

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE MISTURAS COMPACTADAS DE SOLO-CIMENTO E FINOS DE PEDREIRA

SHEAR STRENGTH OF SOIL-CEMENT AND QUARRY WASTE COMPACTED MIXTURES

Guilherme Soler Varela da Silva, *Graduando em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil, guilhermesoler@yahoo.com.br*

Júlio César Beltrame Benatti, *Graduando em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil, jcbbenatti@yahoo.com.br*

Miriam Gonçalves Miguel, *Profa. Dra. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil, mgmiguel@fec.unicamp.br*

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de utilização da fração areia de finos de pedreira como correção do traço de misturas compactadas de solo-cimento, constituídas de solos argilosos, de modo a torná-las viáveis economicamente e aplicáveis como reforço de solo para fundações rasas. Essas misturas foram preparadas com solo laterítico de textura argilo-siltosa, típico da região de Campinas/SP/Brasil, e com finos de pedreira oriundos da britagem de rochas de Diabásio, comuns na mesma região. Os corpos-de-prova moldados a partir de misturas em diferentes traços e tempos de cura foram submetidos aos ensaios triaxiais do tipo drenado. Como resultados, constatou-se o aumento nos valores de resistência ao cisalhamento, devido às adições de finos de pedreira e de cimento e ao tempo de cura, indicando que as misturas podem vir a ser uma das formas sustentáveis de utilização dos resíduos de pedreira na região.

ABSTRACT

This work presents a study about the utilization of the quarry waste sand fraction as correction of soil-cement compacted mixtures traces with clayey soils. The objective was to improve these mixtures to become them economically advantageous and to apply them as supporting layer of shallow foundations. The mixtures were made with silty clay and quarry waste from Diabase rock crushing, typical of the Campinas region, State of São Paulo, in Brazil. Specimens were made of mixtures with different traces and two curing periods: 7 and 28 days. After that, specimens were submitted on consolidated and drained triaxial compression tests. As result, the increase of the shear strength of specimens, in function of the quarry waste addiction and of the curing periods, was observed. This fact indicated that the mixtures could be one of the sustenance manners of utilization of quarry waste in the region.

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas discutidos hoje entre as comunidades técnica e científica é a destinação dos resíduos da britagem de rochas para a produção de material agregado médio e graúdo para diversas aplicações, conhecido, genericamente, como finos de pedreira. Não há ainda uma forma que seja ambiental e economicamente sustentável de destinação desses resíduos. Muitas propostas têm sido elaboradas tanto para a utilização desse material, como para a disposição adequada do mesmo, a fim de minimizar os impactos ambientais negativos causados quando esse material é disposto sem critérios técnico-sócio-econômicos, como, por exemplo, as contaminações do solo e corpos d'água.

A granulometria desse material é bastante diversificada, pois depende dos processos de lavra empregados pelas mineradoras, embora possa ser definida como um material cujas partículas possuem diâmetros inferiores a 4,8mm, englobando, de acordo com a NBR 7181/84, texturas de pedregulhos finos, areias grossas, médias e finas, siltes e argilas.

O solo-cimento constitui-se de uma mistura íntima de solo, cimento e água, em proporções previamente estabelecidas, através de uma dosagem racional (ABCP, 1986), podendo ser compactado ou plástico. O estudo do solo-cimento compactado como material de reforço em fundações, pavimentações, obras de contenção, justifica-se pelo fato deste material apresentar custo relativamente baixo, porém com propriedades técnicas aceitáveis dentro das recomendações das normas.

Para a aplicação dos finos, em misturas de solo-cimento constituídas de solos argilosos, somente a fração caracterizada pelas areias fina, média e grossa é interessante. Isso porque, as misturas de solo-cimento com solos argilosos necessitam de maiores quantidades de cimento para a estabilização, fornecendo uma resistência igual ou superior a 2,1 MPa (NBR12253/92), aumentando o custo do material, em comparação às misturas com solos arenosos. Desse modo, os finos de pedra de granulometria arenosa vêm auxiliar a estabilização de misturas de solos argilosos com cimento.

Essas misturas corrigidas podem ser uma alternativa no reforço de solos para base de fundações rasas em obras de pequeno a médio porte, nas regiões onde as camadas de solo superficiais não apresentam características de resistência e/ou compressibilidade adequadas geotecnicaamente para o apoio dessas fundações, como é o caso de 14% da região de Campinas/SP.

Esse trabalho propõe o estudo de resistência ao cisalhamento dessas misturas para viabilidade dessa alternativa, colaborando também com a minimização de dois problemas ambientais. O primeiro é o gerado pelo acúmulo de rejeitos de britagem (finos de pedra), conforme já citado, e o segundo é o gerado pelo acúmulo de solo retirado das escavações, que pode poluir o ambiente e até causar assoreamento de cursos d'água. Além disso, há uma redução no custo do material, já que nessas misturas de solo-cimento e finos de pedra utiliza-se uma menor quantidade de cimento, podendo-se alcançar resistência satisfatória mesmo sem cimento, dependendo da carga solicitada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

2.1.1. O solo da região de Campinas/SP/Brasil.

Nas misturas de solo-cimento e de solo-cimento e finos de pedra, utilizadas neste trabalho, as amostras de solo foram coletadas da camada superficial do Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações (CEMSF) da Unicamp, constituída de uma argila siltosa, coluvionar, e laterítica com, aproximadamente, 6,5 m de espessura (Miguel et al, 2007a e b). O Quadro 1 apresenta os valores de índices físicos dessa amostra de solo e a Figura 1 apresenta a sua curva granulométrica.

Quadro 1- Propriedades índices do solo laterítico

Peso Específico dos Grãos (kN/m ³)	Peso Específico Natural (kN/m ³)	Teor de umidade (%)	Porosidade (%)	Limite de Liquidez (%)	Índice de Plasticidade (%)
30,0	12,0	24,2	64	45,3	11,4

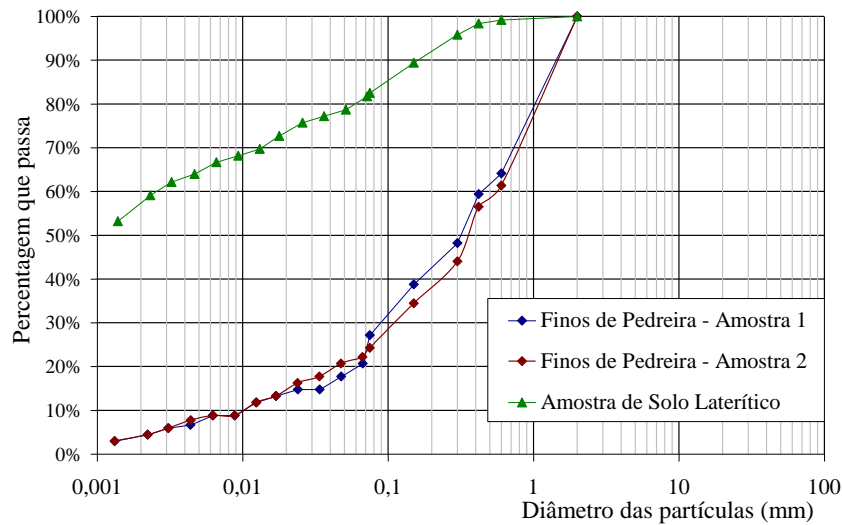


Figura 1 – Curvas granulométricas do solo e dos finos de pedreira.

2.1.2. Os finos de pedreira

Os finos de pedreira foram obtidos de uma mineradora de Diabásio, rocha intrusiva básica da Formação Serra Geral, da cidade de Campinas/SP. Esses materiais foram caracterizados, apresentando um peso específico dos grãos igual a $30,9 \text{ kN/m}^3$, segundo a NBR 6508/1984, e duas curvas granulométricas ilustradas na Figura 1. Essas curvas apresentam uma extensa faixa granulométrica, englobando frações correspondentes às de argila ($D < 0,002 \text{ mm}$), silte ($0,002 \text{ mm} < D < 0,06 \text{ mm}$), areia fina ($0,06 \text{ mm} < D < 0,42 \text{ mm}$), areia média ($0,42 \text{ mm} < D < 0,6 \text{ mm}$) e areia grossa ($0,6 \text{ mm} < D < 2,0 \text{ mm}$), de acordo com a NBR 7181 (1984).

2.1.3. Misturas de solo e finos de pedreira

Foram elaboradas misturas de solo e frações de areia dos finos de pedreira, para a realização de ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, segundo a NBR 6459 (1984) e a NBR 7180 (1984), respectivamente, de modo a verificar se cumpriam os padrões comentados por Souza et al (2006): $LL \leq 45\%$ e $LP \leq 18\%$, para menor consumo de cimento. Além disso, foram determinados os pesos específicos para essas misturas de acordo com a NBR 6508 (1984). Os resultados estão no Quadro 2, sendo as porcentagens de finos referentes à massa seca do solo.

Quadro 2- Índices físicos das misturas de solo-cimento e finos de pedreira.

Índices Físicos	Teor de Finos de Pedreira	
	25%	50%
Limite de Liquidez (%)	40,3	37,9
Limite de Plasticidade (%)	28,6	NP
Índice de Plasticidade (%)	11,7	NP
Peso Específico dos Grãos (kN/m^3)	30,2	30,6

Nota-se no Quadro 2 que, à medida que a porcentagem de finos da mistura aumenta, há uma diminuição dos valores de LL e de LP, até a ausência de plasticidade, com relação aos valores do Quadro 1, para o solo natural. Esse fato contribui com uma mistura mais adequada para o solo-cimento, no que se refere ao consumo de cimento, já que os valores de LL e LP estão, em

grande parte, de acordo com os limites máximos estabelecidos por Souza et al (2006). Já os valores de pesos específicos dos grãos das misturas mantiveram praticamente iguais com relação aos valores obtidos para o solo (Quadro 1).

2.1.4. Misturas de solo-cimento e finos de pedra

As misturas de solo-cimento e finos de pedra foram elaboradas nas proporções em massa definidas no Quadro 3, sendo que a percentagem de finos se refere à massa seca do solo e a percentagem de cimento, à massa seca da mistura solo+finos. O cimento utilizado na fabricação dessas misturas foi o CP III.

Quadro 3- Traços estudados

Traço em Massa (g)				
Traço	Solo	Finos de Pedreira	Cimento	Total
Solo + 50% finos	100,0	50,0	0,0	150,0
Solo + 50% finos + 5% cimento	100,0	50,0	7,5	157,5
Solo + 25% finos	100,0	25,0	0,0	125,0
Solo + 25% finos + 5% cimento	100,0	25,0	6,3	131,3
Solo + 5% cimento	100,0	0,0	5,0	105,0
Tração em Percentagem (%)				
Traço	Solo	Finos de Pedreira	Cimento	Total
Solo + 50% finos	66,67	33,3	0,0	100
Solo + 50% finos + 5% cimento	63,5	31,7	4,8	100
Solo + 25% finos	80,0	20,0	0,0	100
Solo + 25% finos + 5% cimento	76,2	19,0	4,8	100
Solo + 5% cimento	95,2	0,0	4,8	100

2.2. Métodos

Para o solo natural (Quadro 1) e para cada mistura (Quadro 3), foram realizados ensaios de compactação com Energia Proctor Normal em equipamento Mini-MCV, segundo a descrição apresentada em Nogami e Villibor (1995), para determinação do teor de umidade ótimo desses materiais e dessas misturas. As curvas de compactação estão apresentadas na Figura 2.

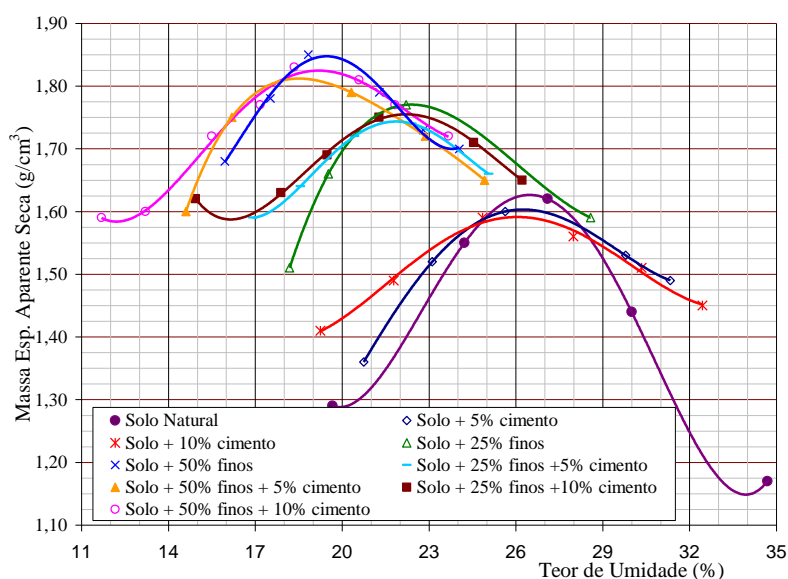


Figura 2 – Curvas de compactação na Energia Proctor Normal do solo e das misturas.

Para cada traço, foram moldados, no mínimo, quatro corpos-de-prova na umidade ótima com 7cm de altura e 3,6 cm de diâmetro, dois deles submetidos ao tempo de cura de 7 dias e os outros dois, ao tempo de cura de 28 dias. Após os seus respectivos tempos de cura, os pares de corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios triaxiais do tipo drenado com valores de tensões confinantes iguais a 25 kPa e 75 kPa. Esses valores foram adotados porque representam as condições de embutimento sob as quais são executadas as fundações rasas na região.

3. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E ANÁLISES

3.1. Resistência do solo compactado e das misturas

A Figura 3 apresenta a variação dos valores de tensão desviatória ($\sigma_1 - \sigma_3$) *versus* os teores de finos de pedra, considerando o teor de cimento adicionado à mistura, o tempo de cura e o valor da tensão confinante.

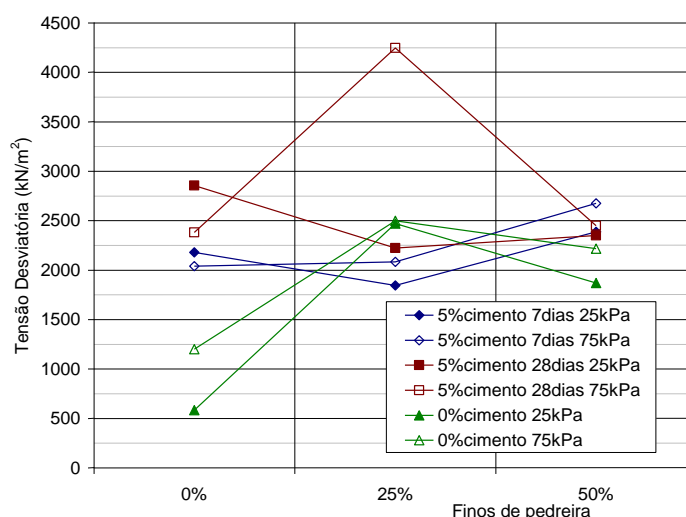


Figura 3 - Variação dos valores de tensão desviatória *versus* os teores de finos de pedra.

Da Figura 3, observou-se que houve um ganho considerável de resistência do solo compactado com a adição de 5% de cimento, sem finos de pedra. A resistência do solo praticamente dobrou, após 7 dias de cura, e quadruplicou, depois de 28 dias, considerando as respectivas tensões confinantes.

Houve um acréscimo de resistência do solo com a contribuição de 25% de finos de pedra superior a 4 vezes, quando aplicado o valor da tensão confinante de 25 kPa, e cerca de 2 vezes, sob o valor de 75 kPa dessa tensão. No entanto, esse acréscimo não foi tão expressivo quando se adicionaram 50% de finos de pedra, apresentando-se superior a 3 vezes e em torno de 85%, quando os valores de tensões foram de 25 kPa e 75 kPa, respectivamente. Esses acréscimos indicaram que há um determinado teor de finos de pedra que faz com que a resistência da mistura solo com finos de pedra seja máxima, tendendo a diminuir, gradualmente, conforme esse teor é aumentado.

As adições simultâneas de cimento (5%) e de 25% de finos de pedra, depois de 7 dias de cura, fez aumentar a resistência do solo compactado pouco mais de o triplo, na tensão confinante de 25 kPa, e cerca de 75%, na tensão de 75 kPa. Após 28 dias de cura, essas misturas apresentaram valores de resistências superiores a 3,5 vezes à do solo compactado, sob tensão confinante de 25 kPa, e em torno de 4,0 vezes maiores, sob tensão de 75 kPa. Quando foram adicionados 50% de finos, simultaneamente a 5% de cimento, a resistência do solo aumentou

em torno de 4 vezes e de 2 vezes, sob valores de tensão confinante de 25 kPa e 75 kPa, respectivamente, independente do tempo de cura.

Comparando as resistências das misturas solo com 25% de finos de pedreira e 5% de cimento com as obtidas para as misturas de solo com 25% de finos, somente uma das primeiras misturas, curada a 28 dias e sob tensão confinante de 75 kPa, apresentou resistência maior do que as das segundas. Isto é, não se constatou contribuição da adição de cimento nas misturas de solo com 25% de finos de pedreira para valores de tensões confinantes de até 25 kPa.

Analogamente, fazendo a comparação entre as misturas solo com 50% de finos de pedreira e 5% de cimento e as misturas de solo com 50% de finos, observou-se que, sob tensão confinante de 25 kPa, as resistências das primeiras misturas foram 25% maiores do que as das segundas e, sob tensões de 75 kPa, as resistências das primeiras foram, em média, 15% maiores do que as segundas, independente do tempo de cura. Ou seja, a contribuição da adição de cimento na resistência das misturas solo com 50% de finos de pedreira não se mostrou considerável.

Observou-se também que o valor da tensão confinante apresentou maior influência na resistência das misturas solo-cimento com finos de pedreira sob o tempo maior de cura (28 dias) e com o teor de 25% de finos.

3.2. Intercepto de coesão e ângulo de atrito do solo compactado e das misturas

O valor de tensão desviatória das misturas de solo com 5% de cimento obtido para a tensão confinante de 25 kPa apresentou-se de valor superior ao da tensão confinante de 75 kPa, independente do tempo de cura. Sendo assim, não foi possível determinar os valores de intercepto de coesão e de ângulo de atrito efetivos para essas misturas, pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Os valores de intercepto de coesão efetivos *versus* teores de finos de pedreira e os valores de ângulo de atrito efetivos *versus* teores de finos de pedreira são ilustrados nas Figuras 4 e 5, respectivamente, em função do teor de cimento adicionado às misturas e do tempo de cura. O Quadro 4 apresenta os valores de intercepto de coesão e de ângulo de atrito efetivos para as misturas estudadas.

Da Figura 4, notou-se um aumento do valor do intercepto coesivo (c') do solo compactado quando se adicionaram os finos de pedreira, sendo esse aumento bem expressivo para 25% de finos de pedreira. O mesmo fato ocorreu quando houve adição simultânea de finos de pedreira e de cimento após 28 dias de cura (cerca de 8,5 vezes), para o teor de 50% de finos.

Com relação aos valores de ângulo de atrito efetivos (ϕ'), esses sofreram redução de cerca de 80%, quando se adicionaram 25% de finos de pedreira no solo, e apresentaram pouca variação, quando se adicionaram 50% de finos.

Com a adição de 5% de cimento na mistura de solo com 25% de finos, o valor do intercepto de coesão efetivo (c') diminuiu com o aumento do tempo de cura. Ao contrário, para a mistura de solo com 50% de finos, a adição de 5% de cimento fez aumentar o valor de c' com o tempo de cura.

Nas misturas de solo-cimento com 25% de finos de pedreira, o valor de ϕ' apresentou-se cerca de 22% menor com relação ao do solo compactado, após o tempo de cura de 7 dias, e 30% maior, após os 28 dias. No entanto, com o acréscimo para 50% de finos nas misturas de solo-cimento, o valor de ϕ' não sofreu grande variação depois do tempo de cura de 7 dias, mas caiu pela metade, após os 28 dias. Notou-se que a adição de 25% de finos de pedreira e de 5% de

cimento no solo favoreceu o aumento do valor de ϕ' , mas somente após a cura de 28 dias. As adições de 50% de finos e de 5% de cimento no solo compactado apresentaram pouca influência no acréscimo de ϕ' , depois de 7 dias, e expressiva redução desse valor, após 28 dias de cura.

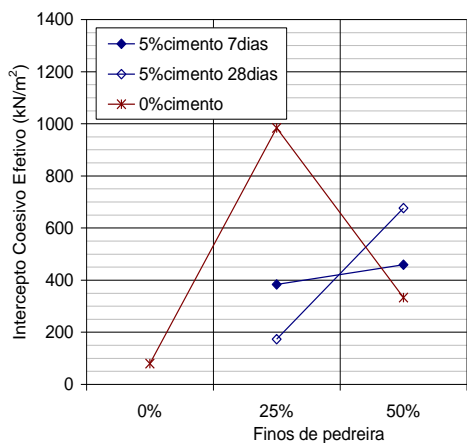


Figura 4 – Valores de intercepto de coesão efetivos *versus* os teores de finos de pedra.

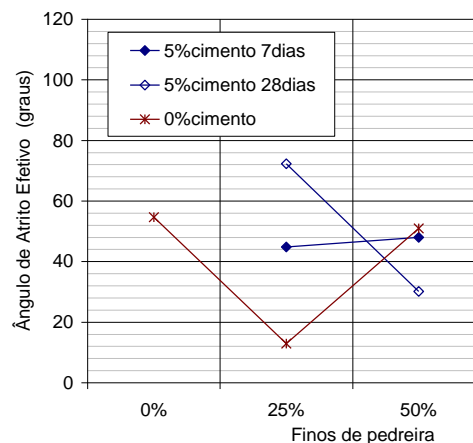


Figura 5 – Valores de intercepto de ângulo de atrito efetivos *versus* os teores de finos de pedra.

Quadro 4 – Valores efetivos de intercepto de coesão e de ângulo de atrito para as misturas.

Traços	Tempo de Cura (dias)	Intersepto de Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (graus)
Solo compactado	-	79,6	59,4
Solo+5%cimento	7	-	-
	28	-	-
Solo+25% finos	-	983,7	12,9
Solo+50% finos	-	332,1	50,9
Solo+25% finos+5%cimento	7	383,4	44,8
	28	172,6	72,4
Solo+50% finos+5%cimento	7	458,5	47,9
	28	676,1	30,1

Comparando as misturas de solo-cimento e finos de pedra com as de solo e finos de pedra (sem cimento), observou-se que, após 7 dias de cura, a adição de 5% de cimento fez aumentar o valor de ϕ' cerca de 3,5 vezes, nas misturas com 25% de finos, e diminuir em 6%, nas misturas com 50% de finos. Após 28 dias, o valor de ϕ' sofreu aumento de 3,7 vezes e redução de 30%, respectivamente, para as misturas com adições de 25% e de 50% de finos.

Observou-se que o valor de c' nas misturas de solo-cimento foi influenciado pelo teor de finos de pedra, sendo maior, quanto maiores forem esses teores e os tempos de cura. Já valor de ϕ' para as misturas de solo-cimento, sofreu aumento com o tempo de cura para o teor de finos de pedra de 25% e diminuição com o tempo de cura para 50% de finos. Para o tempo de cura de 28 dias, quanto maior o teor de finos de pedra nas misturas de solo-cimento e finos, maior c' e menor ϕ' .

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo da resistência ao cisalhamento de misturas envolvendo o solo argilo-siltoso, laterítico e coluvionar de Campinas/SP, finos de pedreira e cimento permitiu expor as seguintes considerações finais:

A contribuição na melhoria da resistência do solo compactado, devida à adição dos teores de finos de pedreira estudados (25% e 50%), foi muito próxima à encontrada quando houve a adição de 5% de cimento. A adição de 25 % de finos de pedreira no solo proporcionou um valor máximo de resistência nas misturas de solo e finos de pedreira e nas de solo-cimento e finos após 28 dias e sob tensão confinante de 75 kPa.

Nas misturas de solo-cimento e finos de pedreira, quanto maiores o teor de finos de pedreira e o tempo de cura, maiores os valores efetivos de intercepto de coesão e menores os valores efetivos de ângulo de atrito das misturas analisadas.

Há necessidade de execução de um número maior de ensaios de compressão triaxial para as mesmas e para novas misturas, de modo a permitir a constatação dos comportamentos e dos valores aqui apresentados e, conseqüentemente, uma análise mais conclusiva dos resultados.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar os seus agradecimentos ao CNPq, à Faepex/Unicamp e à Fapesp.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (1986). Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaios. 3ª edição. (ET-35). São Paulo.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1984). Análise Granulométrica. NBR 7181. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1984). Determinação da Massa Específica dos Grãos. NBR 6508. Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1984). Determinação do Limite de Liquidez. NBR 6459. Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1984). Determinação do Limite de Plasticidade. NBR 7180. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1992). Solo-cimento – dosagem para emprego como camada de pavimento – NBR 12253. Rio de Janeiro.
- Miguel, M. G., Albuquerque, P. J. R. de; Azevedo, G. S., Silva, G. S. V. da; Carvalho, D. de (2007a). “Lateritic behaviour of the colluvial soil from Campinas-SP-Brasil”. *Proc., XIII Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Isla de Margarita, Venezuela. “CD-ROM”.
- Miguel, M. G. ; Albuquerque, P. J. R. ; Saueia, F. N. ; Benatti, J. C. B. ; Marque, R. ; Hajnal, V. H. J. (2007b). “Aspectos geológico-geotécnicos da camada de solo argiloso, laterítico e coluvionar de Campinas/SP”. *Proc., III Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos do Centro-Oeste e Norte*. Cuiabá/MT. Brasil. “CD-ROM”.
- Nogami, J.S. & Villibor, D.F. (1995). *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos*. Editora Vilibor: São Paulo/SP, Brasil, 240p.
- Souza, M. I. B. de; Pereira, J. A.; Segantini, A. A. da S. (2006). *Tijolos de Solo-Cimento com Resíduos de Construção*. Revista Técnica. Editora Pini: São Paulo, Brasil. 113(14). 60-65.