às temperaturas de 600, 700, 800 e 900 °C, definidas em função dos resultados de resistência mecânica encontrados por Machado et al. (2003) no emprego de grits, tratado termicamente, em mistura com um solo 1. A seqüência de tratamento térmico do grits foi: (i) espalharam-se 10 kg de grits em uma bandeja de aço inoxidável e colocou-se o conjunto em uma mufla, com controle interno de temperatura e tempo; e (ii) atingida automaticamente a temperatura requerida, o grits permanecia exposto a ela pelo tempo de 1 h e era retirado da mufla, após o seu esfriamento até a temperatura ambiente. As perdas de massa de grits em cada tratamento térmico encontram-se na Tabela 3.

**Tabela 3** – Perda de massa, em %, do resíduo grits tratado termicamente

**Table 3** – Mass detriment, in %, of the thermally treated grits waste

Perda de Massa (%)	Tratamento Térmico (°C)			
	600	700	800	900
Água*	9,09	9,09	9,09	9,09
Outras**	1,15	2,69	4,33	10,03
Total	10,24	11,78	13,42	19,12

\*O grits se encontrava com 10% de umidade. \*\*Perdas por calcinação (redução do carbonato de cálcio, presente no grits, em óxido de cálcio, pela eliminação do CO<sub>2</sub>).

### 2.2.2. Preparação das misturas solo-grits

Adicionaram-se 24% de grits aos solos 1 e 2, procedeu-se à homogeneização manual e peneiramento (#4,8 mm), e acrescentou-se água, seguida por nova homogeneização manual e peneiramento, em quantitativos referentes ao teor de umidade ótima ( $W_{ot}$ ) determinado nos ensaios de compactação realizados por Pereira (2005), referentes às energias intermediária e modificada. Os parâmetros ótimos de compactação ( $W_{ot}$  e  $\gamma_{dmax}$ ) dos solos e das misturas solo + 24% grits, obtidos por Pereira (2005), encontram-se na Tabela 4. As misturas assim produzidas foram acondicionadas em sacolas plásticas, que foram hermeticamente fechadas e deixadas em repouso pelo período de 4 h antes da compactação, em se tratando das misturas solo 1-grits, e compactadas imediatamente após a mistura, no caso das misturas solo 2-grits. Esses tempos entre a mistura e a compactação estão associados aos maiores valores de resistência mecânica encontrados por Pereira et al. (2006) nas misturas solo-grits.

### 2.2.3. Moldagem dos corpos-de-prova

Preparadas as misturas solo-grits passou-se a etapa de compactação dos corpos-de-prova nos parâmetros ótimos ( $W_{ot}$  e  $\gamma_{dmax}$ ) apresentados na Tabela 4, nas energias de compactação intermediária e modificada. Os corpos-de-prova foram compactados no molde cilíndrico do ensaio de compactação Proctor ( $\phi = 100$  mm e  $h = 127,3$  mm) por processo dinâmico, em camadas iguais, com um soquete de massa igual a 4,536 kg e altura de queda de 467,2 mm. Obedeceu-se à Norma do DNIT referente ao ME-202 de 1994, na qual se determina que, para compactação na energia intermediária, devem-se aplicar 21 golpes, com o referido soquete, em três camadas no cilindro de Proctor, e 27 golpes, em cinco camadas no cilindro Proctor, para se atingir a energia modificada. Os corpos-de-prova foram moldados em tréplica, para cada tratamento, sendo fixados os seguintes limites para sua aceitação, de acordo com a recomendação da Norma DNIT-ME 202/94: (i)  $W_{ot} = \pm 0,50\%$ ; e (ii)  $\gamma_{dmax} = \pm 0,30$  kN.m<sup>-3</sup>. Caso contrário, procedeu-se a moldagem de três novos corpos-de-prova.

### 2.2.4. Cura e imersão em água dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova moldados foram embalados em sacolas plásticas, que foram hermeticamente fechadas e identificadas, e submetidos a períodos de cura, em câmara climatizada com umidade relativa do ar superior

a 95%, pelos períodos de 7 e 28 dias. Antes da ruptura em prensa específica, os corpos-de-prova foram submetidos, ainda, a dois tratamentos: (i) imersão em água pelo período de 4 h, segundo a recomendação da norma do DNIT (1994a); e (ii) rompimento sem a fase de imersão em água.

### 2.2.5. Determinação da resistência mecânica

Para a determinação da resistência mecânica dos corpos-de-prova, curados e submetidos às condições de saturação, fez-se uso do ensaio de compressão não-confinada, segundo a metodologia proposta pelo DNIT (1994a). A obtenção do valor de RCNC (*resistência à compressão não-confinada*) foi realizada pela média aritmética das tensões de ruptura dos três corpos-de-prova rompidos em prensa de compressão simples, com velocidade de 1,25 mm.min<sup>-1</sup>, sendo a aquisição de dados obtida através da leitura em extensômetros com precisão de 0,01 mm, admitindo-se uma tolerância de  $\pm 10\%$  em torno da média. Caso contrário, três novos corpos-de-prova foram novamente confeccionados.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Avaliação da resistência mecânica

As resistências mecânicas das misturas solo-grits, envolvendo o grits tratado e não-tratado termicamente, podem ser analisadas pelos valores de RCNC apresentados na Tabela 5, que se referem às misturas compactadas na energia intermediária e curadas a sete dias. Em todas as misturas solo 1-grits (tratado termicamente), os valores de RCNC foram maiores do que o valor encontrado na mistura solo 1-grits (sem tratamento térmico). Somente a partir da mistura com grits tratado a 700 °C foram notados incrementos de resistência mecânica em relação ao solo 1, em sua forma natural, sendo o maior incremento na mistura com grits tratado a 800 °C (39%). Com relação à resistência mecânica das misturas solo 2-grits (tratado termicamente), com exceção da mistura com grits tratado a 900 °C, em todas

as demais se observaram valores de RCNC superiores ao da mistura envolvendo o grits em sua forma pura. Acredita-se que, na mistura solo 2-grits (tratado a 900 °C), a exposição do resíduo a essa temperatura levou à queima de partículas do grits, ultrapassando a temperatura de ocorrência da reação de calcinação. A RCNC do solo 2 (168 kPa), em sua forma natural, foi potencializada pela adição de grits (tratado termicamente), sendo o maior incremento atingido para a mistura solo 2-grits (tratado a 800 °C), em que a RCNC foi de 828 kPa.

### 3.2. Influência da energia de compactação

Os valores de RCNC das misturas solo-grits (tratado e não-tratado termicamente), quando compactadas na energia modificada e curadas a sete dias, são apresentados na Tabela 6. Nas misturas solo 1-grits (tratado termicamente), o aumento do esforço de compactação levou a incrementos superiores a 100% nos valores de RCNC encontrados nessas misturas compactadas na energia intermediária. O máximo valor de RCNC foi obtido na mistura com grits tratado a 800 °C (1.630 kPa), em que ocorreu um ganho de 86% em relação ao valor encontrado no solo 1 (877 kPa), em sua forma natural, compactado na energia modificada.

As misturas solo 2-grits (tratado termicamente) tiveram o seguinte comportamento decorrente do aumento da energia de compactação: (i) incrementos nos valores de RCNC nas misturas contendo grits tratado a 600, 700 e 800 °C, que foram inversamente proporcionais à maior temperatura de exposição do resíduo; (ii) queda brusca na mistura com grits tratado a 900 °C; (iii) com exceção da mistura com grits a 900 °C, nos demais tratamentos térmicos foram observados valores de RCNC superiores ao encontrado na mistura contendo grits não-tratado; e (iv) em comparação com o valor de RCNC do solo 2 (292 kPa), em sua forma natural, compactado na energia modificada, as misturas solo 2-grits (tratado termicamente a 600, 700 e 800 °C) proporcionaram incrementos de até 200% nesse índice, caso da mistura com grits tratado a 800 °C.

**Tabela 4** – Parâmetros ótimos de compactação das misturas solo-grits  
**Table 4** – Optimum compaction parameters for soil-grits mixtures

Misturas	Energia de Compactação			
	Intermediária		Modificada	
	W <sub>ot</sub> (%)	$\gamma_{dmax}$ (kN.m <sup>-3</sup> )	W <sub>ot</sub> (%)	$\gamma_{dmax}$ (kN.m <sup>-3</sup> )
Solo 1 Natural	28,87	14,58	26,49	15,37
Solo 1 + 24 % grits	25,85	15,20	22,75	16,16
Solo 2 Natural	11,38	18,33	9,90	19,01
Solo 2 + 24 % grits	12,37	18,13	11,24	18,59

**Tabela 5** – RCNC média, em kPa, das misturas solo + 24% grits (tratado termicamente e não-tratado) compactadas na energia intermediária e curadas a sete dias*Table 5* – UCS average, in kPa, for soil + 24% grits (thermally treated and non-treated) compacted at intermediate effort and cured for 7 days

Grits (Tratamentos Térmicos)	Mistura Solo 1 - Grits RCNC		Mistura Solo 2 - Grits RCNC	
	Valor em kPa	% Ganho**	Valor em kPa	% Ganho**
STT*	189,26	-	276,04	64,47
600 °C	369,57	-	389,60	132,12
700 °C	492,99	14,57	619,38	269,03
800 °C	596,92	38,72	828,14	393,41
900 °C	565,13	31,33	216,44	28,96

\*Sem tratamento térmico. \*\*Em relação ao solo em sua forma natural compactado na energia do ensaio Proctor intermediário.

**Tabela 6** – RCNC média, em kPa, das misturas solo + 24% grits (tratado termicamente e não- tratado) compactadas na energia modificada e curadas a sete dias*Table 6* – UCS average, in kPa, for soil + 24% grits (thermally treated and non-treated) compacted at modified effort and cured for 7 days

Grits (Tratamentos Térmicos)	Mistura Solo 1 - Grits RCNC			Mistura Solo 2 - Grits RCNC		
	Valor em kPa	% Ganho		Valor em kPa	% Ganho	
		SN**	EI***		SN**	EI***
STT*	297,07	-	56,96	542,34	85,99	96,47
600 °C	1175,70	34,02	218,13	742,26	154,55	90,52
700 °C	1042,28	18,81	111,42	783,36	168,64	26,47
800 °C	1633,35	86,19	173,62	902,55	209,52	8,99
900 °C	1413,76	61,16	150,17	106,59	-	-

\*Sem tratamento térmico. \*\*Em relação ao solo em sua forma natural, compactado na energia do ensaio Proctor Modificado. \*\*\*Em relação à energia do ensaio Proctor Intermediário.

### 3.3. Influência do período de cura

Os resultados dos ensaios de compressão não-confinada das misturas solo-grits (tratado e não-tratado termicamente) compactadas e curadas a 28 dias encontram-se na Figura 1. Nessa figura, em cada barra vertical são representadas as taxas, em porcentagem, de incremento (+) ou redução (-) dos valores de RCNC, em relação as essas mesmas misturas curadas a sete dias. Foram observadas nas misturas solo 1-grits (tratado termicamente a 600, 700 e 800 °C) reduções nos valores de RCNC, devido ao aumento do período de cura de 7 para 28 dias, tanto para compactação na energia intermediária quanto modificada, conforme os dados ilustrados na Figura 1a; na mistura com grits tratado a 600 °C, foi observada a redução mais significativa (40%). Comportamento distinto apresentou a mistura solo 1-grits tratado a 900 °C, ou seja, ocorreram incremento na resistência mecânica dessas misturas quando curadas a 28 dias; as taxas de incrementos foram, respectivamente, de 180 e 110%, nas energias intermediária e modificada,

sendo nesta última atingido o valor de RCNC de 3.000 kPa. O comportamento das misturas solo 2-grits (tratado termicamente) compactadas e curadas a 28 dias pode ser descrito, de acordo com os dados da Figura 1b, da seguinte forma: (i) observaram-se incrementos nos valores de RCNC, em comparação com as misturas curadas a sete dias, somente a partir da mistura com grits tratado a 700 °C; (ii) maiores taxas de incremento foram obtidas na mistura solo 2-grits tratado a 900 °C, as quais, compactadas na energia intermediária, tiveram incrementos de resistência de 250% e, na modificada, de 590%, em comparação com as mesmas misturas curadas a sete dias; e (iii) os maiores valores de RCNC foram notados nas misturas solo 2-grits tratado a 800 °C, compactada tanto na energia intermediária (1.330 kPa) quanto na modificada (1.300 kPa).

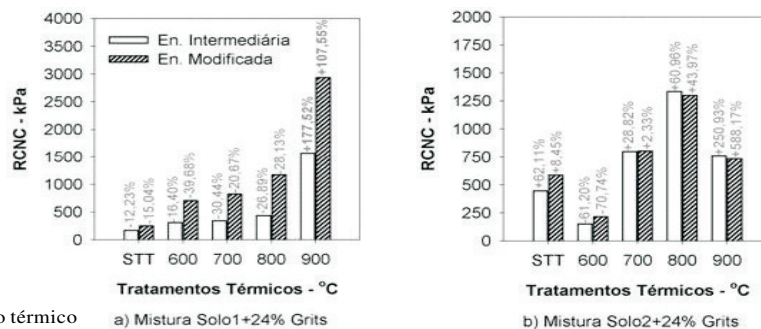
### 3.4. Resistência em condição de saturação

Nas Figuras 2 e 3, encontram-se os resultados dos ensaios de compressão não-confinada nas misturas solo-grits (tratado termicamente e não-tratado)



compactadas, curadas e submetidas à fase de imersão, em água, pelo período de 4 h. Nessas figuras, acima das barras verticais se encontram as reduções, em porcentagem, dos valores de RCNC obtidos de corpos-de-prova rompidos sem a fase de imersão em água. As misturas solo 1-grits (tratado termicamente) tiveram os seguintes comportamentos, como pode ser observado pela Figura 2: (i) compactadas na energia intermediária, curadas a sete dias e imersas em água por 4 h, a melhor resposta de resistência obtida foi na mistura com grits tratado a 700 °C (RCNC = 280 kPa), sendo as taxas de reduções nos valores de RCNC, devido à imersão em água, das misturas com grits tratado a 600, 700, 800 e 900 °C, de 24, 36, 55 e 74%, respectivamente; (ii) compactadas na energia intermediária, curadas a 28 dias e imersas em água por 4 h, a melhor resposta de resistência obtida foi na mistura com grits tratado a 900 °C (RCNC = 1.000 kPa), sendo as taxas de reduções nos valores de RCNC, devido à imersão em água das misturas

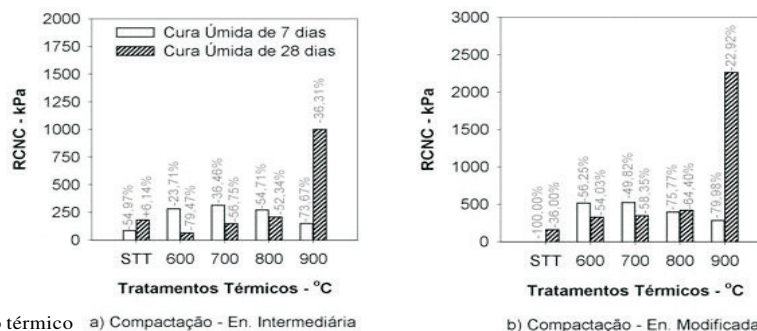
com grits tratado a 600, 700, 800 e 900 °C, de 80, 57, 52 e 36%, respectivamente; (iii) compactadas na energia modificada, curadas a sete dias e imersas em água por 4 h, as melhores respostas de resistência obtidas foram nas misturas com grits tratado a 600 e 700 °C (RCNC = 550 kPa), sendo as taxas de reduções nos valores de RCNC, devido à imersão em água das misturas com grits tratado a 600, 700, 800 e 900 °C, de 56, 50, 76 e 80%, respectivamente. Ressalta-se, nesse tratamento, que nas misturas solo 1 + grits (sem tratamento térmico) ocorreram perdas totais de integridade dos corpos-de-prova quando imersos em água; e (iv) compactadas na energia modificada, curadas a 28 dias e imersas em água por 4 h, a melhor resposta de resistência obtida foi na mistura com grits tratado a 900 °C (RCNC = 2.300 kPa), sendo as taxas de reduções nos valores de RCNC devidas à imersão em água das misturas com grits tratado a 600, 700, 800 e 900 °C, de 54, 58, 64 e 23%, respectivamente.



STT - Sem tratamento térmico

**Figura 1** – RCNC média, em kPa, das misturas solo + 24% grits (tratado termicamente e não- tratado) compactadas nas energias intermediária e modificada e curadas a 28 dias.

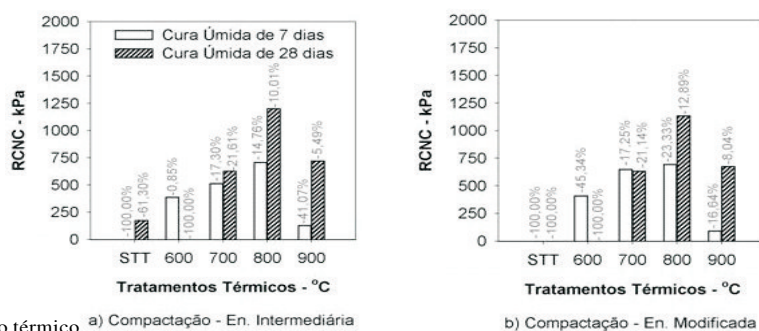
**Figure 1** – UCS average, in kPa, for soil + 24% grits (thermally treated and non-treated) compacted at intermediate and modified effort, and cured for 28 days.



STT - Sem tratamento térmico

**Figura 2** – RCNC média, em kPa, das misturas solo 1 + 24 % grits (tratado termicamente e não-tratado) compactadas, curadas e imersas por quatro horas em água.

**Figure 2** – UCS average, in kPa, for soil 1 + 24 % grits (thermally treated and non-treated) compacted, cured and submersion in water for 4 hours.



STT - Sem tratamento térmico a) Compactação - En. Intermediária

b) Compactação - En. Modificada

**Figura 3** – RCNC média, em kPa, das misturas solo 2 + 24% grits (tratado termicamente e não-tratado) compactadas, curadas e imersas por quatro horas em água.

**Figure 3** – UCS average, in kPa, for soil 2 + 24% grits (thermally treated and non-treated) compacted, cured and submersion in water for 4 hours.

As misturas solo 2-grits (tratado termicamente) tiveram os seguintes comportamentos, como observados na Figura 3: (i) compactadas na energia intermediária, curadas a sete dias e imersas em água por 4 h, a melhor resposta de resistência obtida foi na mistura com grits tratado a 800 °C (RCNC = 750 kPa), sendo as taxas de reduções nos valores de RCNC, devido à imersão em água das misturas com grits tratado a 600, 700, 800 e 900 °C, de 1, 17, 15 e 41%, respectivamente. Ressalta-se que, na mistura solo 2-grits (sem tratamento térmico), os corpos-de-prova não suportaram a imersão; (ii) compactadas na energia intermediária, curadas a 28 dias e imersas em água por 4 h, a melhor resposta de resistência obtida foi para a mistura com grits tratado a 800 °C (RCNC = 1.200 kPa), sendo as taxas de reduções nos valores de RCNC, devido à imersão em água das misturas com grits tratado a 600, 700, 800 e 900 °C, de 100 (perda de integridade total), 22, 10 e 5%, respectivamente; (iii) compactadas na energia modificada, curadas a sete dias e imersas em água por 4 h, a melhor resposta de resistência obtida foi na mistura com grits tratado a 800 °C (RCNC = 750 kPa), sendo as taxas de reduções nos valores de RCNC devidas à imersão em água das misturas com grits tratado a 600, 700, 800 e 900 °C, de 45, 17, 23 e 17%, respectivamente. Ressalta-se nesse tratamento que, nas misturas solo 1 + grits (sem tratamento térmico), ocorreram perdas totais de integridade dos corpos-de-prova quando imersos em água; e (iv) compactadas na energia modificada, curadas a 28 dias e imersas em água por 4 h, a melhor resposta de resistência obtida foi na mistura com grits tratado a 800 °C (RCNC = 1.150 kPa), sendo as taxas de reduções

nos valores de RCNC devidas à imersão em água das misturas com grits tratado a 600, 700, 800 e 900 °C, de 100 (perda total de integridade) 21, 13 e 8%, respectivamente. Também, nesse tratamento, as misturas solo 1 + grits (sem tratamento térmico) não suportaram a imersão em água.

#### 4. CONCLUSÃO

O tratamento térmico do resíduo grits tornou-o mais reativo para a estabilização dos solos, principalmente nas temperaturas de 800 e 900 °C, devido às reações de calcinação que ocorreram nesse intervalo, o que ficou evidenciado pelos resultados dos ensaios de compressão não-confinada realizados com as misturas solo + 24% grits (tratado termicamente). A resistência mecânica dessas misturas foi influenciada pela temperatura de exposição do grits, tipo de solo, energia de compactação, período de cura e pela imersão em água. Nas misturas solo 1-grits (tratado termicamente), as melhores respostas de resistência mecânica foram nos seguintes tratamentos: (i) grits tratado a 800 °C, mistura compactada na energia modificada, período de cura de sete dias (RCNC = 1.633 kPa); e (ii) grits tratado a 900 °C, mistura compactada na energia modificada, período de cura de 28 dias (RCNC = 3.000 kPa). De forma análoga, nas misturas solo 2-grits (tratado termicamente) as melhores respostas foram: (i) grits tratado a 800 °C, mistura compactada na energia intermediária, período de cura de 28 dias (RCNC = 1.330 kPa); e (ii) grits tratado a 800 °C, mistura compactada na energia modificada, período de cura de 28 dias (RCNC = 1.300 kPa).



## 5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e à FAPEMIG, pelo apoio financeiro a este projeto, bem como à CAPES e à UFV, respectivamente, pela concessão de bolsa de doutorado e pelas instalações físicas para a execução deste trabalho. Também, à empresa CENIBRA S.A., pelo fornecimento do resíduo grits.

## 5. REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J.A. et al. Propriedades físicas e químicas de solos incubados com resíduo alcalino da indústria de celulose. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.1065-1073, 2002.
- BELLOTE, A. F. J. et al. Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n.37, 1998. p.99-106.
- COMPANIA PERNAMBUCANA DE MEIO AMBIENTE - CPRH. **Roteiro complementar de licenciamento e fiscalização**: indústria de papel e celulose. Recife: Publicações Projeto CPRH/GPZ, 1998. 95p.
- CONSOLI, N. C. Processamento e utilização geotécnica de resíduos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL – REGEO, 2003, Porto Alegre **Anais...** Porto Alegre: 2003. p.497-510.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **ME 201: Solo-cimento: compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos: Método de ensaio**. Rio de Janeiro: 1994a. 4p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. - **ME 202: Solo-cimento: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos: Método de ensaio**. Rio de Janeiro: 1994b. 7p.
- MACHADO, C. C.; PEREIRA, R. S.; PIRES, J. M. M. Influência do tratamento térmico do resíduo sólido industrial grits na resistência mecânica de um latossolo para pavimentos de estradas florestais. **Revista Árvore**, v.27, n.4, p.543-550, 2003.
- MATOS, A. T.; COSTA, L. M. Lixiviação do resíduo do branqueamento da celulose em colunas de solo. **Revista Árvore**, v. 20, n.2, p.171- 177, 1996.
- PEREIRA, R. S.; MACHADO, C. C.; LIMA, D. C. Compactação de misturas solo-grits para emprego em estradas florestais: influência do tempo decorrido entre mistura e compactação na resistência mecânica. **Revista Árvore**, v.30, n.3, p.421-427, 2006.
- PEREIRA, R. S. **Viabilidade técnica do emprego de resíduos da indústria de celulose para construção de estradas florestais**. 2005. 330f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005.