COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA AREIA CIMENTADA REFORÇADA COM FIBRAS DE POLIPROPILENO

Mechanical Behavior of Polypropylene Fiber-Reinforced Cemented Sand

Márcio Antônio Vendruscolo*
Karla Salvagni Heineck**
Nilo Cesar Consoli***
Ana Paula Silva dos Santos****

RESUMO – Ensaios de compressão triaxial foram realizados com o propósito de obter informações fundamentais à compreensão do comportamento de uma areia cimentada reforçada com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente. Inúmeros são os fatores que influenciam o comportamento mecânico de tais compósitos, porém, esta pesquisa se restringe ao estudo da influência do teor ou porcentagem de fibra, do comprimento da fibra, do título da fibra (diâmetro), da porcentagem de cimento e da densidade relativa da areia. Para que fosse possível a realização de uma análise abrangendo a influência de cada um dos fatores controláveis nas variáveis de resposta investigadas, bem como a interação entre os mesmos, foram utilizadas técnicas estatísticas de regressão múltipla e de variância para cada variável de resposta, gerando modelos que podem ser utilizados para a previsão dos resultados. Através da análise dos resultados do projeto de experimentos foram estabelecidas as tendências e influências das várias variáveis no comportamento do compósito areia-cimento-fibra.

ABSTRACT – Triaxial tests were carried out in order to search for fundamental knowledge regarding the behavior of cemented sands reinforced with randomly distributed fibers. There are many factors that influence the mechanical behavior of such composites; however, this research is restricted to the study of effect of fiber content, fiber length, fiber diameter, cement content and relative density of sand. Multiple regression technique was used in order to analyze the influence of each controlled factor on the response variables, generating models that can be used for estimating test results. Finally, analysis of the results of the experimental study allows the establishment of tendencies and influences of several variables on the behavior of sand-cement-fiber composites.

Palavras-Chave – solo reforçado, fibras de polipropileno, ensaios triaxiais.

1 – INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a necessidade de materiais com propriedades específicas especiais tem estimulado o interesse no desenvolvimento de materiais geotécnicos alternativos que preencham especificações de projeto. As técnicas já reconhecidas de estabilização química de solos e reforço de solos com geossintéticos são freqüentemente utilizadas para obter materiais geotécnicos melhorados através da adição ao solo de agentes cimentantes (cal, cimento Portland, asfalto, etc.) ou a

* Professor, Departamento de Engenharia e Ciência da Computação, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões.
** Professora, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. e-mail: karla@ppgec.ufrgs.br
*** Professor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
**** Mestranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

inclusão de elementos discretos orientados aleatoriamente, como fibras e lascas de pneus. Solos tratados com cimento e reforçados são, de forma geral, materiais compósitos que resultam da combinação e otimização das propriedades individuais dos materiais constituintes.

Entre as possíveis aplicações potenciais de solos tratados com cimento e reforçados com fibras, encontra-se o uso como base de pavimentos, as quais terão sua vida útil aumentada (Crockford *et al.,* 1993), bem como o tratamento de camadas superficiais onde poderão ser assentes fundações superficiais, com o aumento na capacidade de suporte e a redução na fragilidade na camada tratada de solo cimentado, devido à inserção de fibras (Consoli *et al.,* 2003).

Este artigo descreve um estudo experimental sobre a utilização de fibras de polipropileno no reforço de uma areia cimentada e não cimentada. A resposta tensão - deformação axial - deformação volumétrica, sob condições axissimétricas, foi avaliada através de um extenso programa experimental embasado em ensaios de compressão triaxial drenados com medida local de deformações. Ênfase foi dada na avaliação da influência da porcentagem de fibra, do comprimento da fibra, do diâmetro da fibra, da porcentagem de cimento e da densidade relativa da areia sobre os aspectos comportamentais básicos do solo, tais como resistência ao cisalhamento do material e sua fragilidade.

2 – PESQUISAS ANTERIORES

O melhoramento das propriedades dos solos reforçados com fibras depende dos parâmetros das fibras (comprimento, porcentagem em peso, resistência à tração, módulo de elasticidade, rugosidade e orientação do reforço), dos parâmetros do solo, da tensão de confinamento e do modo de carregamento. A seguir são apresentadas resumidamente as conclusões obtidas por diversos pesquisadores a respeito da influência dos principais fatores mencionados acima no comportamento de solos reforçados. Algumas dessas pesquisas apresentaram resultados antagônicos, dependendo diretamente do tipo de fibra utilizada.

a) Quanto à porcentagem de fibra

Quanto maior a porcentagem de fibra, maior é o acréscimo de resistência mecânica, até um certo limite, a partir do qual este efeito não é mais observado (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986; McGown *et al.,* 1988; Maher & Ho, 1994; Ulbrich, 1997; Specht, 2000; Santoni *et al.,* 2001). A inclusão de fibras diminui o índice de fragilidade (Gray & Ohashi, 1983; Ulbrich, 1997; Montardo *et al.,* 2001).

O índice de fragilidade pode ser definido como:

$$I_f = \frac{q_{rup}}{q_{ult}} - 1 \qquad (1)$$

onde q_{rup} é a tensão de ruptura e q_{ult} é a tensão última. Quanto maior o valor do índice de fragilidade maior é a fragilidade do material, ou seja, $I_f = 0$ significa que o material possui um comportamento dúctil.

b) Quanto ao comprimento da fibra

Quanto maior o comprimento da fibra maior é o ganho de resistência mecânica, até um limite assintótico (Gray & Ohashi, 1983; Ulbrich, 1997; Santoni *et al.;* 2001; Heineck, 2002). O aumento do comprimento da fibra provoca redução do índice de fragilidade (Crockford *et al.,* 1993; Ulbrich, 1997; Montardo *et al.,* 2001) e provoca a diminuição da resistência de pico (Maher & Ho, 1994).

c) Quanto à orientação das fibras

Os elementos de reforço devem estar posicionados na direção das deformações de tração do solo (McGown *et al.,* 1978; Morel & Gourc, 1997; Fatani *et al.,* 1991); fibras distribuídas aleatoriamente mantêm a resistência isotrópica, não sendo observados planos potenciais de fragilidade (Gray & Al-Refeai, 1986; Gray & Maher, 1989).

d) Quanto ao módulo de elasticidade da fibra

Fibras com módulo baixo não contribuem para o aumento da resistência mecânica (Montardo, 1999; Specht, 2000). Quanto maior for o módulo do reforço mais facilmente as fibras poderão ser arrancadas (Shewbridge & Sitar, 1990).

e) Quanto à tensão confinante

Foi verificada uma tensão de confinamento crítica, abaixo da qual os elementos de reforço são arrancados (Gray & Ohashi, 1983; Teodoro, 1999; Morel & Gourc, 1997; Kaniraj & Havanagi, 2001; Heineck, 2002). A tensão confinante crítica é sensível a alguns parâmetros do compósito solo-fibra, como o fator de forma das fibras (razão entre comprimento e o seu diâmetro), o coeficiente de uniformidade e a forma das partículas do solo (Gray & Maher, 1989).

A seguir são descritas algumas alterações que ocorrem no solo devido à inclusão de fibras. Diversos autores já relataram em seus trabalhos algumas mudanças, que estão relacionadas à resistência, módulo de elasticidade inicial, modo de ruptura e variação volumétrica.

Acréscimos na resistência pela inclusão de fibras ao solo foram relatados por vários autores. Alguns constataram um aumento da resistência de forma linear com o aumento da quantidade de reforço (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986), por outro lado, outros constataram um aumento não linear (Shewbridge & Sitar, 1989; Jewell & Wroth, 1987; Teodoro, 1999). Estudos experimentais realizados por Casagrande (2001) e Casagrande & Consoli (2002) em areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno mostraram um crescimento constante da resistência mobilizada com o aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elasto-plástico de enrijecimento. Segundo os autores, as fibras passaram a contribuir de forma mais significativa para o acréscimo da resistência mobilizada a partir de 2,5% de deformação axial. Para Heineck (2002), a taxa de deformação onde as fibras passam a contribuir de forma mais significativa para o acréscimo de resistência ao cisalhamento depende do tipo de matriz.

Para Specht *et al*. (2002), a alteração dos parâmetros de resistência depende das características do reforço. O autor observou que, para uma areia siltosa cimentada reforçada com fibras com baixo módulo de elasticidade, não houve alteração dos parâmetros de resistência. Por outro lado, considerando fibras com alto módulo de elasticidade, houve um leve aumento da coesão e do ângulo de atrito da areia siltosa cimentada reforçada com as fibras mais rígidas.

Ranjan & Charan (1996) observaram que a curva tensão - deformação de uma areia fina reforçada exibia tendências a crescimento mesmo a deformações axiais de ordem de 20%, comportamento análogo ao observado por Ardersland & Kattak (1979) para um solo argiloso.

Teodoro (1999) observou um aumento da resistência com o aumento do comprimento das fibras (comprimento máximo igual a 30 mm) de uma areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno. O mesmo autor observou um comportamento distinto para um solo argiloso, onde o máximo de resistência foi alcançado para um comprimento de 15 mm.

Consoli *et al*. (1999), estudando o comportamento de materiais cimentados, observaram que quanto maior é a quantidade de cimento adicionado ao solo, menos pronunciado é o acréscimo de resistência causado pela adição das fibras.

Praticamente todos os trabalhos que analisaram o comportamento de solos reforçados em termos da resistência concluíram que a adição de fibras reduz a queda da resistência pós-pico (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986; Ranjan & Charan, 1996; Consoli *et al*., 2002).

McGown *et al*. (1988), para areias, e Maher & Ho (1994) e Nataraj *et al*. (1996), para argilas, relataram aumento no módulo de elasticidade, tanto maior quanto maior o teor de fibras. Contrariamente, Ulbrich (1997), Consoli *et al*. (1999) e Casagrande (2001) obtiveram redução do módulo com a inclusão de fibras.

Montardo (1999) observou uma queda bastante acentuada do módulo inicial de uma areia cimentada reforçada com fibras de polipropileno. No entanto, as fibras de polietileno tereftalato e de vidro não causaram alteração alguma no módulo.

Portanto, o efeito do reforço fibroso no módulo de elasticidade inicial do compósito depende das características do mesmo. Michalowski & Cermák (2003) observaram que a adição de uma fibra sintética em um solo arenoso causou uma queda no módulo de elasticidade inicial. Por outro lado, a adição de fibras de aço aumentou o módulo inicial. Para Feuerharmel (2000) a intensidade das alterações no módulo de elasticidade depende também do tipo e das características de cada solo.

O aumento da ductilidade do solo com a adição de fibras é uma afirmação feita por vários autores, sendo este aumento mais significativo quanto maior for a quantidade de fibras (Maher & Ho, 1993; Nataraj *et al*., 1996; Consoli *et al*., 1999). Este comportamento foi observado em areias reforçadas com malhas de polipropileno (Morel & Gourc, 1997), em solo arenoso artificialmente cimentado reforçado com fibras de vidro (Ulbrich, 1997) e em solo arenoso artificialmente cimentado reforçado com fibras de polipropileno (Montardo, 1999). Porém, o reforço com fibras PET e de vidro não modificaram o modo de ruptura de um solo arenoso artificialmente cimentado (Montardo, 1999). Comportamento semelhante foi obtido por Specht *et al*. (2002) em solo arenoso cimentado reforçado com fibras de polipropileno mais rígidas (fibras conjugadas em formato de malha).

Para Feuerharmel (2000), a forma de ruptura do solo é alterada pela inclusão de fibras de polipropileno, que contribuem para a redução da fragilidade dos solos. A amplitude dessas alterações depende fundamentalmente de uma boa adesão solo-fibra.

O aumento da compressibilidade do solo com a inclusão de fibras também foi observado por Shewbridge & Sitar (1989), aumentando com o acréscimo da quantidade de reforço, porém, de forma não linear, similar ao observado por Nataraj *et al*. (1996).

3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

O comportamento dos solos reforçados com fibras é influenciado por fatores relacionados à matriz, como granulometria e índice de vazios, e por fatores relacionados ao reforço, como módulo de elasticidade, comprimento, diâmetro, porcentagem, rugosidade, orientação e formato da fibra. Sabe-se que todos estes fatores são importantes, porém, esta pesquisa se restringe ao estudo da influência da porcentagem de fibra *(PF)*, do comprimento da fibra *(CF)*, do diâmetro (título da fibra: TF), da porcentagem de cimento *(PC)* e da densidade relativa *(D_r)*, no comportamento mecânico do material compósito. A escolha destas variáveis investigadas e de sua faixa de variação são decorrentes do seu grau de importância e da necessidade de limitação do programa experimental por restrições temporais. Os valores e faixa de variação de alguns dos fatores controláveis investigados neste trabalho são definidos em função de estudos já realizados anteriormente, como por exemplo, o trabalho desenvolvido por Montardo (1999).

Com o objetivo de facilitar a apresentação e análise dos resultados, os ensaios triaxiais foram divididos em dois blocos. O primeiro compreende os ensaios triaxiais realizados em areia cimentada, com 0% e 7% de cimento, reforçados com 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibras. Foram utilizadas sempre fibras de 24 mm de comprimento (Tabela 1). O segundo bloco de ensaios compreende os

Tabela 1 – Variáveis e intervalos investigados – 1.º bloco de ensaios.

Variável de entrada (Xn)	**Intervalo investigado**
Comprimento da fibra – CF (mm)	0 (-1); 12 (0,33); 24 (0,33); 36 (1)
Percentagem de cimento – PC (%)	0 (-1); 7 (1)
Percentagem de fibra – PF (%)	0 (-1); 0,25 (-0,33); 0,50 (0,33); 0,75 (1)
Tensão confinante – TC (kPa)	20 (-1); 60 (0); 100 (1)

Nota: Os valores em parênteses representam os valores codificados

ensaios triaxiais realizados com o objetivo de avaliar separadamente os efeitos do nível de cimentação, da tensão de confinamento, do diâmetro da fibra e da densidade relativa nas variáveis de resposta investigadas (Tabela 2). Nesta segunda etapa, foram fixados a porcentagem de fibras (0,50%) e o comprimento da fibra (24 mm). É importante ressaltar os níveis dos fatores controláveis que foram mantidos fixos nos dois blocos de ensaios: o teor de umidade (10%) e o tempo de cura (3 dias). No primeiro bloco de ensaios o diâmetro da fibra utilizado foi de 0,023 mm (correspondente a um título de 3,3 dtex) e a densidade relativa de 70%. O termo utilizado na indústria têxtil para designar o diâmetro dos filamentos é o título, sendo que a unidade do título é o dtex, que representa a relação entre o peso e o comprimento do filamento (1 dtex=1g/10000m).

Tabela 2 – Variáveis e intervalos investigados – 2.º bloco de ensaios.

	Variável de entrada (Xn)	**Intervalo investigado**
Variação da percentagem de cimento	Percentagem de cimento – PC (%)	0 (-1); 1 (-0,8); 4(-0,2); 7 (0,4); 10 (1)
	Percentagem de fibra – PF (%)	0 (-1); 0,50 (1)
	Tensão confinante – TC (kPa)	20 (-1); 60 (0); 100 (1)
Variação da densidade relativa	Densidade relativa - Dr (%)	40 (-1); 70 (0); 100 (1)
	Percentagem de cimento – PC (%)	0 (-1); 7 (1)
	Percentagem de fibra – PF (%)	0 (-1); 0,50 (1)
	Tensão confinante – TC (kPa)	20 (-1); 60 (0); 100 (1)
Variação do diâmetro (título) das fibras	Título da fibra -TF (dtex)	3,3 (-1); 17 (-0,68); 88 (1)
	Percentagem de cimento – PC (%)	0 (-1); 7 (1)
	Tensão confinante – TC (kPa)	20 (-1); 60 (0); 100 (1)

Nota: Os valores em parênteses representam os valores codificados.

3.1 – Materiais Utilizados

Como os materiais compósitos fibrosos possuem duas fases, que são a matriz e o elemento de reforço, a seguir são descritas as características dos materiais que compõe cada uma das fases.

a) Solo

A areia utilizada neste estudo foi extraída de uma jazida localizada no município de Osório - RS. Este material caracteriza-se por ser uma areia fina, limpa e de granulometria uniforme (NBR 6502/95; ASTM D 2487/93). A análise mineralógica desta areia, realizada por Spinelli (1999), indica a presença de 99% de quartzo e o restante composto de glauconita, ilenita, turmalina e magnetita. Não foi observada a presença de matéria orgânica.

Os ensaios de distribuição granulométrica e da determinação das propriedades físicas da areia estão apresentados na Figura 1 e na Tabela 3.

b) Cimento

Como agente cimentante foi utilizado o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (ARI), tipo CPV. Na Tabela 4 são apresentadas as características físicas e mecânicas do cimento.

c) Fibras

As fibras utilizadas nesta pesquisa são fibras de polipropileno fabricadas pela Fitesa Fibras e Filamentos S/A. As fibras utilizadas, segundo dados fornecidos pelo fabricante, possuem dtex de

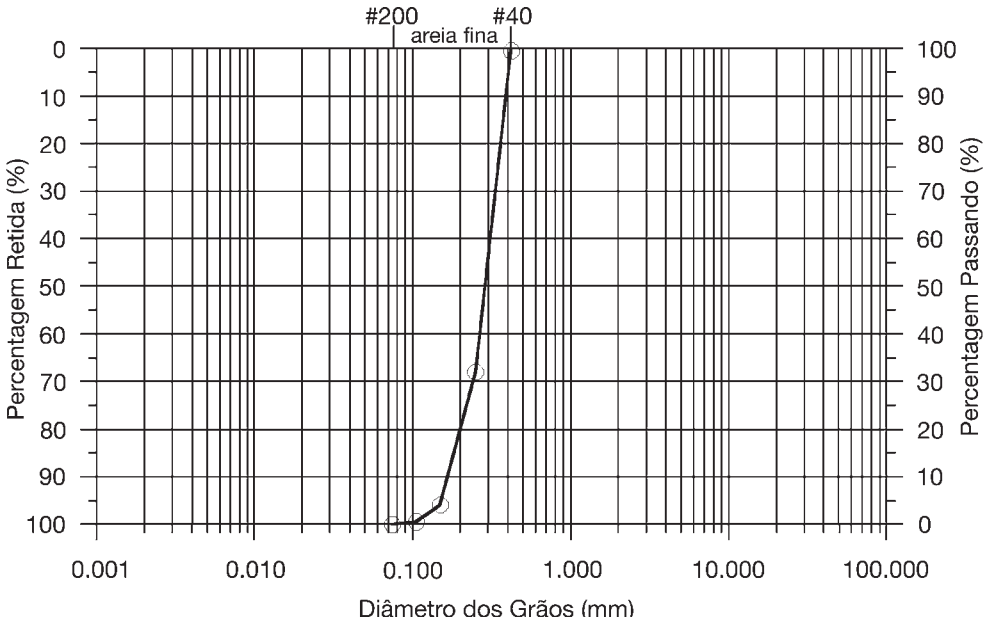


Fig. 1 – Curva granulométrica da Areia de Osório.

Tabela 3 – Propriedades físicas da Areia de Osório.

Propriedades físicas	**Valor**
Densidade real dos grãos	2,62
Coeficiente de uniformidade (C_u)	1,9
Coeficiente de curvatura (C_c)	1,2
Diâmetro efetivo - D10 (mm)	0,16
Diâmetro médio – D50 (mm)	0,28
Índice de vazios mínimo (e_{min})	0,57
Índice de vazios máximo (e_{max})	0,85

3,3; 17 e 88, uma resistência à tracção de 120 MPa, módulo de elasticidade de 3 GPa, densidade relativa de 0,91 e um alongamento na ruptura de 80%.

3.2 – Preparação das Amostras

A preparação dos corpos de prova em laboratório foi realizada em quatro fases: mistura, moldagem, armazenamento e cura. A mistura dos componentes foi realizada em recipiente apropriado na seguinte seqüência: solo, cimento, água e fibra. Esta seqüência é considerada a mais indicada, pois permite que o cimento seja misturado com o solo seco garantindo melhor homogeneização da matriz. A adição das fibras foi realizada somente após a água ter sido acrescentada. Esta técnica é adequada para evitar a segregação das fibras que ocorre se a matriz está seca. A mistura foi realizada manualmente até ser obtida a homogeneização, a qual foi verificada visualmente.

Tabela 4 – Características do cimento CPV-ARI.

	Finura	Tempo de pega		Resistência à compressão			
	Massa específica (kg/m^3)	Início (min)	Fim (min)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
Média	3,11	195	296	23,5	39,2	45,2	53,3
Mínimo	3,11	165	258	22,1	37,8	41,6	51,4
Máximo	3,11	218	365	25,2	41,8	47,2	53,6
Desvio padrão	0,00	14	27	0,9	0,9	1,2	1,3

A quantidade de fibra adicionada à mistura foi determinada em relação ao peso de solo seco. A quantidade de cimento foi determinada em relação à soma dos pesos de solo seco e de fibra. Desta forma, garante-se que a relação, em massa, entre o peso de cimento com o peso de solo e de fibra é sempre a mesma para uma dada porcentagem de cimento. O peso de água foi calculado em relação ao peso total do material seco (solo, cimento e fibra). Todos os materiais foram pesados com resolução de 0,01 g.

Os corpos de prova foram moldados nas densidades relativas de 40, 70 e 100%, e com um teor de umidade de 10%, admitindo-se como tolerância uma margem de erro de 2% sobre a respectiva densidade ou teor de umidade. Todos os corpos de prova moldados fora destas especificações foram descartados e substituídos. A compactação da mistura foi do tipo estática. Os moldes eram de PVC, bipartidos, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Os corpos de prova eram moldados em três camadas de mesma altura. A qualidade dos corpos de prova era controlada em função do peso específico aparente seco.

Após a moldagem, os corpos de prova eram mantidos ainda dentro dos moldes por 24 horas para que as reações de cimentação conferissem uma resistência mínima e permitissem a desmoldagem dos mesmos sem o risco de quebra do corpo de prova. Depois de desmoldados, as dimensões e o peso dos corpos de prova era determinado para posteriormente serem acondicionados em sacos plásticos devidamente identificados e vedados para evitar perda de umidade.

Os corpos de prova sem cimentação foram compactados diretamente sobre o pedestal da prensa triaxial utilizando-se um molde bipartido apropriado para este tipo de moldagem. Após a compactação, a aplicação de vácuo de 20 kPa na base do corpo de prova permitia a retirada do molde metálico e garantia a integridade do mesmo até a aplicação da tensão confinante.

3.3 – Ensaios Triaxiais Convencionais

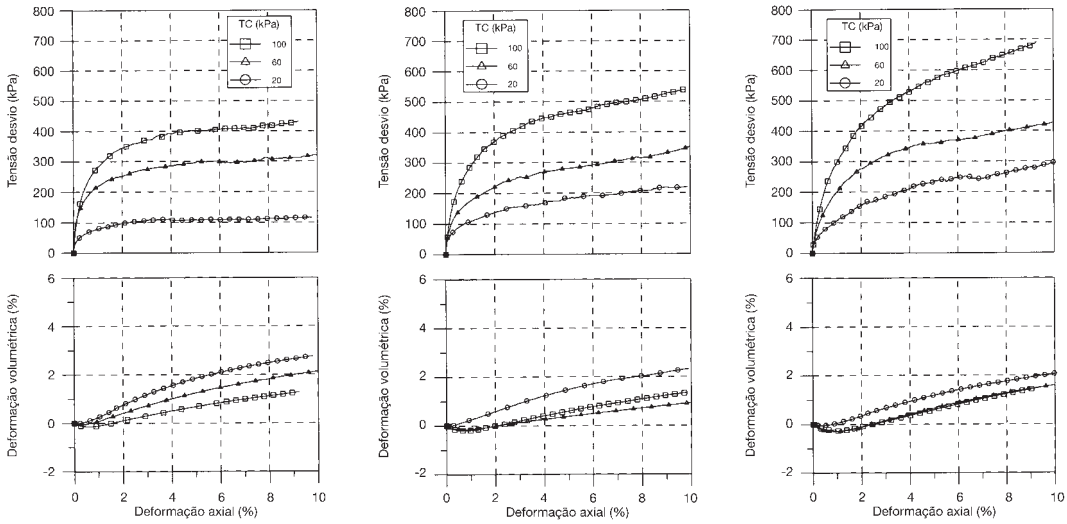
Os ensaios de resistência à compressão triaxial do tipo CID (consolidado isotropicamente e drenado) foram executados sob carregamento estático num equipamento da marca Geonor, com taxa de deformação controlada, acoplado a um sistema de aquisição de dados. As tensões confinantes adotadas foram de 20, 60 e 100 kPa. As medições internas de deformação foram realizadas com sensores de efeito Hall. A medida de variação volumétrica foi executada por um transdutor tipo Imperial College desenvolvido por Maswoswe (1985).

Os procedimentos adotados na execução dos ensaios triaxiais seguem os princípios gerais descritos por Bishop & Henkel (1957) e Head (1982). As correções de membrana e de área seguiram recomendações propostas por La Rochelle *et al*. (1988).

Os ensaios de compressão triaxial foram executados a uma taxa de deformação suficientemente baixa (0,02% por minuto), assegurando a drenagem durante todo o processo de cisalhamento do material, monitorada através da medição da poro pressão gerada durante o carregamento (condição de drenagem assegurada quando não existir geração de poro pressão).

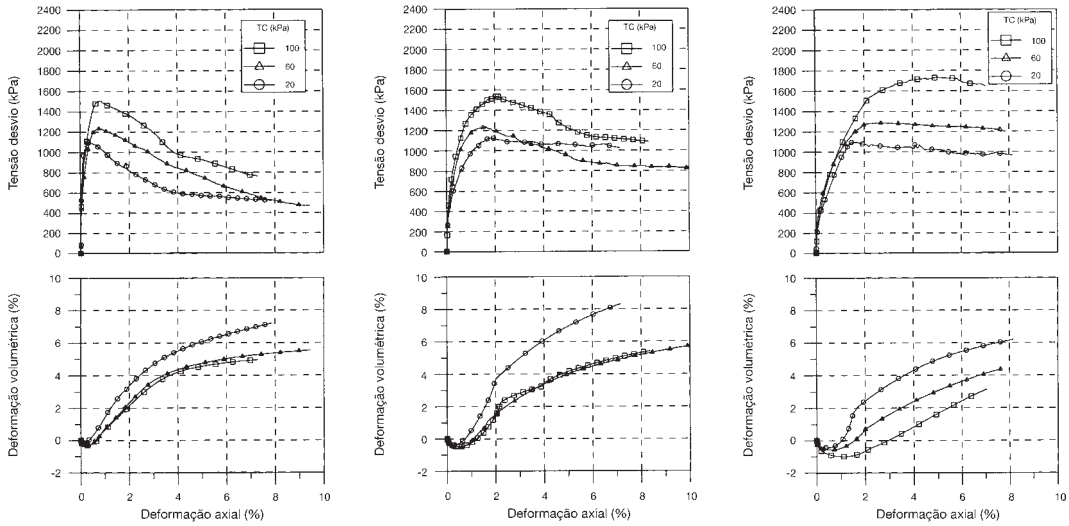
4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nos ensaios triaxiais realizados para avaliar as propriedades mecânicas das matrizes cimentadas e não cimentadas com e sem reforço são apresentados a seguir. O programa experimental foi dividido em dois blocos, devido ao grande número de ensaios. O primeiro bloco compreende os ensaios apresentados nas Figuras 2 e 3, que buscaram avaliar a influência da porcentagem de



a) 0,25% de fibras b) 0,5% de fibras c) 0,75% de fibras

Fig. 2 – Curvas tensão - deformação axial – deformação volumétrica da areia de Osório reforçada com fibras de 24mm



a) 0,25% de fibras b) 0,5% de fibras c) 0,75% de fibras

Fig. 3 – Curvas tensão – deformação axial – deformação volumétrica da areia de Osório reforçada com 7% de cimento

fibras e da introdução de cimento na matriz arenosa. O segundo bloco de ensaios compreende os ensaios triaxiais realizados com o objetivo de avaliar separadamente os efeitos do nível de cimentação, do diâmetro da fibra e da densidade relativa nas variáveis de resposta investigadas (Figuras 4 a 8).

Além da apresentação dos resultados dos ensaios triaxiais convencionais adensados e drenados, nesta etapa é também apresentada uma análise dos dados obtidos. Neste trabalho é utilizada uma análise de regressão múltipla com a finalidade de que se conheçam as relações causais entre os fatores controláveis pesquisados e as variáveis de resposta. Para a realização desta análise é utilizado o programa computacional Statistica. Como os experimentos estão divididos em vários conjuntos de ensaios, a análise dos mesmos é realizada separadamente para cada conjunto experimental, ou seja, cada grupo de ensaios corresponde ao estudo específico do efeito de um fator principal. Os fatores principais estudados englobam o efeito da porcentagem de fibras, do comprimento das fibras, da porcentagem de cimento, da densidade relativa, do diâmetro (título) da fibra e da tensão de confinamento. Para isso, são utilizadas análises de regressão múltipla e de variância para cada variável de resposta. As análises de regressão são importantes, pois fornecem, além do grau de relação entre variáveis dependentes e independentes, uma equação que pode ser usada para previsão dos resultados, as quais são denominadas de modelos. Para estimar o valor de uma determinada variável de resposta a partir de um modelo é necessário utilizar níveis codificados para os fatores controláveis.

A análise de variância (ANOVA) permite determinar o nível de confiança dos modelos gerados pelas regressões. O nível de confiança mínimo aceito é de 95%, tanto para os modelos quanto para a verificação se um determinado fator controlável influencia significativamente a variável de resposta. Ou seja, ao se aceitar a hipótese de que o modelo representa significativamente os pontos experimentais ou que um fator controlável influencia a variável de resposta, há no máximo 5% de probabilidade desta hipótese não ser verdadeira (Nanni & Ribeiro, 1991).

Os modelos gerados através da análise de regressão múltipla para cada variável de resposta têm a seguinte equação geral:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_n \cdot x_n + \cdots + a_{n1n2} \cdot x_{n1} \cdot x_{n2} \quad (2)$$

onde y é a variável de resposta, a_0 é uma constante, a_n é o coeficiente de regressão e x_n é a variável de entrada. A seguir são apresentadas as equações de regressão com suas respectivas constantes, coeficientes e variáveis de entrada (x_1, x_2, x_n) que foram estatisticamente significantes no modelo de regressão para cada variável de resposta avaliada.

Estas equações de regressão são válidas somente no intervalo investigado e para os valores codificados das variáveis de entrada. Os valores reais e codificados das variáveis de entrada são apresentados na Tabela 1 e 2.

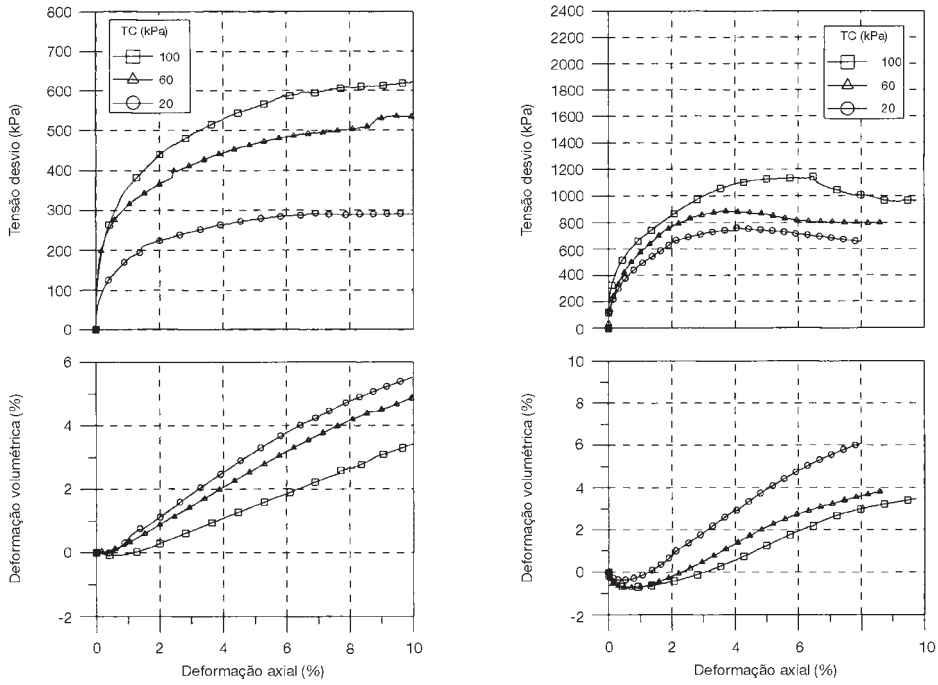
4.1 – Análise dos resultados do primeiro bloco de ensaios

a) Tensão desvio de ruptura (q_{rup})

A partir dos ensaios triaxiais realizados foram executadas análises de regressão para avaliar quais dos fatores controláveis investigados influenciam a tensão desvio de ruptura (q_{rup}). É importante ser salientado que nos casos onde a ruptura é dúctil, o valor da tensão desvio na ruptura (q_{rup}) foi estabelecido para uma deformação axial máxima de 10%. Baseado nos valores de tensão desvio de ruptura dos ensaios triaxiais, o seguinte modelo estatístico foi obtido:

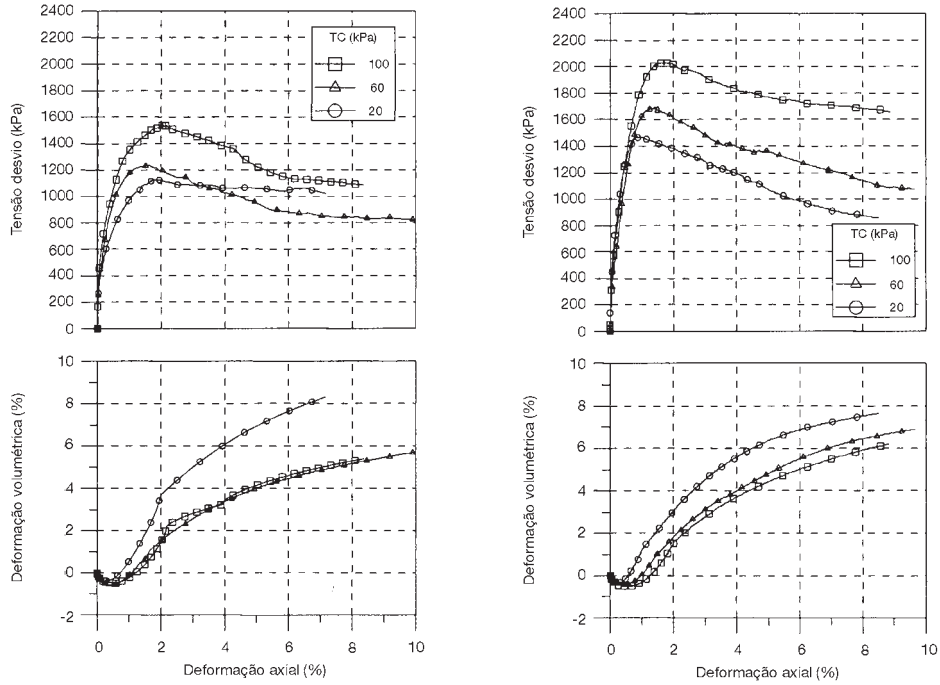
$$q_{rup}\,[\text{kPa}] = 812 + 42 \cdot CF + 491 \cdot PC + 60 \cdot PF + 202 \cdot TC - 30 \cdot CF^2 - 53 \cdot CF \cdot PC + 49 \cdot CF \cdot PF - 55 \cdot PC \cdot PF + 58 \cdot PC \cdot TC \quad (3)$$

o qual possui um nível de confiança de 95%, um R^2_{ajustado}=0,986, ou seja, o modelo responde por uma variabilidade de 98,6% dos valores de q_{rup}, e ainda, possui um erro padrão ε_p de 62,86 kPa.



a) 1% de cimento

b) 4% de cimento



a) 1% de cimento

b) 4% de cimento

Fig. 4 – Curvas tensão - deformação axial - deformação volumétrica da areia de Osório reforçada com 0,50% de fibras.

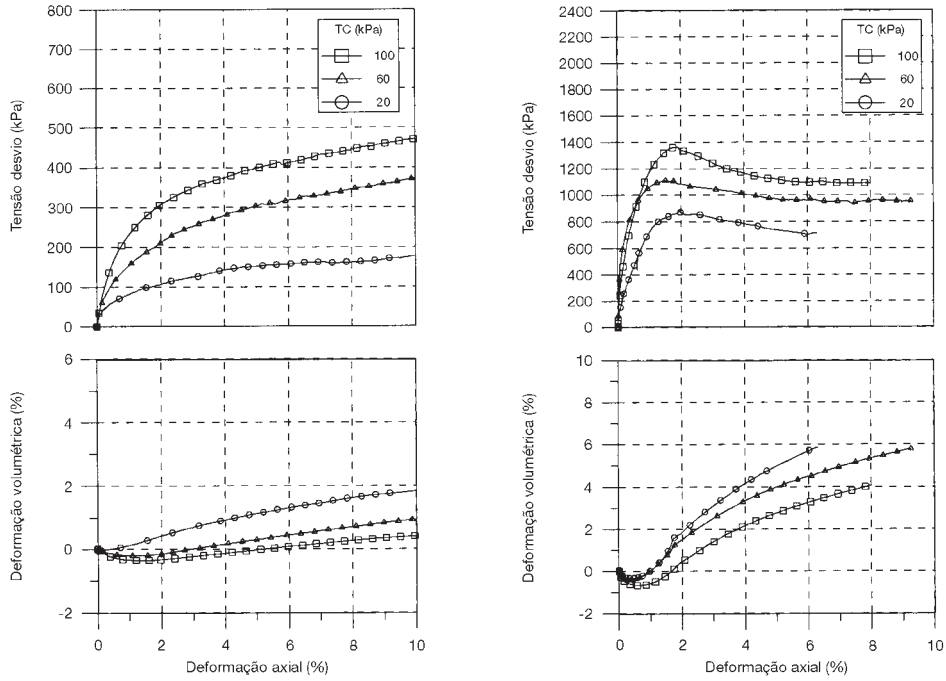


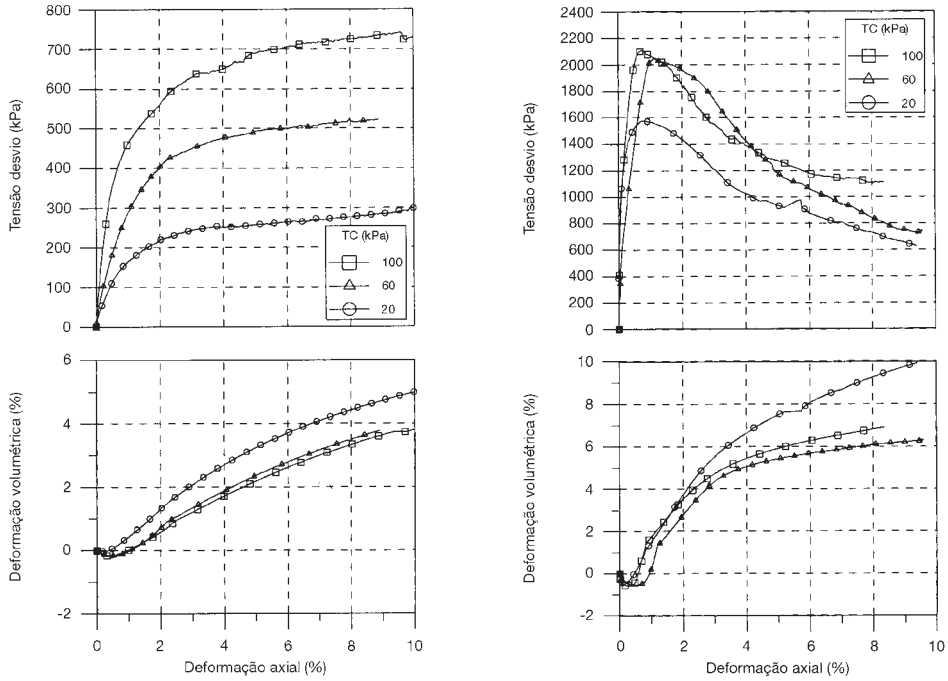
Fig. 5 – Curvas tensão - deformação axial - deformação volumétrica da areia de Osório reforçada com 0,50% de fibras 24mm e Dr = 40%.

Observa-se na Equação 3 que há um efeito principal dos fatores investigados e um efeito de interação entre os mesmos, com um efeito quadrático do comprimento da fibra. O coeficiente de regressão de cada fator controlável indica a contribuição relativa de cada variável investigada na tensão desvio de ruptura. Como esperado, a porcentagem de cimento aparece como sendo o fator mais importante.

Os efeitos do comprimento da fibra (CF) e da porcentagem de fibra (PF) na tensão desvio de ruptura ficam mais evidentes nas Figuras 9 e 10, onde o modelo obtido é plotado com os dados experimentais.

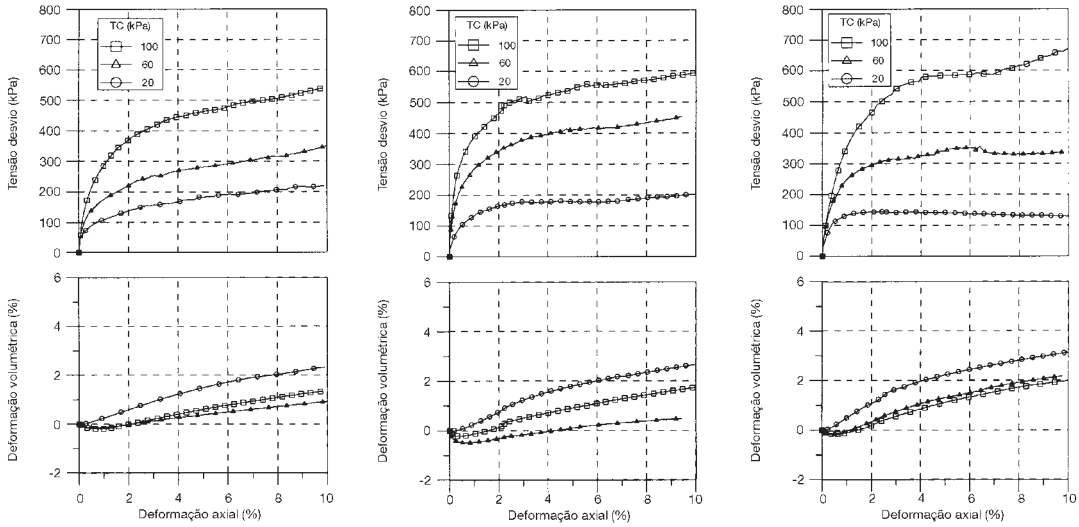
A eficiência do reforço com fibras é dependente da cimentação, pois o acréscimo da resistência com a variação do comprimento e da porcentagem de fibra é maior para a areia não cimentada. A Equação 3 reforça essa afirmação onde se observa a interação da porcentagem de cimento com o comprimento e com a porcentagem de fibra. Na Figura 9 observa-se ainda que a variação do comprimento da fibra de 24 para 36 mm não influencia significativamente a resistência do material cimentado. Este fato sugere que para as fibras de 12 mm, embora a quantidade de fibras que provavelmente possa atravessar a superfície de ruptura seja maior, a ancoragem da fibra não é tão eficiente e é facilmente arrancada. Por outro lado, com a utilização de fibras de 24 mm, esta ancoragem melhora e aumenta a eficiência do reforço, mesmo que a quantidade de fibras seja menor. Já com relação às fibras de 36 mm, parece que o aumento no comprimento de ancoragem compensa o decréscimo ainda maior na quantidade de fibras. Portanto, a contribuição das fibras depende da fragilidade. Ao se instalar uma só superfície de ruptura (comportamento frágil), o arrancamento concentra-se nesta superfície, logo implica na contribuição de um número restrito de fibras. No caso de um material dúctil, o número de fibras mobilizadas é muito maior.

Considerando as Figuras 9 e 10, o paralelismo entre as curvas ou retas indica que há uma variação linear de com a tensão de confinamento, porém, o efeito da tensão de confinamento é maior



a) 0% de cimento b) 7% de cimento

Fig. 6 – Curvas tensão - deformação axial - deformação volumétrica da areia de Osório reforçada com 0,50% de fibras 24mm e Dr = 100%.



a) 3,3 dtex b) 17 dtex c) 88 dtex

Fig. 7 – Curvas tensão - deformação axial - deformação volumétrica da areia de Osório reforçada com 0,5% de fibras 24mm e 0% de cimento

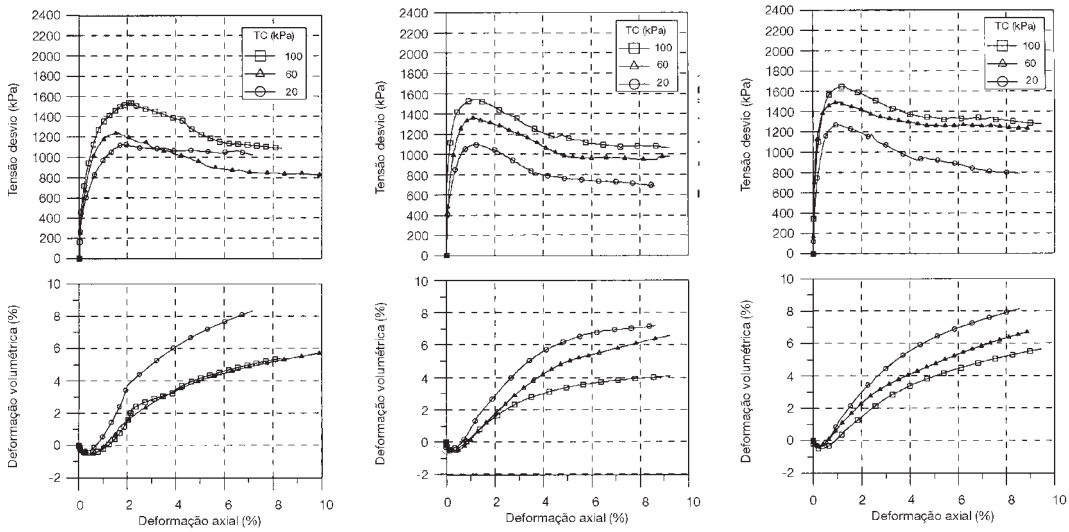


Fig. 8 – Curvas tensão - deformação axial - deformação volumétrica da areia de Osório cimentada reforçada com 0,5% de fibras 24mm e 7% de cimento

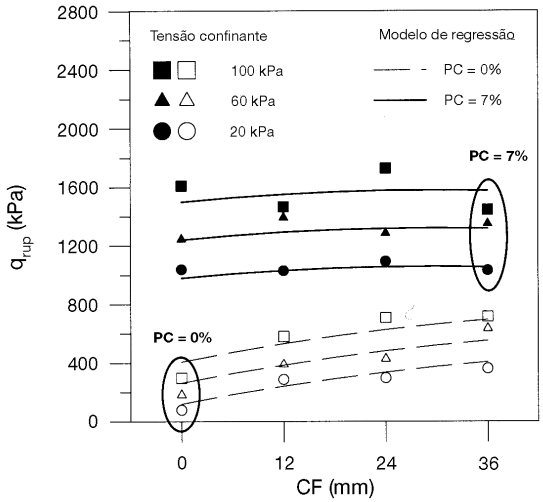


Fig. 9 – Influência do comprimento da fibra (CF) sobre a tensão desvio de ruptura – q_{rup} (PF=0,75%).

para a areia cimentada, justificando assim, a interação entre a porcentagem de cimento e a tensão confinante (Equação 3).

b) Índice de fragilidade (I_f)

Um modelo de regressão específico para o material cimentado e outro para o material sem cimentação foram obtidos através da análise de regressão múltipla para modelar o comportamento dos materiais. Desta forma, os modelos representam melhor os dados experimentais em relação a um modelo único.

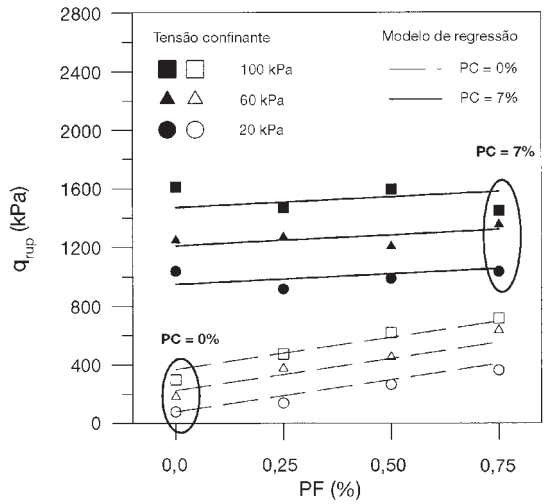


Fig. 10 – Influência da porcentagem de fibra (PF) sobre a tensão desvio de ruptura – q_{rup} (CF=36mm).

Para o material não cimentado, foi obtido o modelo indicado abaixo. O nível de confiança do modelo é de 95%, possui um $R^2_{ajustado}$=0,684 e ε_p=0,04.

$$I_f = 0{,}004 - 0{,}04 \cdot CF - 0{,}04 \cdot PF - 0{,}02 \cdot TC + 0{,}05 \cdot CF^2 + 0{,}05 \cdot PF^2 \quad (4)$$

A análise de regressão múltipla do material cimentado indicou o seguinte modelo:

$$I_f = 1{,}2 - 1{,}2 \cdot CF - 1{,}3 \cdot PF - 0{,}77 \cdot TC + 1{,}1 \cdot CF^2 + 0{,}9 \cdot PF^2 - 0{,}8 \cdot CF \cdot PF + 0{,}7 \cdot CF \cdot TC \quad (5)$$

que possui um nível de confiança de 95% e responde por 74,35% da variabilidade de I_f. O erro padrão da estimativa (ε_p) é de 1,01.

Os efeitos de CF e de PF no índice de fragilidade do material cimentado e não cimentado podem ser melhor observados nas Figuras 11 e 12. De um modo geral, a inclusão das fibras reduziu drasticamente o índice de fragilidade do material cimentado, modificando o comportamento extremamente frágil do material a um comportamento dúctil. Neste caso, a influência dos fatores CF e PF indicam que maiores comprimentos de fibras e maiores teores de fibra contribuem ainda mais para reduzir a fragilidade. A influência de TC apareceu como um fator pouco expressivo sobre I_f devido à grande influência de CF e PF (Equações 4 e 5).

4.2 – Análise dos resultados do segundo bloco de ensaios

As variáveis de entrada dos modelos de regressão são apresentadas na Tabela 2 com seus respectivos valores reais e codificados.

4.2.1 – Variação da porcentagem de cimento

a) Tensão desvio de ruptura (q_{rup})

A análise de regressão indicou quais os fatores controláveis investigados que foram significantes, portanto, obteve-se a seguinte equação de regressão:

$$q_{rup}\ [\text{kPa}] = 903 + 817 \cdot PC + 194 \cdot TC + 196 \cdot PC^2 - 153 \cdot PC \cdot PF \quad (6)$$

a qual, possui um nível de confiança de 95%, um $R^2_{ajustado}$=0,974 e ε_p =106 kPa.

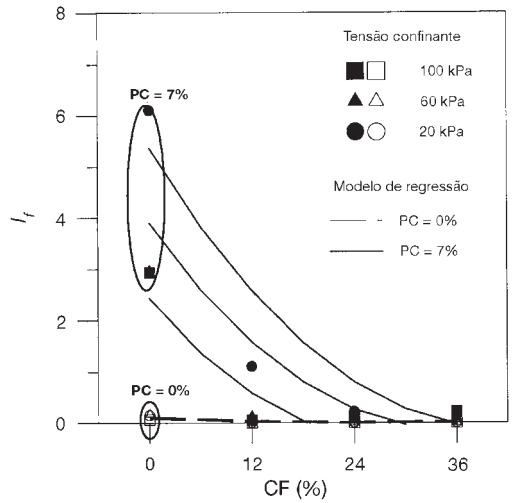


Fig. 11 – Influência do comprimento da fibra (CF) sobre o índice de fragilidade I_f (PF=0,75%).

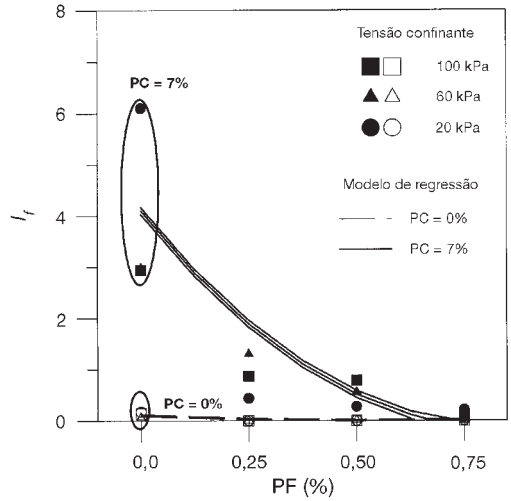


Fig. 12 – Influência da porcentagem de fibra (PF) sobre o índice de fragilidade I_f (CF=36mm)

Através desta equação foi possível obter-se a Figura 13, na qual há uma comparação entre o modelo e os dados experimentais. É possível observar nesta figura que o efeito da porcentagem de cimento sobre q_{rup} dependo do nível de PF. A Equação 6 indica que não há um efeito principal de PF e um efeito de interação entre PC e PF. Ou seja, a uma porcentagem de cimento abaixo de 5%, aproximadamente, a fibra tem um efeito positivo, isto é, aumenta a resistência em relação ao material cimentado sem reforço. Porém, a teores de cimento acima de 5%, há um decréscimo de com a adição da fibra.

b) Índice de fragilidade (I_f)

Através da análise de regressão foi possível obter um modelo representado graficamente na Figura 14 e analiticamente através Equação 7.

$$I_f = 1{,}85 + 1{,}39 \cdot PC - 1{,}40 \cdot PF - 0{,}89 \cdot TC - 1{,}13 \cdot PC \cdot PF + 0{,}77 \cdot PF \cdot TC \quad (7)$$

Este modelo possui um nível de confiança de 95%, um $R^2_{ajustado}$=0,779 e um ε_p = 1,11.

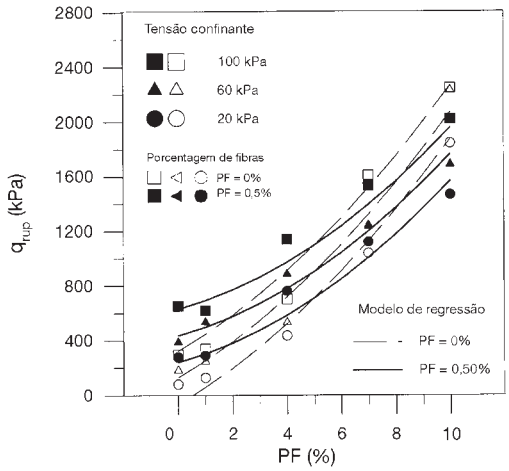


Fig. 13 – Influência da percentagem de cimento (PC) sobre a tensão desvio de ruptura - q_{rup}.

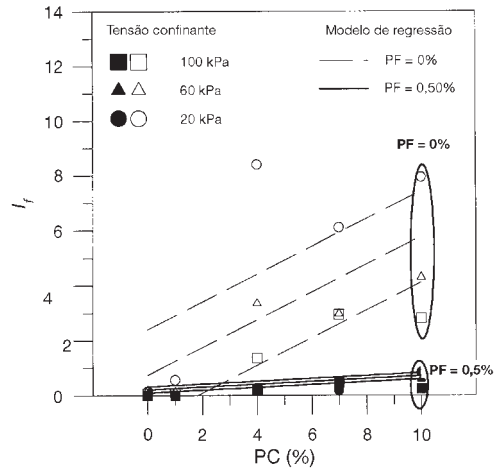


Fig. 14 – Influência da porcentagem de cimento (PC) sobre o índice de fragilidade I_f.

Como já mencionado anteriormente, a cimentação aumenta drasticamente o valor de I_f tornando a matriz extremamente frágil. Por outro lado, a fibra é um elemento que se opõe a esta característica, ou seja, torna o material mais dúctil. A tensão de confinamento também é um fator que contribui na redução da fragilidade, tendo maior efeito no material sem reforço.

4.2.2 – Variação da densidade relativa

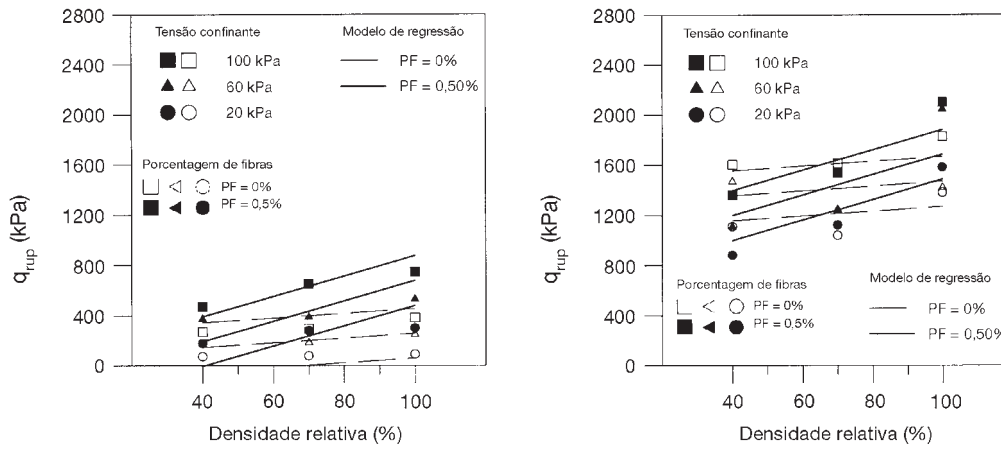
a) Tensão desvio de ruptura (q_{rup})

Os resultados experimentais juntamente com a representação gráfica do modelo de regressão são mostrados na Figura 15. Este modelo é regido pela seguinte equação:

$$q_{rup}\ [\text{kPa}] = 871 + 553 \cdot PC + 66 \cdot PF + 198 \cdot TC + 149 \cdot D_r - 51 \cdot PC \cdot PF + 94 \cdot PF \cdot D_r \quad (8)$$

com um nível de confiança de 95%, um $R^2_{\text{ajustado}} = 0{,}969$ e um erro padrão de 109 kPa.

O que se percebe na Figura 15 é que a densidade relativa tem um forte efeito sobre q_{rup} quando há a presença da fibra, tanto no material cimentado como no material não cimentado. Este fato também explica a interação existente entre D_r e PF na Equação 8. De um modo geral, o aumento da densidade relativa acarreta num acréscimo de q_{rup}. Um fato curioso, em se tratando do material cimentado, é que quando a densidade relativa é menor que 70%, a resistência do material reforçado com fibras é menor do que a resistência do material sem reforço. Porém, quando a densidade relativa é maior do que 70%, o efeito é inverso, ou seja, a resistência do material reforçado é maior do que a resistência do material sem reforço. Isto leva a crer que a fibra interage melhor com o material cimentado quando a quantidade de vazios é pequena e, portanto, há maior número de contatos entre fibra e matriz.



a) 0% de cimento b) 7% de cimento

Fig. 15 – Influência da densidade relativa (D_r) sobre a tensão desvio de ruptura - q_{rup}.

b) Índice de fragilidade (I_f)

Segundo a análise de regressão realizada com os dados experimentais obtidos, a variação da densidade relativa não afetou de forma significativa o índice de fragilidade.

4.2.3 – Variação do diâmetro das fibras

a) Tensão desvio de ruptura (q_{rup})

O seguinte modelo foi obtido através da análise de regressão:

$$q_{rup}\ [\text{kPa}] = 885 + 486 \cdot PC + 214 \cdot TC + 53 \cdot PC \cdot TF \qquad (9)$$

que possui um nível de confiança de 95%, um $R^2_{\text{ajustado}} = 0{,}991$ e um erro padrão ε_p de 49,87 kPa.

Na Figura 16 observa-se que, aumentando o diâmetro (título) da fibra (TF), diminui a resistência do material não cimentado e aumenta a resistência do material cimentado. Isto ocorre porque com o acréscimo do diâmetro da fibra diminui a quantidade de fibras na matriz, já que se mantém constante o peso de fibras.

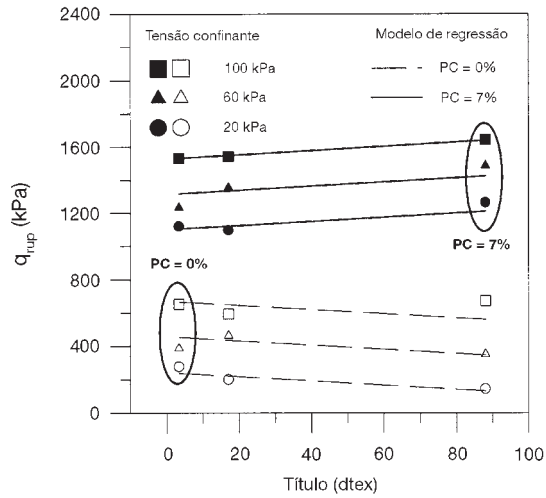


Fig. 16 – Influência do título da fibra (TF) sobre a tensão desvio de ruptura - q_{rup}.

5 – CONCLUSÕES

O estudo do comportamento mecânico de uma areia cimentada reforçada com fibras de polipropileno, juntamente com a análise de regressão múltipla realizada, permitiu estabelecer as seguintes conclusões:

- A cimentação, representada pela porcentagem de cimento, bem como a tensão de confinamento, exerce forte influência sobre as características de resistência. Basicamente, a cimentação aumenta a tensão desvio de ruptura e o índice de fragilidade.
- De um modo geral, a adição de fibras ao solo, com ou sem cimentação, altera suas características de resistência e ductilidade. Considerando a matriz não cimentada, as fibras possuem a capacidade de mobilizar resistência mesmo quando submetidas a grandes deformações. Já para a matriz cimentada, a adição de fibras proporciona um aumento da ductilidade do material. Além disso, há um aumento da deformação axial e da deformação volumétrica na ruptura do compósito solo-cimento-fibra.
- O acréscimo da resistência com a variação do comprimento e da porcentagem de fibras é maior para a areia não cimentada. O aumento do comprimento e da porcentagem de fibras contribui para a redução da fragilidade.
- A densidade relativa tem um forte efeito sobre a resistência do material reforçado com fibras, tanto cimentado como sem cimentação. Com o aumento da densidade relativa, há um acréscimo da resistência do material reforçado com fibras em relação ao material sem reforço, considerando a matriz não cimentada. Com relação ao material cimentado, se está no estado fofo, a adição de fibras proporciona uma queda na resistência. Por outro lado, se o material está no estado denso, ocorre um ganho de resistência.
- As tendências e influências das várias variáveis no comportamento do compósito foram definidas adequadamente pelos modelos gerados através da análise de regressão múltipla.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Projetos Edital Universal 471396/03 e Integrado 520610/95-4) e à CAPES (Projeto ProDoc), pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society For Testing And Materials. (1993) *Standard Classification of Soils for Engineering Purposes:* D 2487. Philadelphia, 11p.

Andersland, O. B.; Kattak, A. S. (1979) *Shear strength of Kaolinite/fiber soil mixtures*. In: International Conference on Soil Reinforcement, 1979, Paris. p.11-16.

Associação Brasileira de Norma Técnicas. (1995) *Rochas e solos – Terminologia:* NBR 6502. Rio de Janeiro, 18p.

Bishop, A. W.; Henkel, D. J. (1957) *The measurement of soil properties in the triaxial test*. London: Edward Arnold, 191p.

Casagrande, M. D. T. (2001) *Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais,* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 94p.

Casagrande, M. D. T; Consoli, N. (2002) *Estudo do comportamento de um solo residual arenosiltoso reforçado com fibras de polipropileno*. Solos e Rochas, São Paulo, ABMS/ABGE, v.25, n.3, p.223-230.

Consoli, N. C.; Prietto, P. D. M.; Ulbrich, L. A. (1999) *The behaviour of a fibre-reinforced cemented soil*. Ground Improvement, ISSMGE, v.3. n.3, p.21-30.

Consoli, N.C.; Montardo, J. P.; Prietto, P. D. M.; Pasa, G.S. (2002) *Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, v.128, n.6, p.462-472.

Consoli, N. C.; Vendruscolo, M. A.; Prietto, P. D. M. (2003) *Behavior of Plate load tests on soil layers improved with cement and fiber.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, v.129, n.1, p.96-101.

Crockford, W. W.; Grogan, W. P.; Chill, D. S. (1993) *Strength and life of stabilized pavement layers containing fibrillated polypropylene*. Transportation Research Record, Washington D.C., n.1418, p.60-66.

Fatani, M. N.; Bauer, G. E.; Al-Joulani, N. (1991) *Reinforcing soil with aligned and randomly oriented metallic*. Geotechnical Testing Journal, Philadelphia, v.14, n.1, p. 78-87.

Feuerharmel, M. R. (2000) *Estudo do comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno,* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. 131p.

Gray, D. H.; Al-Refeai, T. (1986) *Behavior of fabric versus fiber-reinforced sand*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v.112, n.8, p.804-820.

Gray, D. H.; Maher, M.H. (1989) *Admixture stabilization of sands with random fibers*. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 12. Rio de Janeiro, Rotterdam: A.A. Balkema, 1989, v.2, p.1363-1366.

Gray, D. H.; Ohashi, H. (1983) *Mechanics of fiber reinforcement in sand*. Journal of Geotechnical. Engineering, ASCE, v.109, n.3, p.335-353.

Head, K. H. (1982) *Manual of soil laboratory testing*. London: Pentech Press, 3v.,339p.

Heineck, K. S. (2002) *Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras impermeáveis horizontais*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 251p.

Jewell, R. A.; Wroth, C. P. (1987) *Direct shear tests on reinforced sand*. Géotechnique, London, v.37, n.1, p.53-68.

Kaniraj, S. R.; Havanagi, V. G. (2001) *Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced fly ash-soil mixtures*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Reston, v.127, n.7, p.574-584.

La Rochelle, P.; Leroueli, S.; Trak, B.; Blais-Leroux, L. Tavenas, F. (1988) *Observational approach to membrane and area corrections in triaxial tests*. In: Symposium on Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, 1986, Louisville. Philadelphia: American Society of Testing Materials, 1988. 1v, p. 715-731.

Maher, M. H.; Ho, Y. C. (1993) *Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads*. Geotechnical Testing Journal, ASTM, v.16, p.330-338.

Maher, M. H.; Ho, Y. C. (1994) *Mechanical properties of kaolinite / fiber soil composite*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v.120, n.8, p.1381-1393.

Maswoswe, J. J. (1985) *"Stress path method for a compacted soil during collapse due to wetting",* Ph.D. thesis, University of London.

McGown, A.; Andrawes, K. Z.; Al-Hasani, M.M. (1978) *Efect of inclusion properties on the behavior of sand*. Géotechnique, London, v.28, n.3, p.327-346.

McGown, A.; Andrawes, K. Z.; Hytiris, N. Mercer, F. B. (1988) *Soil strengthening using randomly distributed mesh elements*. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 11., São Francisco, 1988, v.3, p.1735-1738.

Michalowski, R. L.; Cermák, J. (2003) *Triaxial compression of sand reinforced with fibers*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.129, n.2, p.125-136.

Montardo, J. P. (1999) *Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades do materiais constituintes,* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. 130p.

Montardo, J. P.; Consoli, N. C.; Prietto, P. D. M. (2001) *Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: efeito das propriedades dos materiais constituintes*. Solos e Rochas, São Paulo, ABMS/ABGE, v.24, n.3. p. 191–209.

Morel, J. C.; Gourc, J. P. (1997) *Mechanical behavior of sand reinforced with mesh elements*. Geosynthetics International, v.4, n.5, p.481-508.

Nanni, L. F.; Ribeiro, J. P. (1991) Planejamento a avaliação de experimentos. RPGEC/UFRES, Porto Alegre, (Caerno de Engenharia 17/87).

Natarj, M. S.; Addula, H. R.; McManis, K. L. (1996) *Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils*. In: International Symposium on Environmental Geotechnology, 3., San Diego, 1996. Pennsylvania: Technomic Publishing Co., Inc. v.1, p.826-835.

Ranjan, G. R. Charan, H. D. (1996) *Probabilistic analysis of randomly distributed fiber- reinforced soil*. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.122, n.6, p.419-426.

Santoni, R. L.; Tingle, J. S.; Webster, S. L. (2001) *Engineering Properties of sand-fiber mixtures for road construction*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.127, n.3, p.258-268.

Shewbridge, E.; Sitar, N. (1989) *Deformation characteristics of reinforced sand in direct shear.* Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.115, n.8, p.1134-1147.

Shewbridge, E.; Sitar, N. (1990) *Deformation-based model for reinforced sand*. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.116, n.7, p.1153-1170.

Specht, L. P. (2000) *Comportamento de misturas de solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação,* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. 132.

Specht, L. P.; Heineck, K.S.; Ceratti, J.A.P.; Consoli, N.C., (2002) *Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos*. Solos e Rochas, v.25, n.1, p. 15-34.

Spinelli, L. F. (1999) *Comportamento de fundações superficiais em solos cimentados*. Porto Alegre, Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 133p.

Teodoro, J. M. (1999) *Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas*. São Paulo. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de São Carlos/ USP. 108p.

Ulbrich, L. A. (1997) Aspectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras. Porto Alegre. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. 122p.

LISTA DE SÍMBOLOS

Foram utilizados os seguintes símbolos neste artigo técnico:

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
CF	comprimento da fibra
CID	ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados
C_c	coeficiente de curvatura
C_u	coeficiente de uniformidade
D_r	densidade relativa
D_{10}	diâmetro efetivo dos grãos do solo
D_{50}	diâmetro médio dos grãos do solo
e_{max}	índice de vazios máximo
e_{min}	índice de vazios mínimo
I_f	índice de fragilidade
NBR	Norma Brasileira
PC	porcentagem de cimento
PET	Polietileno Tereftalato
PF	porcentagem de fibra
CPV-ARI	cimento Portland de alta resistência inicial
PVC	Acetato de Polivinila
q_{rup}	tensão desvio de ruptura medida no ensaio triaxial (nos casos com ruptura dúctil, o valor da tensão desvio na ruptura (qrup) foi estabelecido para uma deformação axial de 10%)
q_{ult}	tensão desvio última medida no ensaio triaxial (definido para uma deformação axial de 10%).
$R^2_{ajust.}$	Coeficiente de determinação ajustado
ε_p	Erro padrão
TC	tensão confinante
TF	título da fibra