

COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE MISTURAS GRANULOMÉTRICAS DE SOLO-GRITS¹

Carlos Cardoso Machado², Giovani Levi Santanna³, Dario Cardoso de Lima⁴, Carlos Alexandre Braz de Carvalho⁴, Reginaldo Sérgio Pereira⁵ e Dalila Campos de Medeiros Fernandes⁴

RESUMO – Neste artigo, analisa-se a influência das diversas frações granulométricas do resíduo *grits* nos parâmetros ótimos de compactação, resistência mecânica e expansão, quando em misturas com dois solos típicos da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, Brasil, com fins de aplicação em estradas florestais. Os teores de resíduo empregados nas misturas foram de 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 28%, em relação à massa seca de solos, trabalhando-se com as energias de compactação dos ensaios Proctor intermediário e modificado. As frações de resíduo estudadas foram as equivalentes à argila e silte ($d \leq 0,074$ mm), areia ($0,074 \text{ mm} \leq d \leq 2,0$ mm) e pedregulho ($2,0 \text{ mm} \leq d \leq 76$ mm), considerando-se a escala granulométrica adotada pelo DNIT (1996). Fez-se uso do ensaio de CBR para a avaliação da capacidade de suporte e expansão dos solos e misturas. Os resultados indicaram que a fração fina do *grits* é a que mais contribui para ganhos de resistência mecânica, evidenciando-se a sua importância na reatividade das misturas, sendo a fração pedregulho a menos influente no ganho de capacidade de suporte dos solos.

Palavras-chave: Estabilização de solos, resíduo industrial *grits* e granulometria.

MECHANICAL BEHAVIOR OF THE DIFFERENTS SOIL-GRITS GRANULOMETRICS MIXTURES

ABSTRACT – This paper addresses the influence of size distribution of the industrial waste named *grits* on the optimum compaction parameters, mechanical strength and swelling of two typical soils from the North Forest Zone of Minas Gerais State, Brazil, for forest road applications. Specimens compacted at the intermediate and modified Proctor compaction effort and waste contents of 4, 8, 12, 16, 20, 24 and 28 % regarding soil dry unit weights were used throughout the study. Waste sizes analyzed in the laboratory testing program were those equivalent to clay ($d \leq 0.074$ mm), silt ($0.074 \leq d \leq 2$ mm), sand ($d > 2$ mm) and gravel ($2 \text{ mm} \leq d \leq 76$ mm) sizes in accordance to the DNIT technical standard (DNIT, 1996). Soils and mixtures bearing capacity and swelling were evaluated by the CBR test. Data from the laboratory testing program support that the waste's clay and gravel size portions were responsible, respectively, for higher and lower increases in soils bearing capacity.

Keywords: Soil stabilization, industrial *grits* waste and grain size distributions.

1. INTRODUÇÃO

Na estabilização química de solos para fins rodoviários, determinado aditivo é incorporado a um solo, compactando-se posteriormente a mistura segundo determinados critérios técnicos, alcançando, assim, características desejáveis de resistência mecânica e durabilidade. Os mecanismos envolvidos nesse processo

podem ser os mais diversos possíveis. Segundo Lambe e Michaels (1954), os estabilizantes químicos quando adicionados aos solos podem atuar como agentes impermeabilizantes, dispersantes ou que agregam, modificando as suas propriedades físicas e, ou, químicas.

Com relação ao processo de estabilização, o conhecimento das frações granulométricas constitutivas

¹ Recebido em 05.03.2007 e aceito para publicação em 24.04.2009.

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

³ Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da UFV. E-mail: <ms25751@vicosa.ufv.br>.

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

⁵ Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília. E-mail: <reginaldosp@unb.br>.



das amostras de solo e do material estabilizante, bem como a caracterização química deste último, é essencial para o reconhecimento de um aditivo como agente de estabilização eficaz. Considerando esse aspecto, este artigo tem por finalidade analisar a influência da granulometria do resíduo industrial *grits* na resistência mecânica de misturas solo-*grits* compactadas, com base nos seus valores CBR e expansão.

2. MATERIALE MÉTODOS

2.1. Solos e *grits*

Trabalhou-se com dois solos da microrregião de Viçosa, Zona da Mata Norte de Minas Gerais, aqui denominados *Solos 1* e *2*. O solo 1 é um material laterítico argiloso, classificado como LG' pela Metodologia MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1995); o solo 2 é um material não laterítico arenoso, pertencente ao grupo NS' da mesma classificação.

O estabilizante químico dos solos ensaiado é o resíduo industrial denominado *grits*, que é gerado durante o processo de extração de celulose nas empresas que utilizam o processo Kraft. Ele é um material sólido, acinzentado, de granulometria ampla que engloba as frações pedregulho, areia, silte e argila, sendo classificado como classe II (ABNT, 1987), ou seja, material não inerte. O que despertou o interesse deste estudo foi o fato de o *grits* se tratar de um resíduo constituído de uma mistura de material, com destaque para a cal.

2.2. Traços e processamentos do *grits*

a) Fase 1 – Utilizaram-se duas amostras distintas de *grits*, para fins de identificação de sua granulometria e possíveis faixas de variação.

b) Fase 2 – Executaram-se misturas envolvendo os solos 1 e 2 e *grits*, mediante o emprego de sete teores crescentes de resíduo calculados em relação às massas secas dos solos, os quais foram: 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 28%. Os teores de umidade empregados foram os equivalentes às umidades ótimas e corpos-de-prova dos solos compactados na energia do ensaio Proctor normal. Após a mistura, as amostras solo-*grits* foram passadas na peneira de abertura nominal 2,0 mm (Nº 10) e deixadas para curar em câmara úmida, em sacos plásticos hermeticamente fechados por um período de sete dias. Depois da cura, as amostras foram

secas ao ar, obtendo-se as frações a serem empregadas nos ensaios de granulometria das misturas solo-*grits*.

c) Fase 3 – Determinou-se a capacidade de suporte das misturas via ensaio CBR, em trabalho com corpos-de-prova moldados com teores de resíduo de 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 28% em relação às massas de solos secos. Nessas misturas, empregou-se o resíduo sob duas formas, como se segue: (a) sem processamento, ou seja, da forma como foi fornecido pela empresa e (b) após sua passagem na peneira de abertura nominal de 2,0 mm (Nº 10), separando-se, assim, a fração equivalente ao pedregulho, que foi descartada, e usando as frações areia, silte e argila. Para os fins deste trabalho, a esse processo denominou-se processamento do *grits*.

d) Fase 4 – Empregaram-se os traços de 8, 16 e 24% de *grits* nas misturas; passou-se o resíduo nas peneiras de aberturas nominais de 2,0 mm (Nº 10) e 0,074 mm (Nº 200). A fração do resíduo que passou na peneira de Nº 10 ficou retido na peneira de Nº 200, que equivale à areia, empregada nos ensaios, bem como a fração que passou na peneira de Nº 200, equivalente a silte e argila, usados nos ensaios CBR nas composições apresentadas na Tabela 1.

2.3. Ensaios realizados

Para conhecer a contribuição das diferentes frações constitutivas do resíduo na estabilização das misturas solo-*grits*, procedeu-se à realização dos seguintes ensaios: (i) Fase 1 – realização de ensaios de granulometria conjunta com amostras de *grits*: (DNIT, 1994) – ME 051; (ii) Fase 2 – ensaios de granulometria conjunta com as misturas solo-*grits*: (DNIT, 1994) – ME 051; (iii) Fase 3 – ensaios de CBR_{5pontos}: com as misturas solo-*grits* (DNIT, 1994) – ME 049, para avaliação do comportamento dos parâmetros ótimos de compactação, resistência mecânica e expansão das misturas solo-*grits*, fazendo-se uso das energias de compactação referentes aos ensaios Proctor intermediário e Proctor modificado, não se realizando períodos de cura nos corpos-de-prova; e (iv) Fase 4 – ensaios de CBR_{1ponto}: (DNIT, 1994) – ME 049, para avaliação da reatividade da fração fina do resíduo *grits* nas misturas solo-*grits* compactadas na energia do Proctor intermediário, e curadas por 28 dias em câmara úmida, objetivando permitir possíveis ocorrências de reações químicas, em especial reações pozolânicas.

Tabela 1 – Composições granulométricas do *grits*
Table 1 – *Grits granulometric compositions*

Composição	% Resíduo <i>Grits</i>	
	Entre a # 2,0 mm e a # 0,074 mm	Processado na # 0,074 mm
I	100	0
II	87,5	12,5
III	75	25
IV	50	50
V	0	100

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Granulometria do *grits* e das misturas solo-*grits*

A Figura 1 mostra a curva granulométrica do *grits*; em seu item (a), observa-se o pouco efeito dispersante proporcionado na sedimentação das partículas pelo hidróxido de sódio e pelo hexametáfosfato de sódio. Esse fato pode ser explicado, em primeiro lugar, pelos quantitativos de defloculantes empregados, visto que são específicos para dispersão de partículas argilosas de solos; outro fato a relatar é a presença relativamente elevada de sódio (0,70%) já presente no resíduo, que o torna por si só altamente dispersivo.

Ainda pela Figura 1 (b), nota-se que o resíduo *grits* possui granulometria diversificada, com predominância de tamanho de partículas referentes à fração areia, cerca de 70% em termos médios. Esse material possui também: (i) frações mais grosseiras, representadas por cerca de 10% ou mais equivalentes a pedregulho, constituídas por materiais cristalizados de difícil quebra originados, provavelmente em

processos de resfriamento durante a sua geração na indústria e (ii) frações menores (silte: 15-25% e argila: < 5%).

O *grits* se assemelha, pela sua granulometria e características de plasticidade (NP), a um material classificado pelo sistema rodoviário americano TRB como A-2-4 (0), referente a uma areia siltosa; entretanto, seu uso em camadas constitutivas de pavimentos rodoviários em substituição a solos locais não parece recomendável, ou seja, por falta de ligação química entre as suas partículas ou pelos possíveis riscos ambientais passíveis de ocorrência devido à sua introdução em ecossistemas florestais. Contudo, o seu emprego como estabilizante químico respalda-se no fato de que na sua constituição há a presença de óxido de cálcio.

Para analisar as possíveis mudanças na granulometria dos solos 1 e 2 em decorrência da incorporação de *grits* nas suas massas na Figura 2, apresentam-se as suas curvas granulométricas. Na granulometria do solo 1, notou-se a presença de partículas maiores, principalmente as equivalentes à fração areia; o aumento do teor de *grits* proporcionou diminuição da fração argila de 70% para cerca de 50%. Entretanto, o comportamento textural do solo 1, ou seja, de material argilo-areno-siltoso, não foi alterado, ficando evidenciado que o período de cura de sete dias a que foram submetidas as misturas não fez que ocorresse aglomeração ou floculação das partículas argila desse solo, formando grumos maiores, e ele atuou apenas como um alterador físico da granulometria.

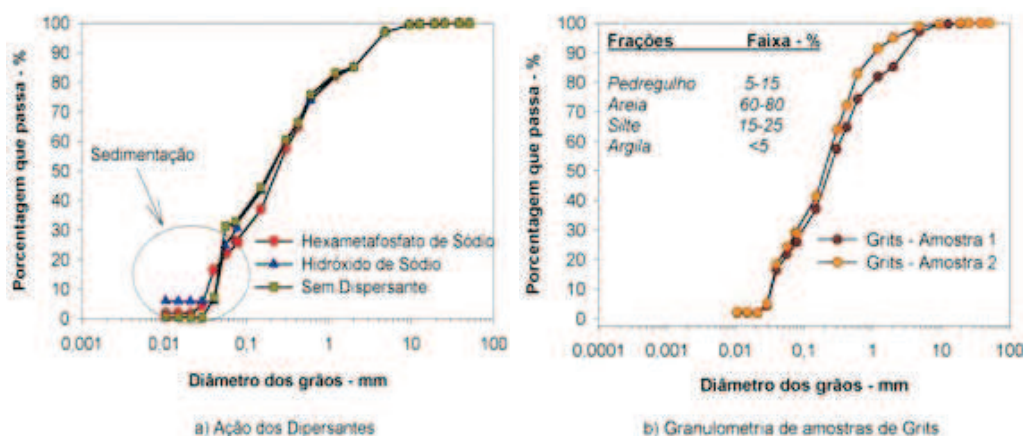


Figura 1 – Análise granulométrica do *grits*.
Figure 1 – *Grits granulometric analysis*.

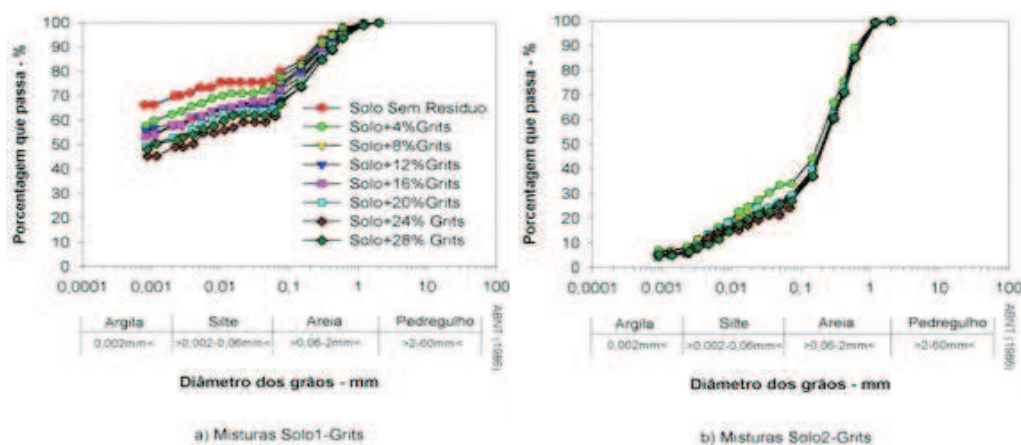


Figura 2 – Curvas granulométricas das misturas solo-grits.
 Figure 2 – Granulometric curves of the soil-grits mixtures.

As misturas solo 2-grits tiveram o mesmo comportamento granulométrico do solo sem adição de resíduo, qual seja, de material texturalmente areno-argilo-siltoso, evidenciando-se a não formação de particulados maiores; a granulometria do solo 2 e a do resíduo se aproximam muito, e a fração argila, responsável pelos fenômenos físico-químicos que ocorrem na superfície dos argilominerais, não é tão expressiva nesse solo.

3.2. Influência da fração grosseira do grits na capacidade de suporte e expansão das misturas solo-grits compactadas

Tomando os parâmetros ótimos de compactação, $W_{ót.}$ e $\gamma_{dmáx.}$, Figura 3, nota-se que os teores ótimos

de umidade das misturas solo 1-grits foram inferiores à do solo 1, em sua forma natural, e inversamente proporcionais ao aumento do teor de resíduo. Essas praticamente não se alteraram em decorrência do processamento do resíduo na peneira de abertura nominal de 2,0 mm, mesmo quando compactadas na energia modificada; nesse mesmo enfoque, os valores de pesos específicos secos máximos foram ligeiramente inferiores nas misturas com a fração do resíduo passado na peneira de 2,0 mm, considerando-se a compactação das misturas solo 1-grits na energia intermediária. Na energia modificada, os parâmetros ótimos de compactação não sofreram alterações significativas, para fins práticos, com pequenas discrepâncias para os teores de 20, 24 e 28% de resíduo.

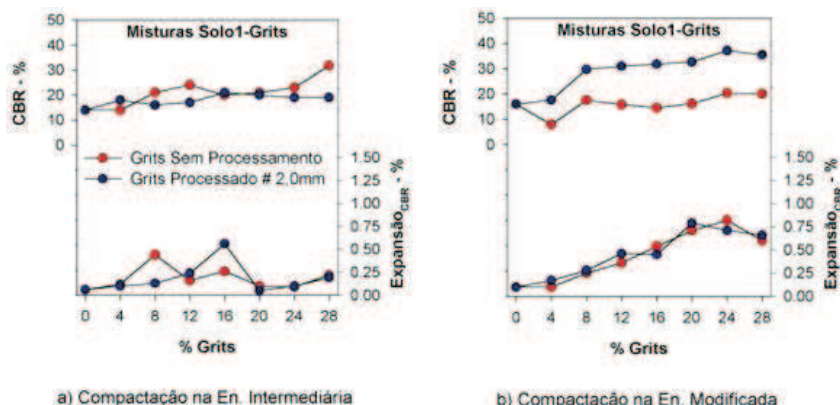


Figura 3 – Curvas de compactação com duas energias.
 Figure 3 – Compaction curves with two energies.

As misturas solo 2-*grits* tiveram o seguinte comportamento, quanto ao aspecto compactação: (i) pequeno aumento na umidade ótima nas misturas compactadas na energia intermediária, atingindo-se maiores valores para as misturas contendo o resíduo processado; (ii) na energia modificada, os teores ótimos de umidade praticamente não se alteraram; e (iii) os valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ foram ligeiramente superiores para o resíduo processado na peneira de 2,0 mm, nas misturas compactadas na energia intermediária, notando-se comportamento diferenciado quando da compactação realizada na energia modificada, ou seja, maiores valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ das misturas contendo o resíduo na sua forma pura, sem processamento.

Os valores de resistência mecânica e expansão, medidos via ensaio CBR (Figura 4). As misturas solo 1-*grits*, quando compactadas na energia intermediária, apresentaram pouca variação nos seus valores CBR, em função do processamento do resíduo, sendo notado

maior discrepância para o teor de 28% de *grits*, em que ocorreu queda de aproximadamente 40 % na resistência, quando se empregou a fração de resíduo que passou na # 2,0 mm. Comportamento distinto foi notado nas misturas solo 1-*grits* compactadas na energia modificada, em que os resultados CBR, fazendo-se uso do resíduo processado, foram, em todos os tratamentos, superiores aos das misturas com o *grits* puro, sendo observadas discrepâncias de mais de 100% na capacidade de suporte para a maioria dos tratamentos. Uma razão para esse fato pode ser a tendência a maiores valores de densidade, principalmente nos teores superiores a 20% de resíduo, obtidos para essa energia e para as misturas solo 1-*grits*, utilizando-se do resíduo processado. Com relação aos valores de expansão, notou-se nas misturas solo 1-*grits* que praticamente não se alteraram em função do processamento do resíduo, em ambas as energias de compactação; ressalva seja feita, às misturas com 8 e 16% de *grits*, compactadas na energia intermediária.

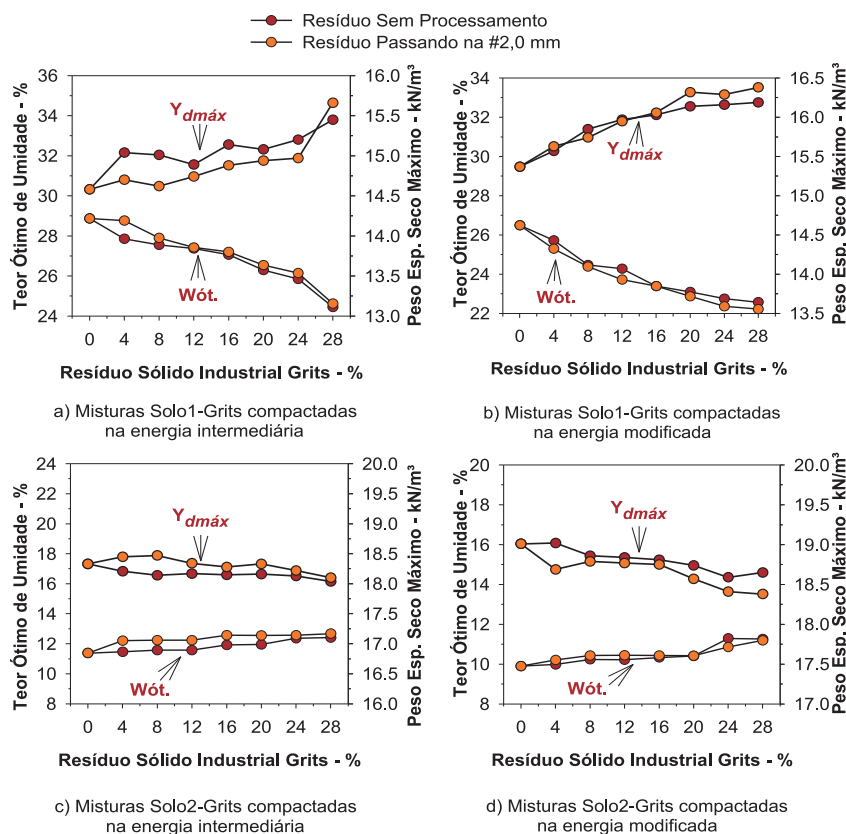


Figura 4 – Reflexos das frações grosseiras do *grits* na compactação.

Figure 4 – Reflexes of the *grits* gravel fractions in the compacting.

Nas misturas solo 2-*grits*, notou-se o seguinte comportamento com relação ao índice CBR, em função do processamento do resíduo: (i) quando compactadas na energia intermediária, as misturas praticamente não sofreram alteração na sua resistência, devido ao processamento do *grits* na # 2,0 mm, sendo notado maior discrepância no teor de 28% de resíduo, em que se obteve um valor de CBR de aproximadamente 60% superior nas misturas com o *grits* processado; (ii) para compactação na energia modificada houve ligeira tendência a maiores valores de resistência nas misturas com o resíduo processado na peneira de N^o 10. Com relação ao índice expansão, notaram-se reduções significativas somente nas misturas solo 2-*grits* compactadas na energia modificada, em que ocorreram quedas em torno de 70% na expansão, quando se empregaram misturas com o resíduo processado.

3.3. Reatividade da fração fina do *grits* na resistência e expansão das misturas solo-*grits* compactadas

Nesta fase, procurou-se avaliar a reatividade da fração com diâmetro menor que 0,074 mm nas misturas solo-*grits* compactadas e curadas. Na Figura 5, referente a valores CBR e expansão, é possível notar, com relação à resistência, que: (i) misturas solo 1-*grits* – para todos os teores à medida que se aumentou a parcela de resíduo com diâmetro inferior a 0,074 mm houve, proporcionalmente, aumentos na resistência, sendo notado maiores discrepâncias a partir de 50% de resíduo processado na peneira de N^o 200; atingiram-se pontos

máximos de CBR com o processamento de 100% do resíduo em tal peneira. Para o teor de 24% de resíduo, por exemplo, em que os valores de CBR foram maiores, houve ganhos de resistência mecânica de 31% quando pelo menos 50% do resíduo foi processado na peneira de abertura nominal de 0,074 mm. (ii) misturas solo 2-*grits* tiveram o mesmo comportamento das misturas solo 1-*grits*, ou seja, a partir de 50% de resíduo, com diâmetro inferior a 0,074 mm, empregado nas misturas, ocorreu aumento substancial no CBR, atingindo-se patamar superior em todos os tratamentos com misturas envolvendo 100% de resíduo processado na peneira de N^o 200. As melhores respostas foram aqui, também, para o traço de 24% de *grits*, em que se atingiu valor de CBR superior a 100% quando se empregou o resíduo com toda a totalidade de sua fração processada na peneira de N^o 200.

Com relação à expansão, as misturas solo 1-*grits* sofreram pequenas oscilações em decorrência do processamento do resíduo, sendo notado tendência a maiores valores na maioria dos tratamentos, quanto mais fina foi a granulometria do *grits*. Nas misturas solo 2-*grits*, notou-se tendência inversa, ou seja, em todos os tratamentos, quanto mais fina foi a granulometria do *grits*, menores foram os valores de expansão, chegando a valores próximos de zero para os teores de 16 e 24% de *grits*, considerando esse último com 100% de suas partículas de diâmetro inferior a 0,074 mm (Figura 6).

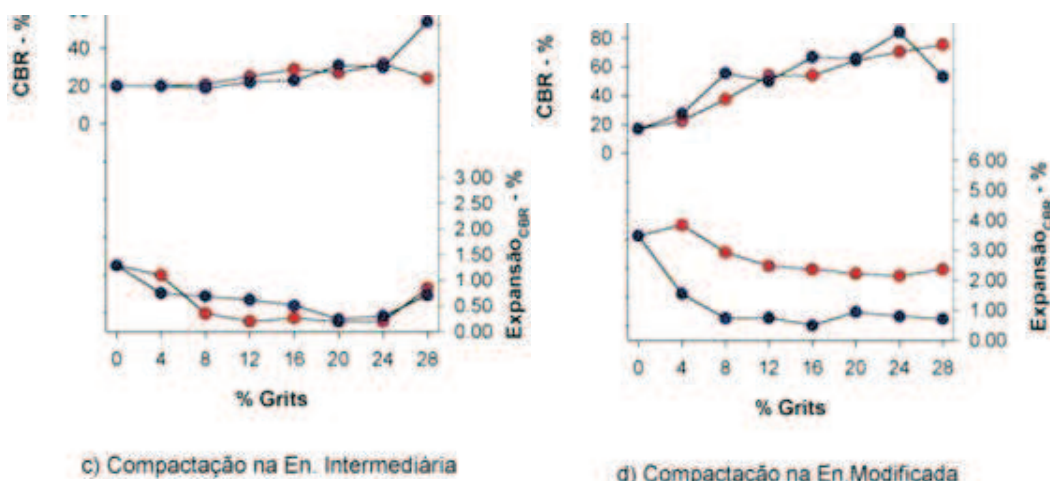


Figura 5 – Influência da fração grosseira do *grits* nos valores de CBR e Expansão.

Figure 5 – Influence of the *grits* gravel fraction on the CBR and expansion values.

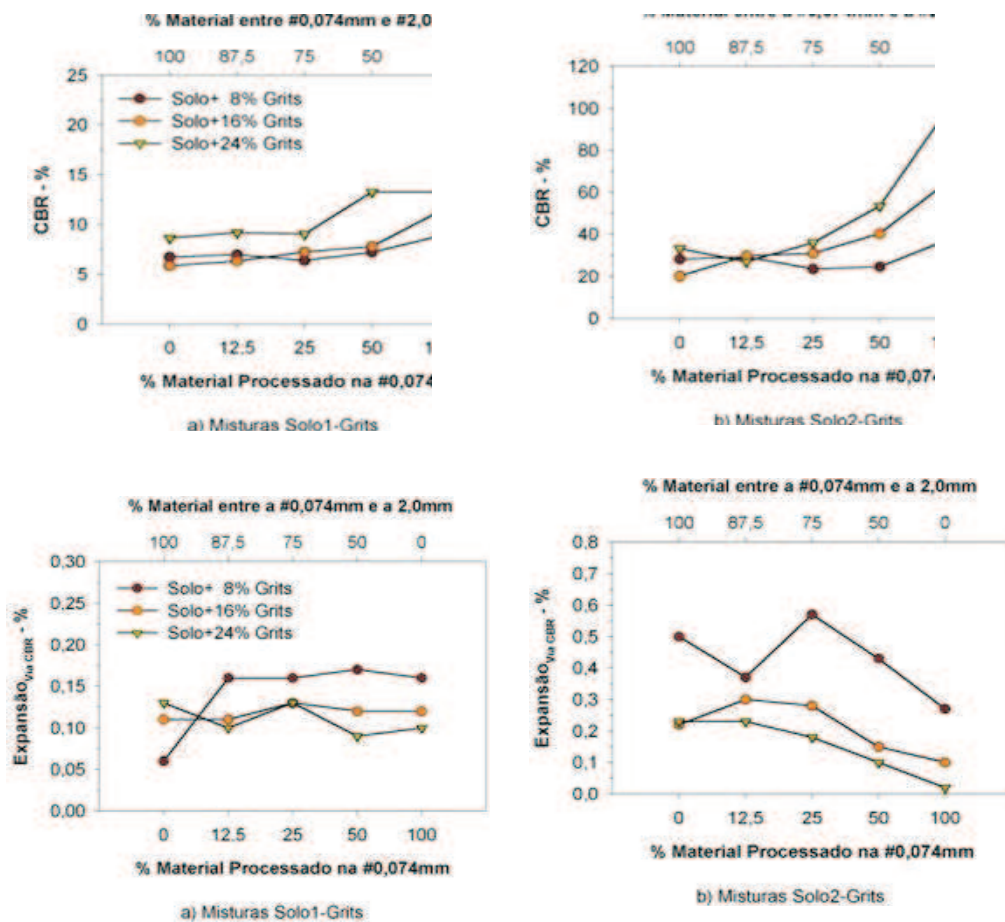


Figura 6 – Contribuição da fração fina do *grits* na resistência e expansão das misturas solo-*grits* compactadas na energia intermediária e curadas a 28 dias.

Figure 6 – Influence of the *grits* gravel fraction on the CBR and expansion values at intermediate compacting energy and 28 days of cure.

4. CONCLUSÕES

a) A adição de *grits* às amostras 1 e 2, nos teores estudados, não proporcionou alteração da textura dos solos, através da possível ocorrência de interações químicas.

b) O par de valores ótimos de compactação das misturas solo-*grits* praticamente não se alteraram pelo processamento do resíduo na peneira de abertura nominal de 2,0 mm.

c) A fração pedregulho ($d \geq 2,0$ mm) pouco contribuiu para os ganhos de resistência mecânica das misturas solo-*grits* compactadas, sendo notado nas misturas solo 1-*grits* e reduções de expansão nas misturas solo 2-*grits*, compactadas na energia modificada, melhores

respostas para as partículas de *grits* com $d \leq 2,0$ mm.

d) A expansão das misturas solo 2-*grits*, compactadas na energia modificada, aumentou devido à fração pedregulho do *grits*, não sendo notado nos demais tratamentos alteração desse parâmetro.

e) As misturas solo-*grits* tiveram ganhos nos valores CBR proporcionais ao aumento da parcela fina ($d \leq 0,074$ mm) do *grits*.

f) Os valores máximos obtidos foram para *grits*, passando 100% na peneira de N^o 200. O aumento da parcela fina levou a incrementos na expansão das misturas solo 1-*grits* e reduções de expansão nas misturas solo 2-*grits*.

5 - REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10004**: classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: 1987. 63p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 049**: solos: determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro: 1994. 12p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 051**: solos: análise granulométrica. Rio de Janeiro: 1994. 12p.

LAMBE, T. W.; MICHAELS, A. Altering soil properties with chemicals. **Chemical Engineering**, v.32, n.6, p.488-492, 1954.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995. 213p.