

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM SOLO REFORÇADO COM FIBRAS DE  
POLIPROPILENO VISANDO O USO COMO BASE DE FUNDAÇÕES  
SUPERFICIAIS**

**MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE**

Dissertação apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia**.

Porto Alegre  
Março de 2001

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / UFGRS.

---

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Orientador

---

Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal  
Coordenador do PPGEC

#### **BANCA EXAMINADORA**

- Prof. Alexandre Benetti Parreira  
D.Sc. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
  
- Prof. Anna Laura Lopes da Silva Nunes  
Ph.D. Universidade de Montreal – Canadá
  
- Prof. Antônio Thomé  
D.Sc. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

*Dedico este trabalho aos  
meus pais, Nestor e Mirta  
e à memória dos meus avós,  
Fioravante e Margrit Dal Toé*

## AGRADECIMENTOS

Eu acreditei que conseguiria chegar aqui durante esses dois anos de mestrado... Agora chegou o momento de registrar aqui as pessoas que de uma forma ou de outra tiveram uma participação fundamental para que essa dissertação chegasse ao fim.

Na realidade, essa pesquisa teve seu início há quatro anos atrás, quando pelas mãos dos Profs. Antônio Thomé, Roberto Naime, e André Geyer comecei o aprendizado da Mecânica dos Solos e de Fundações, realizando o trabalho de conclusão de curso, na UPF. Agradeço a estes professores também por terem oportunizado meu ingresso no PPGEC/UFRGS. Muito obrigado pelo incentivo e pela confiança em mim depositados!

Agradeço de uma forma muito especial ao meu orientador e, sobretudo amigo, Prof. Nilo Cesar Consoli, pelo tamanho interesse e dedicação, pela disponibilidade, pelo otimismo e entusiasmo sempre presentes nas conversas a cada resultado obtido, pela força e pelo apoio nas horas difíceis... Pelas idas ao campo experimental, sempre disposto, carregando blocos de solo-fibra, sujando o carro e tal... E também pela seriedade, competência e profissionalismo em todos os momentos dessa orientação. Com certeza esse reconhecimento fica presente para o prosseguimento da minha carreira profissional. Obrigada Nilo!

Um agradecimento super especial fica aos meus colegas e amigos, doutorandos Karla Heineck e Márcio Vendruscolo. Eles foram minha “luz no fim do túnel”. À Karla pela imensa paciência e disponibilidade em me ensinar e ajudar com os ensaios triaxiais, e principalmente pela ótima amizade e parceria nos congressos! Ao Márcio também pelas ajudas dispensadas no laboratório, mas, antes de tudo, pela paciência e por todos os aprendizados e auxílios com os ensaios de placa em campo... Não tenho nem palavras para agradecer... Valeu mesmo!!

Agradeço a todos os professores do PPGEC/Geotecnia: Nilo Cesar Consoli, Fernando Schnaid, Anna Laura L. S. Nunes, Luis Antonio Bressani, Adriano Virgilio Bica, Way Ying Yuk Gehling, Jorge Augusto Pereira Ceratti, Washington Peres Nuñez e Carlos Maciel pelos ensinamentos ministrados e pela amizade adquirida.

Gostaria de agradecer a todos os colegas de mestrado e doutorado em geral, pela amizade, companheirismo, apoio, alegrias e tristezas... Cito alguns em especial: Hariane Machado Marmitt (aqui vale um agradecimento pela “divisão” do apto. durante quase dois anos de muita risada e choro de vez em quando!), Ana Paula Pestana Cardoso e Cristiane

Schmitt Vieira (pelas madrugadas estudando para a “prova do Bressani”), e também Gioconda Martinez (quantas risadas!), Mirtes Ramires, Gabriela Maluf Medero (pela parceria nos congressos), Clarice Bleil, Cristian Castilhos, Leonardo Becker, Marlova Johnston, Mário Goulart, Pedro Ferreira, Fernando Mántaras, Giovane Rotta e Marcelo Rigo. Não me esquecendo dos colegas Luciano Specht e Marcos Feuerharmel, que muito me aconselharam e me encaminharam para o estudo com fibras. Agradeço também ao colega e doutorando Pedro Prietto pelo interesse a pelas ajudas prestadas na conclusão da dissertação e no encaminhamento dos artigos técnicos. Muito obrigado a todos!

Deixo meus sinceros agradecimentos à bolsista de iniciação científica Simone Amador, pelos auxílios no início da dissertação e principalmente à bolsista e amiga Fabíola Silveira, pela dedicação e total responsabilidade nas tarefas de laboratório. Não esquecendo de todos os outros bolsistas, pela amizade e ajudas dispensadas, e também do bolsista, hoje mestrando, Vinícius de Aguiar, por todos os auxílios tanto no laboratório como em campo, ajudando na preparação dos aterros de solo-fibra (que sujeira!), mas principalmente pela amizade, conversas e muitas risadas!

Aos funcionários do PPGEC pelo apoio, especialmente ao laboratorista Jair Floriano da Silva pelas ajudas indispensáveis no laboratório e pela colaboração durante a realização dos ensaios de campo, e também ao João Diniz, pela paciência, pelas “caronas” e pelos muitos auxílios no campo experimental em Cachoeirinha, a ambos meu muito obrigado!

À Fitesa Fibras e Filamentos S/A e ao colega Júlio Portella Montardo, pelas sugestões e pelas fibras gentilmente cedidas para a realização deste estudo. Ao PPGEC/UFRGS, CNPq e CAPES pelo auxílio financeiro concedido para a realização dos ensaios de campo.

Ao Rodrigo, por toda compreensão, apoio, paciência, incentivo, carinho, amizade e amor... Por me ajudar a desfiar as fibras e pela parceria nos ensaios de campo, pois como ele mesmo disse “nunca esperei tanto tempo para ver um pedaço de solo romper!”. Valeu Rodri!

Agradeço o apoio, incentivo e carinho dos meus avós Fioravante e Margrit, que iriam se sentir muito orgulhosos por ver mais uma etapa concluída. Não esquecendo dos meus avós Dante e Iria por todo o carinho a mim concedido. À Mirna pelas conversas...

Obrigado pai e mãe... Por todo amor, amizade, carinho e dedicação que sempre recebi de vocês, pelo apoio e compreensão... Amo vocês, muito, muito!! Ah mãe, obrigada pela ajuda com as fibras também! Finalmente... Agradeço à Deus... Pela vida, por tudo!

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	xii
RESUMO .....	xiv
ABSTRACT .....	xv

### CAPÍTULO 1

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	4

### CAPÍTULO 2

<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	6
2.2 BREVE HISTÓRICO SOBRE SOLOS REFORÇADOS.....	7
2.3 MELHORIA, ESTABILIZAÇÃO E REFORÇO DE SOLOS.....	7
2.4 MATERIAIS COMPÓSITOS FIBROSOS.....	9
2.5 TIPOS DE FIBRAS UTILIZADAS EM COMPÓSITOS FIBROSOS.....	12
<b>2.5.1 Fibras Naturais.....</b>	<b>12</b>
<b>2.5.2 Fibras Poliméricas.....</b>	<b>12</b>
<b>2.5.3 Fibras Minerais.....</b>	<b>14</b>
<b>2.5.4 Fibras Metálicas.....</b>	<b>15</b>
2.6 MECANISMOS DE INTERAÇÃO SOLO-FIBRA.....	15
2.7 MUDANÇAS NO COMPORTAMENTO DOS SOLOS DEVIDO À INCLUSÃO DE FIBRAS.....	19
<b>2.7.1 Alterações nas Características de Compactação dos Solos.....</b>	<b>24</b>
<b>2.7.2 Resistência de Pico.....</b>	<b>25</b>

2.7.3 Resistência Pós-Pico.....	26
2.7.4 Deformabilidade .....	26
2.7.5 Variação Volumétrica.....	27
2.7.6 Modo de Ruptura .....	27
2.7.7 Condutividade Hidráulica e Outras Propriedades .....	28
2.8 PROVA DE CARGA EM PLACA.....	29

### **CAPÍTULO 3**

<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>35</b>
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	35
3.2 PROJETO DE EXPERIMENTOS.....	35
<b>3.2.1 Variáveis Investigadas .....</b>	<b>36</b>
<b>3.2.2 Variáveis de Resposta.....</b>	<b>37</b>
3.3 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	39
<b>3.3.1 Solo.....</b>	<b>39</b>
<b>3.3.2 Água.....</b>	<b>41</b>
<b>3.3.3 Fibras.....</b>	<b>42</b>
3.4 ETAPA DE LABORATÓRIO.....	42
<b>3.4.1 Programa de Ensaios.....</b>	<b>43</b>
<b>3.4.2 Preparação dos Corpos de Prova.....</b>	<b>43</b>
<b>3.4.3 Ensaios de Compactação.....</b>	<b>45</b>
<b>3.4.4 Ensaios de Compressão Triaxial.....</b>	<b>45</b>
3.5 ETAPA DE CAMPO.....	46
<b>3.5.1 Descrição do Campo Experimental.....</b>	<b>46</b>
<b>3.5.2 Preparação e Execução dos Ensaios de Placa.....</b>	<b>48</b>
3.5.2.1 Preparação da Cava e Construção das Bases de Fundação.....	48
3.5.2.2 Equipamento do Ensaio.....	51
<b>3.5.3 Método de Ensaio.....</b>	<b>53</b>

## **CAPÍTULO 4**

<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO E DE CAMPO.....</b>	<b>55</b>
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	55
4.2 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO.....	55
4.3 ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL.....	56
<b>4.3.1 Influência da Tensão de Confinamento e da Inclusão de Fibras.....</b>	<b>56</b>
4.3.1.1 Trajetória de Tensões Efetivas.....	57
4.3.1.2 Curvas Tensão-deformação Axial e Variação Volumétrica.....	58
4.3.1.3 Envoltórias e Parâmetros de Resistência.....	62
<b>4.3.2 Influência da Velocidade de Carregamento.....</b>	<b>66</b>
<b>4.3.3 Comportamento Carga-Descarga-Recarga.....</b>	<b>67</b>
<b>4.3.4 Influência da Umidade e da Inclusão de Fibras.....</b>	<b>70</b>
<b>4.3.5 Efeito da Variação do Teor de Fibra.....</b>	<b>71</b>
<b>4.3.6 Efeito da Variação do Comprimento de Fibra.....</b>	<b>73</b>
<b>4.3.7 Efeito da Variação do Título da Fibra.....</b>	<b>74</b>
4.4 ENSAIOS DE PLACA – COMPORTAMENTO CARGA-RECALQUE.....	76
4.5 ENSAIOS TRIAXIAIS - COMPARAÇÃO CAMPO / LABORATÓRIO.....	79

## **CAPÍTULO 5**

<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>81</b>
5.1 SUMÁRIO E CONCLUSÕES.....	81
<b>5.1.1 Quanto aos Ensaios de Laboratório.....</b>	<b>81</b>
<b>5.1.2 Quanto aos Ensaios de Campo.....</b>	<b>84</b>
5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	85

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>86</b>
--	-----------

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Disposição fibra/fissura idealizada. (Taylor, 1994).....	11
Figura 2.2 – Comparação de estaca com elemento de reforço de solo (McGown et al., 1978).....	17
Figura 2.3 – Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra (Gray & Ohashi, 1983).....	18
Figura 3.1 – Localização da jazida de solo residual de arenito Botucatu (Thomé, 1999).....	40
Figura 3.2 – Curva granulométrica do solo residual de arenito Botucatu (Thomé, 1999).....	41
Figura 3.3 – Fibras de polipropileno (a) cortadas em comprimento de 24mm; (b) imagem de microscopia eletrônica de varredura com aumento de 90x.....	42
Figura 3.4 – Localização do campo experimental da UFRGS (Ramires, 1993).....	48
Figura 3.5 – Mistura dos materiais obtida em betoneira.....	50
Figura 3.6 – Compactação das camadas sob a viga de reação.....	51
Figura 3.7 – Detalhe do sistema de aquisição de dados.....	53
Figura 4.1 – Curvas de compactação das misturas (Proctor Normal).....	56
Figura 4.2 – Trajetória de tensões do solo de arenito compactado.....	57
Figura 4.3 – Trajetória de tensões do solo reforçado com fibras.....	57
Figura 4.4 – Curvas tensão-deformação axial e deformação volumétrica-deformação axial para o solo natural compactado.....	58
Figura 4.5 – Curvas tensão-deformação axial e deformação volumétrica-deformação axial para o solo reforçado (0,5% de fibras de 24mm de comprimento).....	59
Figura 4.6 – Comparação entre as curvas tensão-deformação axial e deformação volumétrica-deformação axial para o solo residual compactado e o solo-fibra.....	61
Figura 4.7 – Detalhe - comparação entre as curvas tensão-deformação axial e deformação volumétrica-deformação axial para o solo residual compactado e o solo-fibra.....	62
Figura 4.8 – Envoltória de tensões para o solo residual de arenito compactado e o solo reforçado com fibras a 20% de deformação axial.....	63
Figura 4.9 – Variação do módulo secante a 0,5% de deformação axial com a tensão confinante, do solo residual compactado e do solo reforçado.....	64

Figura 4.10 – Energias de deformação absorvidas para 20% de deformação axial, com variação da tensão confinante, para o solo residual compactado e o solo reforçado.....	65
Figura 4.11 – Comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial para solo-fibra sob diferentes velocidades de carregamento...	67
Figura 4.12 – Tipos de comportamento tensão x deformação: (a) linear elástico; (b) não-linear elástico; (c) não elástico ou plástico; (d) rígido perfeitamente plástico; (e) elástico-plástico: (1) perfeitamente plástico; (2) enrijecimento; (3) amolecimento. (Desai & Christian, 1977).....	68
Figura 4.13 - Comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial para solo-fibra em ciclos de carga-descarga-recarga.....	69
Figura 4.14 – Detalhe comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial para solo-fibra em ciclos de carga-descarga-recarga em 0,75% de deformação axial.....	70
Figura 4.15 - Comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial em diferentes umidades ao longo da curva de compactação definida, para o solo residual de arenito compactado e solo-fibra.....	71
Figura 4.16 - Comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial com variação do teor de fibra.....	72
Figura 4.17 - Comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial com variação do comprimento de fibra.....	74
Figura 4.18 - Comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial com variação do título de fibra.....	75
Figura 4.19 – Resultados dos ensaios de placa de 0,30m de diâmetro assentes sobre camadas de solo residual compactado e do solo-fibra.....	76
Figura 4.20 – Detalhe dos resultados dos ensaios de placa de 0,30m de diâmetro assentes sobre camadas de solo residual compactado e do solo-fibra.....	77
Figura 4.21 - Variação do módulo secante com a carga aplicada nos ensaios de placa para o solo residual compactado e do solo reforçado.....	78
Figura 4.22 - Comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial para amostras de campo e de laboratório do solo compactado e do solo-fibra.....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Variáveis investigadas e fixas em ensaios triaxiais.....	37
Tabela 3.2 – Propriedades físicas do solo residual de arenito Botucatu.....	41
Tabela 4.1 – Valores de atrito interno e coesão efetiva do solo e do solo-fibra com variação da deformação axial.....	65
Tabela 4.2 – Módulos de deformação secante e energia de deformação absorvida para o solo residual compactado e para o solo reforçado com fibras.....	66

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CID	Ensaio triaxial adensado isotropicamente drenado
$C_u$	Coefficiente de uniformidade
CF	Comprimento de fibra
DF	Diâmetro da fibra
$D_{10}$	Diâmetro efetivo
E	Módulo de elasticidade
$E_{def(20\%)}$	Energia de deformação absorvida medida para 20% de deformação
$E_s(0,5\%)$	Módulo de deformação secante medido para 0,5% de deformação
$F_a$	Resistência de atrito mobilizada ao longo da fibra
$F_t$	Resistência à tração da fibra
H	Espessura da camada tratada
H/D	Relação entre espessura da camada tratada e diâmetro da placa
IP	Índice de plasticidade
$L_n$	Leitura em um instante n qualquer
$L_{n-1}$	Leitura imediatamente anterior à leitura $L_n$
$L_1$	Primeira leitura após a aplicação do estágio de carregamento
LC	Limite de contração
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
PET	Polietileno Tereftalato
TC	Tensão confinante
TF	Teor de fibra
VC	Velocidade de carregamento
$c'$	Coesão efetiva do solo
d	Diâmetro da fibra
$d_p$	Diâmetro da placa
$l/d$	Fator de forma da fibra
l	Comprimento da fibra
$p'$	Tensão efetiva normal média (Cambridge)
q	Tensão desvio (Cambridge)
u	Porosidade

$\omega_{ot}$	Umidade ótica Proctor Normal
$\omega_d$	Umidade ótica Proctor Modificado
$\phi'$	Ângulo de atrito interno de pico
$\gamma_s$	Densidade real dos grãos
$\gamma_d$	Densidade máxima
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\sigma_{crit}$	Tensão de confinamento crítica
$\sigma_a$	Tensão total axial
$\sigma_r$	Tensão total radial
$\sigma'_a$	Tensão efetiva axial
$\sigma'_r$	Tensão efetiva radial
$\delta$	Recalque da placa
$\epsilon_a$	Deformação axial

## **RESUMO**

### **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM SOLO REFORÇADO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO VISANDO O USO COMO BASE DE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS**

O presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento mecânico de camadas de um solo residual areno-siltoso reforçado com a adição de fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente na massa de solo, sob carregamento estático, visando o assentamento de fundações superficiais. O estudo se baseou em duas etapas, uma de laboratório e outra de campo. O programa experimental de laboratório consistiu na realização de ensaios triaxiais adensados drenados a fim de se estudar o comportamento do solo residual e de misturas solo-fibra em termos de tensão-deformação-resistência. Foram analisadas tensões confinantes, comprimentos, teores e diâmetros de fibras de polipropileno. Também foi avaliado o comportamento ao longo de ciclos carga-descarga-recarga para o solo reforçado, a influência da velocidade de carregamento, bem como o comportamento do solo residual e do solo-fibra, não somente na umidade ótima e densidade máxima, como também nos ramos seco e úmido da curva de compactação, obtida sob energia Proctor Normal. Na etapa de campo foram construídos aterros experimentais com camadas de solo residual compactado e do mesmo reforçado com fibras, e sobre estes foram executadas provas de carga (placa circular) com o objetivo de avaliar o comportamento carga x recalque de fundações superficiais. Uma comparação entre os resultados de ensaios triaxiais realizados sobre amostras de solo reforçado reconstituídas em laboratório e sobre amostras retiradas em campo é apresentada. A análise global dos resultados permitiu identificar as alterações provocadas pela inclusão aleatória de fibras de polipropileno no solo residual de arenito. Os resultados dos ensaios de placa sobre camadas de solo compactado com e sem reforço fibroso demonstraram um aumento significativo da capacidade de suporte com a inclusão de fibras, além de uma redução considerável dos recalques, quando comparado ao comportamento do solo residual compactado.

## **ABSTRACT**

### **STUDY OF THE BEHAVIOR OF A REINFORCED SOIL WITH POLYPROPYLENE FIBERS SEEKING ITS USE AS A BASE OF SHALLOW FOUNDATIONS**

The objective of this work is study the mechanical behavior of residual silty-sand soil layers reinforced with polypropylene fibers randomly distributed in the soil mass, under static loading seeking its as a base of shallow foundations. The study is based on two stages: laboratory and field. The experimental laboratory program consists of the drained triaxial tests in order to study the compacted soil and soil-fiber mixtures behavior in stress-strain-strength terms. Confining pressure, length, content and diameter of polypropylene fibers were analyzed. The behavior was also evaluated in terms of load-unload-reload cycles and influence of rate of loading, as well as the behavior of the compacted soil and of the soil-fiber along the compaction curve obtained under Standard Proctor energy. In the field stage, experimental embankments were built with layers of compacted residual soil and soil reinforced with fibers. The load tests were carried out (circular plate) with the objective of evaluating the load x settlement behavior of shallow foundations. A comparison amongst the results of the triaxial tests using laboratory and field compacted specimens were presented. The global analysis of the results allowed to identify changes due to random inclusion of polypropylene fibers in to the soil. The results of the plate tests on soil layers compacted with and without fibrous reinforcement demonstrated a significant increase of the support capacity with fiber inclusion, besides a considerable reduction of the settlement, when compared to the behavior of the compacted residual soil.

## CAPÍTULO 1

### 1 INTRODUÇÃO

#### 1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Toda obra de construção civil transfere a carga de sua estrutura para o substrato através de fundações, que podem ser classificadas como superficiais ou profundas. As fundações superficiais transmitem as cargas para o terreno pelas tensões distribuídas sob suas bases. Já as fundações profundas transmitem as cargas pela superfície lateral dos elementos de fundação, além da tensão distribuída sob a base, e suas profundidades de assentamento excedem duas vezes suas menores dimensões de base. Geralmente, as fundações superficiais têm um custo inferior ao das fundações profundas.

É comum na natureza a ocorrência de materiais que não preencham as condições ideais para o assentamento de fundações superficiais, como boa capacidade de suporte e baixa deformabilidade. A solução construtiva geralmente empregada em locais com perfis de solo de baixa capacidade de suporte e alta deformabilidade é a execução de fundações profundas, as quais, ou transferem as cargas predominantemente através de sua área lateral, ou são assentadas em estratos mais resistentes para suportar as cargas de projeto, o que nem sempre é viável técnica e economicamente, pois estas fundações podem vir a ser uma parcela considerável do custo total da obra.

Sendo o solo natural um material complexo e variável, é comum que este não preencha total ou parcialmente as exigências de projeto. Uma alternativa disponível ao engenheiro geotécnico para viabilizar técnica e economicamente a realização de obras de engenharia sobre solos pobres é remover o material existente no local e substituí-lo por outro com características adequadas ou modificar e melhorar as propriedades do solo existente, de modo a criar um novo material que seja capaz de possibilitar o uso de fundações superficiais (Ingles & Metcalf, 1972).

Quando se depara com solos de baixa qualidade, o engenheiro geotécnico pode utilizar a técnica do tratamento de solos, visando melhorar suas propriedades geotécnicas. Segundo Mitchell & Katti (1981) existem várias técnicas para a melhoria das propriedades dos solos, sendo os principais métodos:

- Compactação;
- Consolidação por pré-carregamento e/ou drenos verticais;
- Injeção de materiais estabilizantes;
- Estabilização por processos físico-químicos;
- Reforço de solos com a inclusão de elementos resistentes (geotêxteis, fibras, grelhas, tiras).

Propôs-se no presente trabalho, a análise do comportamento de um material formado por uma matriz de solo residual areno-siltoso compactado e reforçado com fibras, utilizando, portanto, duas das técnicas acima citadas, visando o uso como base de fundações superficiais. Uma das maneiras de avaliar o desempenho de tal técnica é através de ensaios de placa executados sobre camadas compactadas em campo (utilizando a mistura ótima determinada em laboratório).

Para melhorar o desempenho de materiais suscetíveis a problemas derivados do surgimento de tensões e deformações de cisalhamento, tem sido aplicada a técnica de inclusão de fibras, que atuam como elementos de reforço que não impedem a formação de fissuras, mas atuam diretamente no controle da propagação destas, melhorando as propriedades mecânicas do material compósito em questão.

A técnica do reforço de solos com fibras nos moldes que se tem hoje começou a ser investigada há pouco mais de três décadas, enfocando o reforço de solos através de inclusões discretas e orientadas de fibras. Porém, com o passar do tempo, começou-se a investigar o reforço de solos através de inclusões aleatoriamente distribuídas. Esta técnica tem demonstrado eficiência quando empregada tanto em solos cimentados como em solos não cimentados, devido à melhoria nas propriedades mecânicas que é capaz de conferir a estes materiais, principalmente os aumentos da resistência, da ductilidade e da tenacidade, e a diminuição da queda de resistência pós-pico.

A presente pesquisa é fruto da experiência acumulada ao longo dos últimos cinco anos no PPGEC/UFRGS a partir de trabalhos realizados com ênfase no comportamento de

materiais reforçados com fibras (e.g. Ulbrich, 1997; Consoli et al., 1997, 1998-a, 1999; Montardo, 1999; Specht, 2000; Feuerharmel, 2000; Montardo et al., 2000; Consoli et al., 2001), e também da experiência brasileira nessa área (e. g. Silva et al., 1995; Lima et al., 1996; Bueno et al., 1996; Teodoro & Bueno, 1998; Teodoro, 1999).

Vários pesquisadores têm estudado a técnica de reforço com fibras em uma variedade de aplicações, desde estruturas de contenção e barragens até a estabilização de solos sob fundações e pavimentos (e. g. Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986; Freitag, 1986; Maher & Gray, 1990; Fatani et al., 1991; Maher & Ho, 1993). A literatura disponível com relação à inclusão de fibras em solos contribui de forma efetiva para um melhor entendimento da interação solo-fibra, que será avaliada nessa pesquisa.

Para que sejam concebidos novos materiais é relevante que se conheçam as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais de constituição, bem como suas possíveis combinações. O conhecimento do mecanismo de interação solo-fibra é de grande importância no entendimento da resposta da mistura no que tange ao seu comportamento mecânico. Este mecanismo depende de vários fatores relacionados (1) com a matriz (solo, solo-cimento ou solo-cal), como granulometria, índice de vazios e grau de cimentação, e (2) com as fibras, como comprimento, espessura, rugosidade, módulo de elasticidade, capacidade de alongamento, entre outros fatores.

Neste contexto, o presente trabalho busca contribuir para uma melhor compreensão do comportamento de misturas solo-fibra, analisando diversos fatores que podem influenciar no seu comportamento, especialmente quando utilizadas como base para fundações superficiais.

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral estudar o comportamento mecânico de camadas de um solo residual areno-siltoso reforçado com a adição de fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente na massa de solo, sob carregamento estático, visando o assentamento de fundações superficiais. Buscam-se então bases experimentais para um entendimento mais amplo dos mecanismos que regem o comportamento solo-fibra.

A partir do objetivo geral os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Analisar o comportamento das misturas solo-fibra em termos de tensão-deformação-resistência para diferentes tensões confinantes, comprimentos, teores e diâmetros de fibras de polipropileno, como também o comportamento ao longo de ciclos de carregamentos, descarregamentos e recarregamentos para o solo reforçado;
- Estudar o comportamento do solo natural e das misturas solo-fibra não somente na umidade ótima e densidade máxima, como também nos ramos seco e úmido da curva de compactação definida;
- Avaliar a influência da variação da velocidade de carregamento sobre as propriedades mecânicas do solo reforçado;
- Prever o comportamento carga x recalque de fundações superficiais através da realização de provas de carga em placa circular, assentes sobre o solo compactado e sobre mesmo reforçado com fibras.

### 1.3 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A presente pesquisa foi executada em cinco etapas, a seguir descritas: (1) identificação do problema e objetivos da pesquisa; (2) revisão da literatura existente sobre o assunto; (3) planejamento e execução do programa experimental de laboratório e dos ensaios de campo; (4) análise e discussão dos resultados e (5) redação final.

A primeira etapa consistiu na discussão a respeito das vantagens e das dúvidas relacionadas ao comportamento das misturas solo-fibra. A partir daí delineou-se o projeto de pesquisa, cujos objetivos foram apresentados no item 1.2.

A segunda etapa consistiu na revisão da literatura existente, nacional e internacional, a respeito do tema deste trabalho, priorizando trabalhos científicos que pudessem fornecer subsídios para o desenvolvimento de um programa experimental adequado à pesquisa proposta. Tal revisão é apresentada no Capítulo 2.

Na terceira etapa, a partir do planejamento e execução do programa experimental de laboratório e de campo, foram determinadas quais características e parâmetros poderiam influenciar ou não a resistência e a deformabilidade, relevantes à verificação da eficácia ou não da adição de fibras ao solo. No Capítulo 3 é apresentada a descrição do programa experimental de laboratório, com a apresentação dos métodos utilizados, a definição dos

materiais utilizados na pesquisa e os detalhes a cerca da preparação dos corpos de prova. É também descrita a etapa de campo, onde se faz uma apresentação do campo experimental, bem como dos métodos utilizados na execução das camadas compactadas e das técnicas experimentais adotadas para a realização dos ensaios de placa.

Nos Capítulos 4 e 5 são apresentados os resultados obtidos e feitas as análises e discussões referentes aos ensaios de laboratório e aos ensaios de campo, buscando a compreensão do mecanismo de interação entre o solo e a fibra e se essa interação está sujeita à influência das propriedades das fibras, velocidade de carregamento e condições de compactação.

A síntese de todo o conhecimento adquirido é apresentada no Capítulo 6, onde estão dispostas as principais informações coletadas durante as etapas anteriores, apresentando-se as conclusões do trabalho e feitas sugestões para as próximas pesquisas.

## **CAPÍTULO 2**

### **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

No decorrer deste capítulo será apresentada uma revisão da literatura sobre a técnica do reforço de solos com fibras, suas definições e propriedades gerais. Com base na literatura nacional e internacional procurou-se abranger toda a informação disponível até o momento sobre o assunto em questão.

Inicialmente, um breve histórico relatando alguns dos primeiros trabalhos documentados sobre a utilização de fibras em solos. Após, será apresentada uma revisão sobre as definições e propriedades gerais relacionadas com a melhoria e o reforço de solos, assim como dos materiais compósitos fibrosos.

Na seqüência, será apresentada uma revisão a respeito das propriedades químicas, físicas e mecânicas de diversos tipos de fibras que são utilizadas como elementos de reforço de materiais tradicionais empregados na engenharia civil. A natureza das fibras influencia de forma marcante suas propriedades mecânicas e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas do material compósito desenvolvido a partir delas.

Aspectos técnicos sobre os mecanismos de interação entre solo e reforço, e as alterações do comportamento dos solos causadas pela adição de fibras também são apresentados. Finalmente, são abordadas generalidades sobre ensaios de placa.

## 2.2 BREVE HISTÓRICO SOBRE SOLOS REFORÇADOS

O reforço de solos com fibras é uma técnica há muito conhecida e empregada pelo homem. As muralhas da Mesopotâmia (1400 A. C.), existentes ainda hoje, foram construídas empregando-se camadas intercaladas de solo e mantas de raízes. Indícios do emprego desta técnica também são encontrados em partes da Grande Muralha da China e em estradas construídas pelos Incas, no Peru, através do emprego de lã de lhama como reforço. Uma das aplicações que mais se aproxima de um geossintético dos dias atuais foi a utilização de mantas de algodão pelo Departamento de Estradas da Carolina do Sul – EUA, em 1926, como reforço de camadas asfálticas em pavimentos (Palmeira, 1992). Há vestígios também da utilização de palha em tijolos de argila, citados no Êxodo (Illston, 1994).

Vidal (1969) patenteou a técnica denominada “Terra Armada”, onde o reforço de solo era conseguido através da introdução de tiras metálicas conectadas a painéis de concreto que constituíam a face do maciço.

Entretanto, a técnica do reforço de solos com fibras, nos moldes que se tem hoje, passou a ser investigada há pouco mais de três décadas. A técnica inicialmente desenvolvida enfocava o reforço de solos através de inclusões aleatoriamente distribuídas dentro de uma massa de solo, onde se procurava avaliar o efeito de raízes de plantas na resistência ao cisalhamento dos solos e na estabilidade de taludes (Gray & Ohashi, 1983; Schaefer et al., 1997).

A técnica de reforçar solos com fibras encontra-se inserida na tecnologia dos materiais compósitos, a qual vem despertando um interesse cada vez maior no meio científico. Prova disso se encontra em alguns dos livros mais recentes de engenharia dos materiais, onde os materiais compósitos fibrosos são abordados em capítulos específicos (Taylor, 1994; Hannant, 1994; Hollaway, 1994; Illston, 1994; Johnston, 1994 e Budinski, 1996).

## 2.3 MELHORIA, ESTABILIZAÇÃO E REFORÇO DE SOLOS

Entende-se por melhoria ou reforço de solos a utilização de processos físicos e/ou químicos que visem o melhoramento das propriedades mecânicas dos solos. Procura-se, o aumento da resistência do solo tratado e a diminuição de sua compressibilidade e de sua permeabilidade. O termo melhoria de solos está associado ao tratamento através de processos

químicos, enquanto que o termo reforço está associado à utilização de inclusões em aterros ou taludes.

Segundo Van Impe (1989), os processos de estabilização podem ser classificados como temporários, permanentes e permanentes com adição de novos materiais. Consiste em estabilização temporária aqueles limitados a um curto espaço de tempo, geralmente o tempo de execução de uma certa fase da obra. O autor cita o congelamento de solos e o rebaixamento do nível freático por drenos ou eletro-osmose. A estabilização permanente sem adição consiste em processos de compactação e tratamento térmico, como por exemplo, a compactação superficial ou profunda, e a compactação com o uso de explosivos. A estabilização permanente de solos com adição de novos materiais normalmente combina a compactação com adição de um novo material, como estabilização com cal e cimento, injeção de materiais estabilizantes, colunas de brita ou areia, pré-carregamento e uso de drenos verticais, reforços com tiras metálicas ou geossintéticos.

O processo de reforço de solo consiste em se introduzir no maciço elementos que possuam resistência à tração elevada (fitas metálicas, mantas, geotêxteis, geogrelhas, malhas de aço, fibras, etc.).

A utilização de geossintéticos no Brasil data do final dos anos 70 e início dos anos 80, com obras não só envolvendo aplicações em drenagem e filtração, mas também no reforço de solos. Apesar do substancial crescimento do interesse em geossintéticos no país nos últimos anos, este ainda pode ser considerado tímido. Para Palmeira (1995) o desenvolvimento da pesquisa sobre geossintéticos tem contribuído para a utilização destes materiais na geotecnia.

Segundo Palmeira (1995), os tipos de geossintéticos disponíveis são: geotêxteis, geogrelhas, geomalhas, geomembranas, tiras, fibras, e geocompostos. Os geotêxteis são os mais tradicionalmente conhecidos, sendo compostos de fibras têxteis ordenadas ou dispostas aleatoriamente, e utilizados como elementos de reforço, separação, drenagem, filtração, e proteção. As geogrelhas são grelhas plásticas utilizadas como elementos de reforço. As geomalhas são estruturas planas com elevado volume de vazios para utilização como meio drenante. As geomembranas constituem elementos de baixíssima permeabilidade para utilização como barreiras impermeáveis em obras de engenharia civil. Geocomposto foi um termo criado para denominar o material originado da combinação de dois ou mais

geossintéticos. O fibrossolo consiste na mistura de solo e fibras sintéticas para utilização em pavimentos e aterros junto a estruturas de contenção.

## 2.4 MATERIAIS COMPÓSITOS FIBROSOS

Um grande número de novos materiais tem sido desenvolvido atualmente, geralmente baseados em materiais tradicionais, mas incorporando de alguma forma elementos de reforço. Para tanto é necessário que se conheçam as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais de constituição e como eles podem ser combinados. Estes novos materiais são denominados materiais compósitos.

Segundo Budinski (1996), materiais compósitos são misturas de dois ou mais materiais diferentes com características inferiores à do material resultante. São, portanto, constituídos por duas fases: a matriz (concretos, silicões, argamassas, etc.) e o elemento de reforço (fibras, papéis, aço, etc.) e são desenvolvidos para otimizar os pontos fortes de cada uma das fases.

Higgins (1994) classifica os materiais compósitos em dois grandes grupos: os materiais compósitos particulados, quando é adicionado à matriz algum material em forma de partícula, e os materiais compósitos fibrosos, os quais são considerados mais importantes pelo autor e que serão enfatizados nesse trabalho, pois as fibras atuam controlando a abertura e o espaçamento entre as fissuras, distribuindo de forma mais uniforme as tensões dentro da matriz.

Para Taylor (1994), Illston (1994) e Hannant (1994) é consenso que o maior potencial dos materiais compósitos fibrosos está no estado pós-fissuração, onde as fibras contribuem de forma mais efetiva na resistência do material, aumentando assim a sua capacidade de absorção de energia. Isto se deve ao fato de que a deformação necessária para causar fissuras numa matriz cimentada é muito inferior à elongação das fibras, nas quais pouco ou nenhum aumento de tensão de fissuração é esperado. Taylor (1994) acredita que para haver um acréscimo de resistência pré-fissuração do compósito, é necessária a utilização de uma fibra mais rígida que a matriz, bem como a aderência do reforço com a matriz deve ser tal que impeça movimentos relativos entre as partes.

Segundo Johnston (1994), as fibras em uma matriz cimentada podem em geral ter dois efeitos importantes. Primeiro, elas tendem a reforçar o compósito sobre todos os modos de carregamento que induzem tensões de tração, isto é, tração indireta, flexão, e cisalhamento, e, secundariamente, melhoram a ductilidade e a tenacidade de uma matriz com características frágeis.

As fibras não impedem a formação de fissuras no compósito, mas são capazes de aumentar a resistência à tração pelo controle da propagação das fissuras (Taylor, 1994). Hannant (1994) acredita que as fibras mantêm as interfaces das fissuras juntas, beneficiando as propriedades mecânicas no estado pós-fissuração, ou seja, aumentando a ductilidade. As fibras que “atravessam” as fissuras contribuem para os aumentos da resistência, da deformação de ruptura e da tenacidade dos compósitos.

O desempenho dos compósitos reforçados com fibras é controlado principalmente pelo teor e pelo comprimento da fibra, pelas propriedades físicas da fibra e da matriz e pela aderência entre as duas fases (Hannant, 1994). Johnston (1994) acrescenta o efeito da orientação e distribuição da fibra na matriz. A orientação de uma fibra relativa ao plano de ruptura, ou fissura, influencia fortemente a sua habilidade em transmitir cargas. Uma fibra que se posiciona paralela ao plano de ruptura não tem efeito, enquanto que uma perpendicular tem efeito máximo.

Os principais parâmetros relacionados ao desempenho dos materiais compósitos cimentados reforçados com fibras são apresentados por Taylor (1994), assumindo que as variações das propriedades descritas abaixo são atingidas independentemente:

- *Teor de fibra*: um alto teor de fibras confere maior resistência pós-fissuração e menor dimensão das fissuras, desde que as fibras possam absorver as cargas adicionais causadas pela fissura;
- *Módulo de elasticidade da fibra*: um alto valor do módulo de elasticidade causaria um efeito similar ao teor de fibra, mas, na prática, quanto maior o módulo maior a probabilidade de haver o arrancamento das fibras;
- *Aderência entre a fibra e a matriz*: as características de resistência, deformação e padrões de ruptura de uma grande variedade de compósitos cimentados reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz. Uma alta aderência entre a fibra e a matriz reduz o tamanho das fissuras e amplia sua distribuição pelo compósito;

- *Resistência da fibra*: aumentando a resistência das fibras, aumenta, também, a ductilidade do compósito, assumindo que não ocorra o rompimento das ligações de aderência. A resistência necessária dependerá, na prática, das características pós-fissuração necessárias, bem como do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz;
- *Comprimento da fibra*: quanto maior for o comprimento das fibras, menor será a possibilidade delas serem arrancadas. Para uma dada tensão de cisalhamento superficial aplicada à fibra, esta será melhor utilizada se o seu comprimento for suficientemente capaz de permitir que a tensão cisalhante desenvolva uma tensão trativa igual à sua resistência à tração;

Illston (1994) e Taylor (1994) apresentam um equacionamento do equilíbrio de forças idealizado no momento em que a fibra é solicitada no compósito, como demonstra a Figura 2.1. Torna-se evidente a importância não apenas do comprimento da fibra, mas também do diâmetro desta. A relação  $l/d$  (comprimento/diâmetro) ou fator de forma, como é conhecido, é proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra e a resistência da aderência fibra/matriz. Se a fibra tem uma alta resistência à tração, como por exemplo, fibra de aço, então, ou a resistência de aderência necessária deverá ser alta para impedir o arrancamento antes que a resistência à tração seja totalmente mobilizada, ou fibras de alta relação  $l/d$  deverão ser utilizadas.

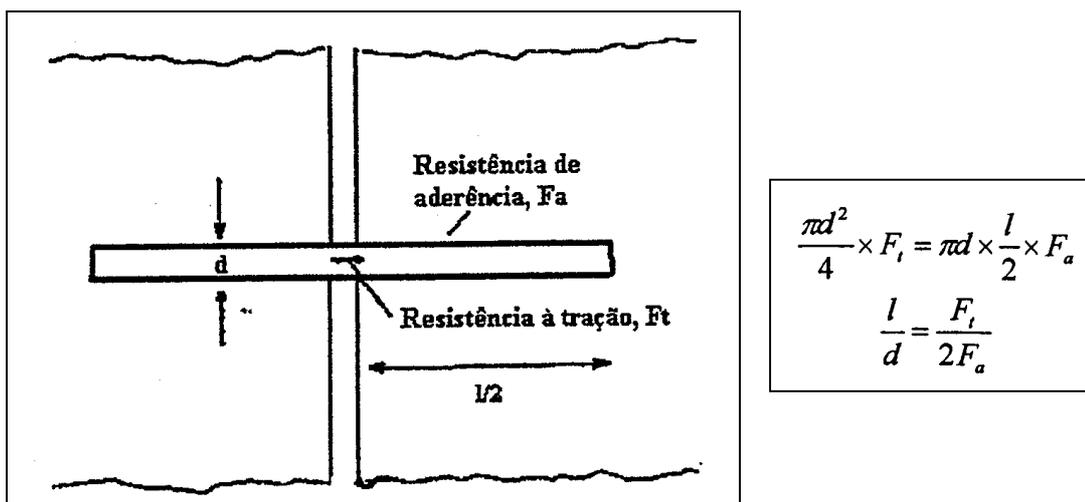


Figura 2.1 – Disposição fibra/fissura idealizada (Taylor, 1994).

## 2.5 TIPOS DE FIBRAS UTILIZADAS EM COMPÓSITOS FIBROSOS

Existe uma ampla variedade de fibras utilizadas em compósitos fibrosos. As características de comportamento de cada uma delas, as propriedades físicas, químicas e mecânicas, que por sua vez irão afetar o comportamento do material compósito, estão intimamente relacionadas ao material do qual são compostas e ao seu processo de fabricação. Portanto, a compreensão do mecanismo de interação matriz-reforço e da parcela de contribuição de cada uma das fases no comportamento do material compósito como um todo é fundamental para a definição do tipo de fibra a ser empregado. Esta definição dependerá fundamentalmente das características da matriz a ser reforçada e das características desejadas do material compósito resultante.

As fibras podem ser classificadas em quatro grandes classes: naturais, poliméricas, minerais e metálicas, abordadas individualmente a seguir.

### 2.5.1 Fibras Naturais

Os primeiros tipos de fibras a serem empregados na história da humanidade foram as fibras naturais.

As fibras vegetais utilizadas em materiais compósitos podem ser de bambu, juta, capim elefante, malva, coco, piaçava, sisal, linho e cana-de-açúcar (Hannant, 1994). Algumas destas fibras podem atingir grandes resistências, como por exemplo, as fibras do bambu que atingem normalmente resistências acima de 100 MPa, com módulo de elasticidade entre 10 e 25 GPa.

### 2.5.2 Fibras Poliméricas

Para ser empregada como reforço de solos, a família das fibras poliméricas talvez seja a mais promissora. Os polímeros, de acordo com sua estrutura química, apresentam diferentes denominações e comportamentos, dando origem a diferentes tipos de fibras.

Atualmente vários formatos de fibras poliméricas têm sido empregados como reforço de solos. Temos as chamadas fibriladas, que são as fibras que apresentam um formato trançado quando esticadas transversalmente, projetadas para que se “abram” durante o processo de mistura com o solo. Vários autores tem estudado tais fibras, a citar Al Wahab &

Al-Qurna (1995), Al Wahab & El-Kedrah (1995), Al Wahab et al. (1996) e Nataraj et al. (1996). Outro formato também utilizado por alguns autores (McGown et al., 1978; Morel & Gourc, 1997) e que se diferencia um pouco do formato de fibra são as malhas, que proporcionam um maior intertravamento com as partículas do solo.

Outro tipo, desenvolvido na França, chamado de Texsol, consiste em um filamento contínuo que é distribuído aleatoriamente dentro da massa de solo.

*a) Fibras de Polipropileno:*

As fibras de polipropileno são constituídas de um tipo de material que adquire uma consistência plástica com o aumento da temperatura, denominado termoplástico. Os polímeros termoplásticos são constituídos por séries de longas cadeias de moléculas polimerizadas, separadas entre si de forma a que possam deslizar umas sobre as outras (Hollaway, 1994).

Essas fibras possuem uma grande flexibilidade e tenacidade em função de sua constituição; seu módulo de elasticidade gira em torno de 8 GPa (menor que qualquer outra fibra) e sua resistência à tração é de aproximadamente 400 MPa. Além disso, possuem elevada resistência ao ataque de várias substâncias químicas e aos álcalis (Taylor, 1994). Tais características conferem aos materiais a que estas fibras são incorporadas uma substancial resistência ao impacto.

*b) Fibras de Polietileno:*

As fibras de polietileno têm um módulo de elasticidade baixo, são fracamente aderidas à matriz cimentada e altamente resistentes aos álcalis. Sua durabilidade é alta, mas apresentam maiores deformações de fluência, o que significa que, se elas forem utilizadas para suportar tensões altas permanentemente em um compósito fissurado, consideráveis alongações e deflexões podem ocorrer ao longo do tempo (Hannant, 1994). Procurando minimizar o problema da baixa aderência e módulo, tem sido desenvolvido o polietileno de alta densidade.

*c) Fibras de Poliéster:*

O poliéster apresenta alta densidade, rigidez e resistência, conferindo tais características às fibras feitas deste material. Essas fibras possuem um aspecto bastante similar às de polipropileno e podem ser utilizadas para as mesmas aplicações (Taylor, 1994).

O poliéster atualmente mais conhecido é o polietileno tereftalato, cuja sigla é PET. É o material constituinte das garrafas plásticas de refrigerantes, águas minerais e óleos de cozinha, entre outros. Sua produção e consumo vem aumentando muito rapidamente nos últimos anos. Somente no ano de 1996 no Brasil foram consumidas 150 mil toneladas de PET, o que representa um grande problema ambiental, pois estima-se que somente 7% deste material é reciclado (revista Amanhã, junho de 1997).

*d) Fibras de Poliamida (Kevlar):*

Polímeros contendo longas cadeias de moléculas geralmente possuem baixa resistência e rigidez, uma vez que suas moléculas são espiraladas e dobradas. Entretanto, se estas moléculas forem espichadas e reforçadas durante o processo de manufatura, altas resistências e módulos de elasticidade podem ser alcançados, como é o caso do Kevlar (Taylor, 1994).

A fibra de poliamida aromática, comercialmente conhecida por Kevlar, é a fibra orgânica de maior sucesso. Existem dois tipos de Kevlar, o Kevlar 29, cuja resistência mecânica é da ordem de 3000 MPa e o módulo de elasticidade médio é de aproximadamente 64 GPa, e o Kevlar 49, cuja resistência é a mesma do anterior, mas seu módulo é de 300 GPa (Hollaway, 1994).

### **2.5.3 Fibras Minerais**

Dentre as fibras minerais podemos citar as de carbono, amianto e vidro.

*a) Fibras de Carbono:*

Baseada na resistência das ligações entre os átomos de carbono e na leveza destas, as fibras de carbono apresentam alta resistência à tração (aproximadamente 2400 GPa) e módulo de elasticidade (em torno de 420 GPa). Características que tornam imprescindível uma grande aderência entre a matriz e as fibras (Taylor, 1994).

*b) Fibras de Vidro:*

As fibras de vidro são geralmente manufaturadas na forma de “cachos”, isto é, fios compostos de centenas de filamentos individuais justapostos. O diâmetro dos filamentos individuais é geralmente da ordem de 10  $\mu\text{m}$  (Taylor, 1994).

Cerca de 99% das fibras de vidro são produzidas a partir do vidro tipo E, que é susceptível ao ataque dos álcalis.

*c) Fibras de Amianto:*

As fibras de amianto apresentam resistência à tração em torno de 1000 MPa e módulo de elasticidade em torno de 160 Gpa, e apresentam uma ótima aderência com uma matriz composta por cimento. Seu diâmetro é muito pequeno, da ordem de 1  $\mu\text{m}$  (Taylor, 1994).

Esta fibra, quando cortada, libera partículas muito pequenas, em função do seu reduzido diâmetro, que danificam os alvéolos pulmonares se aspiradas pelo homem. Em função disso sua utilização na construção civil é proibida em muitos países.

#### **2.5.4 Fibras Metálicas**

As fibras metálicas mais comuns são as de aço. Sua resistência à tração é de aproximadamente 200 GPa. Dependendo do meio onde estão inseridas, apresentam problemas relacionados à corrosão. Uma técnica utilizada para minimizar tal problema é o banho de níquel (Taylor, 1994). Seu formato pode ser bastante variável, de forma a aumentar sua aderência com a matriz (Hannant, 1994).

### **2.6 MECANISMOS DE INTERAÇÃO SOLO-FIBRA**

Como grande parte dos autores concentraram seus esforços em comparar o comportamento de solos reforçados com o de solos não reforçados através dos respectivos parâmetros de resistência ou deformabilidade, têm-se analisado principalmente as conseqüências em detrimento das causas. Pretende-se, então, na presente revisão, focalizar e identificar as causas, ou seja, os mecanismos que regem o comportamento do material compósito, sem desprezar as conseqüências, pois elas nos permitem identificar quando ocorrem mudanças nos mecanismos.

Conhecendo-se as mudanças na estrutura do material reforçado com fibras em relação ao solo sem fibras teremos base para avaliarmos até que ponto o comportamento mecânico dos solos reforçados pode ser explicado pelas mudanças nos parâmetros usuais empregados para solos não reforçados.

Na fase de compactação pode ser detectado o primeiro efeito provocado pela inclusão de fibras ao solo, através do aumento no índice de vazios deste, mantendo-se constante a energia de compactação. Este efeito pode ser mais ou menos pronunciado dependendo do atrito desenvolvido entre solo e reforço. Hoare (1979) demonstrou através de ensaios de compactação que a inclusão de fibras aleatoriamente distribuídas em um solo arenoso, mantendo-se a energia de compactação constante, ocasiona um aumento da sua porosidade, sendo este aumento proporcional à quantidade de fibras. Observou também que este efeito não é alterado pelo método de compactação e se dá com maior ou menor intensidade dependendo do tipo da fibra. Sob essas condições, o autor classifica a interação entre o solo e reforço como um fator muito importante na fase de compactação da mistura. Isto inclui fatores tais como a distribuição granulométrica, o formato das partículas do solo, a textura superficial do reforço e sua superfície específica. Esta última controla a área efetiva do reforço sobre a qual se desenvolvem os esforços de adesão com a matriz.

As fibras somente passam a exercer uma ação efetiva dentro da massa de solo quando esta, submetida a esforços externos, sofre deformações. O funcionamento das fibras como elementos de reforço é então comandado pelas características de deformabilidade do solo e pela forma de distribuição destas deformações, que dependem do tipo de solicitação ao qual o material está sendo submetido (McGown et al., 1978).

Procurando compreender um pouco mais sobre este processo, McGown et al. (1978) estabeleceram uma analogia entre o elemento de reforço de solo e uma estaca cravada. Conforme a Figura 2.2, em sistemas de estacas podemos ter estacas comprimidas ou tracionadas, dependendo das forças externas aplicadas a estas. As estacas, por sua vez, induzem deformações à massa de solo. Já no sistema de solo reforçado ocorre o contrário, carregamentos externos de compressão ou alívio de tensões agem na massa de solo provocando deformações internas que acabam por transferir esforços para os elementos de reforço. Porém, as deformações internas do solo envolvidas nestas condições não são analogamente correspondentes às envolvidas no sistema de estacas. Os mesmos autores observam que, para obtermos o máximo benefício das inclusões, estas devem estar dispostas na direção das deformações principais dentro da massa de solo e que a adesão entre solo e reforço e as características de deformação e resistência são parâmetros muito importantes na definição do comportamento do material compósito. Ao serem submetidas a esforços de tração, as fibras transferem esforços para o solo, provocando uma redistribuição de tensões e, portanto, de deformações no interior do solo.

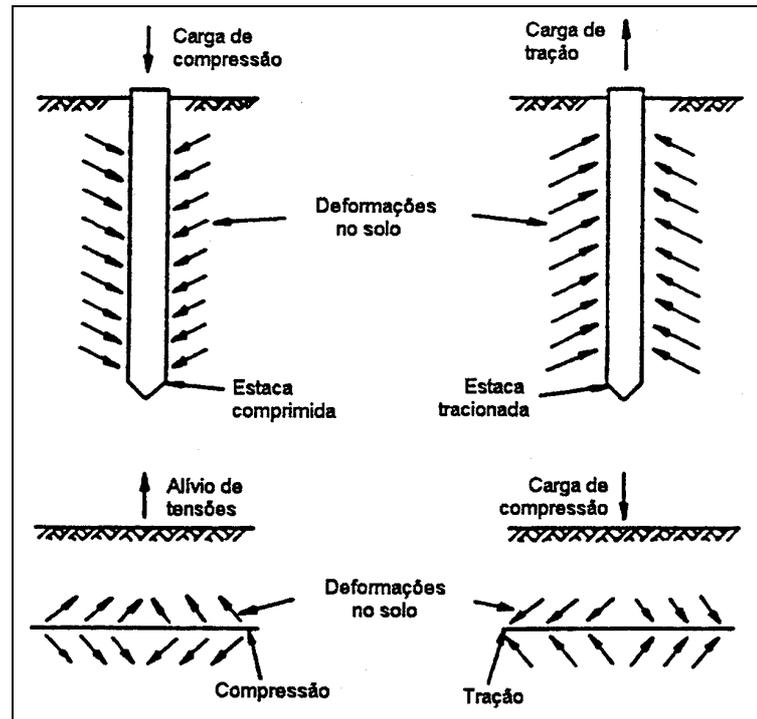


Figura 2.2 – Comparação de estaca com elemento de reforço de solo (McGown et al., 1978).

Para reforços inextensíveis (quando apresentam deformações de ruptura menores que a máxima deformação de tração do solo sem inclusões) tal efeito se dá até a ruptura dos mesmos, momento a partir do qual o comportamento volta gradualmente ao do solo não reforçado. Para reforços extensíveis (quando apresentam deformações de ruptura maiores que a máxima deformação de tração do solo não reforçado), tal efeito se faz presente praticamente ao longo de toda a curva tensão x deformação, para níveis de deformação menores e maiores que a deformação de pico do solo não reforçado (McGown et al., 1978). Com base nas considerações obtidas a partir da analogia com uma estaca cravada e em alguns resultados experimentais, os autores postularam que, para areias reforçadas, assumindo não haver deslizamento entre solo e reforço, os efeitos do reforço constituirão num aumento da capacidade de suporte ou numa redução das deformações do sistema em relação ao solo sem reforço.

Dentro desta lógica, a influência na mudança da orientação do reforço se dá reduzindo o efeito mencionado. Na Figura 2.3 são apresentados resultados de ensaios de cisalhamento direto realizados por Gray & Ohashi (1983). Como se pode observar, a inclinação de  $60^\circ$  em relação ao plano de ruptura representa a maior contribuição em termos de resistência e a inclinação de  $120^\circ$  representa a redução da resistência ao cisalhamento.

A técnica de reforço alvo de grande parte dos trabalhos mais recentes é o emprego de fibras discretas aleatoriamente distribuídas, pois ela possui duas grandes vantagens em relação aos solos reforçados com inclusões orientadas, contínuas ou não: minimiza o surgimento de qualquer tipo de anisotropia e não induz planos preferenciais de fraqueza (Maher & Gray, 1990). As características almeçadas com a inclusão de fibras nem sempre dizem respeito a um aumento da capacidade de suporte do material. Vários outros aspectos, como maior capacidade de absorção de energia (maior resistência ao impacto), queda na redução de resistência pós-pico (para o caso de materiais mais frágeis), maior capacidade de absorver deformações até atingir a resistência última, entre outros, são exemplos disso.

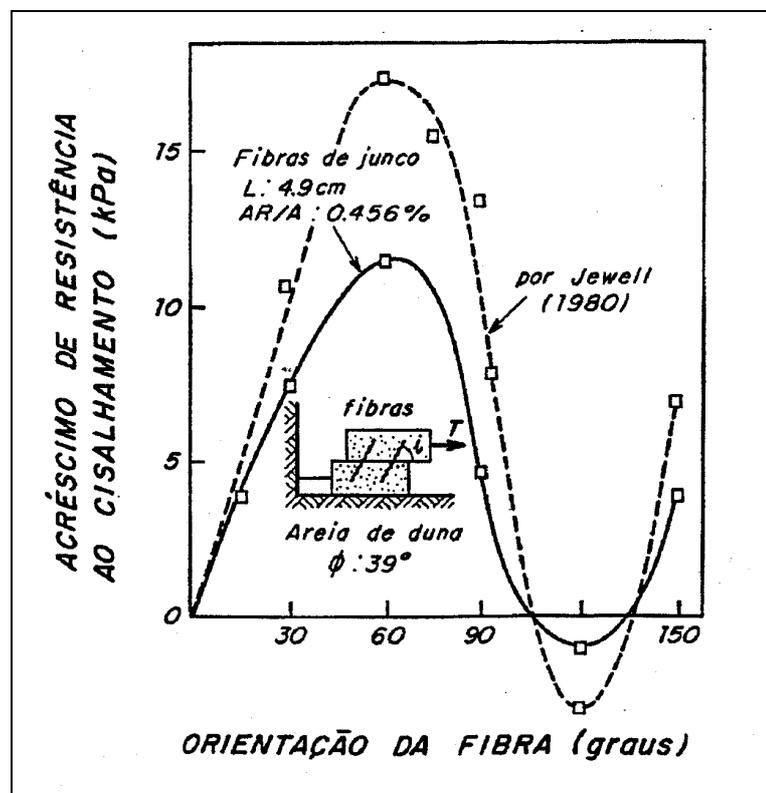


Figura 2.3 – Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra (Gray & Ohashi, 1983).

Para tensões confinantes baixas, a inclusão de fibras afeta a parcela friccional da resistência. Para tensões maiores existe um ponto que define uma clara mudança no mecanismo de interação solo-fibra a partir da qual a parcela friccional atinge o mesmo patamar do solo sem reforço, correspondendo a alteração de comportamento somente à parcela coesiva. A tensão de confinamento correspondente à mudança no mecanismo de interação solo-fibra é então definida como a tensão de confinamento crítica, caracterizando o ponto onde a resistência ao cisalhamento, desenvolvida na interface solo-fibra, se iguala ou supera a resistência à tração da fibra. Abaixo da tensão crítica, a resistência última à tração da

fibra é maior e a forma de ruptura nas zonas de cisalhamento do material compósito se dá por deslizamento entre solo e fibra (Maher & Gray, 1990).

Maher & Gray (1990) concluíram que a tensão de confinamento crítica é sensível a certos parâmetros, tais como o fator de forma das fibras ( $l/d$ ), o formato e distribuição granulométrica das partículas do solo. Porém, não é afetada pela quantidade de fibras e pelo diâmetro efetivo ( $D_{50}$ ) das partículas. Concordando, Gray & Al-Refeai (1986) concluíram que quanto menor a rugosidade superficial das fibras maior é a tensão de confinamento crítica. Da mesma forma, Gray & Ohashi (1990) concluíram que quanto maior a esfericidade das partículas maior é a tensão crítica. Ranjan et al. (1996) observam ainda que a tensão crítica diminui com o aumento do fator de forma.

Feuerharmel (2000) comenta, com base em informações existentes na literatura (Gray & Ohashi, 1983 e Gray & Al-Refeai, 1986), que se elevando a tensão efetiva normal média ( $p'$ ) atuante em um elemento de solo, eleva-se também sua resistência ao cisalhamento, pois se aumenta o atrito entre as partículas, aumentando-se também o atrito entre o solo e o reforço. Esta alteração no atrito entre os dois componentes (solo e fibra) pode provocar mudanças no mecanismo de interação solo-fibra. Isto é evidenciado pelas envoltórias de resistência do solo reforçado disponíveis na literatura, que apresentam a forma curvilínea-linear ou bi-lineares. Acima de uma dada tensão efetiva média normal as envoltórias tornam-se paralelas à envoltória do solo sem fibras. Os autores identificaram também a mudança no mecanismo de interação solo-fibra, responsável pela mudança nos parâmetros de resistência do material, ou seja, deslizamento entre fibra e solo abaixo da tensão crítica e ruptura da fibra para tensões acima da tensão crítica.

Maher & Ho (1993) estudaram o comportamento de uma argila adicionada de diferentes teores de cimento, pretendendo simular um material com distintos valores de coesão. Concluíram que o aumento da coesão reduz a contribuição das fibras para o aumento da resistência de pico do solo.

## 2.7 MUDANÇAS NO COMPORTAMENTO DOS SOLOS DEVIDO À INCLUSÃO DE FIBRAS

São apresentadas a seguir as alterações de comportamento dos solos em função da adição de fibras relatadas na bibliografia. Inicialmente, são enfatizados estudos de alguns

autores apresentando mudanças de comportamento em geral. Na seqüência, as informações se encontram organizadas em tópicos de acordo com cada parâmetro geotécnico de comportamento.

Gray & Ohashi (1983), através de ensaios de cisalhamento direto realizados em uma areia (estados denso e fofo) reforçada com diferentes tipos de fibra (naturais, sintéticas e metálicas), observaram que o reforço de solo com fibra pode aumentar a resistência ao cisalhamento e modificar o comportamento tensão-deformação quando comparado ao solo sem reforço. As principais conclusões foram: (1) fibras com baixo módulo de elasticidade comportam-se como elementos idealmente extensíveis e não rompem durante o ensaio; (2) há uma tensão de confinamento crítica  $\sigma_{crit}$ , abaixo da qual as fibras parecem ser arrancadas, acima da  $\sigma_{crit}$  as fibras são esticadas, mas nenhuma delas rompeu durante o ensaio; (3) as fibras não alteram o ângulo de atrito interno das areias; (4) o aumento do comprimento das fibras aumenta a resistência ao cisalhamento das areias, mas só até certo ponto, a partir do qual não é mais observado este efeito; (5) quanto maior o teor de fibra adicionado, maior é a resistência ao cisalhamento.

Freitag (1986) examinou os efeitos da inclusão de fibras na resistência à compressão não confinada de um solo residual de calcário compactado segundo uma larga faixa de teores de umidade. Foram usadas duas fibras sintéticas diferentes: uma de polipropileno (com 0,2mm de diâmetro) e outra também de polipropileno, chamada de Fibermesh (0,1mm de diâmetro). As fibras mediam 20mm de comprimento e o teor adicionado foi de 1% em volume. Os resultados indicaram que houve aumento da resistência à compressão não confinada, principalmente para teores de umidade próximos à umidade ótima e no ramo úmido da curva de compactação. As curvas tensão-deformação mostraram que o solo reforçado rompeu a uma deformação bem superior à do solo não reforçado, sendo capaz de absorver mais energia de deformação.

Maher & Ho (1994) avaliaram as propriedades mecânicas e hidráulicas de um compósito caulinita/fibra por meio de ensaios de compressão não confinada, compressão diametral, tração na flexão e condutividade hidráulica. Foram utilizados três tipos diferentes de fibra: polipropileno, vidro e celulose. Foi observado que: (1) a inclusão aleatória de fibras aumenta a resistência à compressão de pico e a ductilidade do compósito solo/fibra, sendo este aumento mais pronunciado para baixos teores de umidade. Para comprimentos maiores de fibra, notou-se redução na contribuição para resistência de pico enquanto aumenta a contribuição para a capacidade de absorção de energia e ductilidade. (2) as fibras aumentaram

a resistência à tração, principalmente para baixos teores de umidade. O aumento no porcentual de fibras aumenta a contribuição para resistência à tração, enquanto o aumento no comprimento reduz essa contribuição. Isto se deve ao fato de que, para o mesmo teor de reforço, fibras mais curtas são mais numerosas dentro da matriz, e existe uma maior possibilidade de elas estarem presentes junto à superfície de ruptura. Logo após a ruptura, estas são facilmente arrancadas, o que denota a importância de fibras maiores quando se deseja melhorar a ductilidade e a capacidade de absorção de energia do solo. (3) a presença de fibras aumentou a tenacidade do compósito, a qual é mais pronunciada para altos teores de fibra. (4) a adição de reforços fibrosos aumenta a permeabilidade da argila estudada, sendo o aumento mais pronunciado para os maiores teores de fibra.

Silva et al. (1995) realizaram ensaios de compactação, compressão não-confinada e ensaios de placa para verificar a influência da inclusão de fibras (laminetes plásticos de 3,6 mm de largura; 0,2 mm de espessura com 5, 10 e 20 mm de comprimento) em um solo argiloso e outro arenoso. Os autores verificaram que não há mudanças significativas nos parâmetros de compactação quando as fibras são adicionadas, nem problemas para compactar os solos estudados. A resistência à compressão não confinada do solo argiloso reforçado com inclusões foi sempre superior ao valor correspondente ao solo sem inclusões, independente do teor e do comprimento das inclusões. O solo arenoso é sensível às variações de comprimento e teor, e várias combinações destas duas variáveis podem determinar um comportamento melhor ou pior do solo reforçado em relação ao do solo sem inclusões. Ensaio de placa também acusaram aumento da capacidade de suporte dos solos quando reforçados com os laminetes plásticos.

Ulbrich (1997) e Consoli et al. (1998-a, 1999) avaliaram o efeito da inclusão de fibras de vidro em um solo artificialmente cimentado e não-cimentado através de ensaios de compressão não confinada, compressão diametral e triaxiais drenados. Através desse estudo foi possível concluir que: (1) a resistência à compressão não-confinada aumentou em até 20%, e que o aumento é proporcional ao comprimento da fibra e ao teor de fibra adicionado; (2) os ensaios triaxiais drenados indicaram aumento das resistências de pico e última devido à inclusão de fibras, diminuição da rigidez inicial e alteração do comportamento do solo cimentado reforçado em todos os níveis de cimentação, para um comportamento notadamente mais dúctil; (3) o ângulo de atrito de pico não é significativamente afetado pelo grau de cimentação, mas aumenta com a inclusão de fibras; (4) o intercepto coesivo de pico não é afetado pela inclusão de fibras, sendo uma função somente do grau de cimentação; (5) o

acréscimo da capacidade de absorção de energia relativa, devido à inclusão de fibras, é mais pronunciado para a tensão de confinamento mais baixa, onde as fibras inibem o progresso da ruptura, sustentando a matriz dos compósitos.

Teodoro & Bueno (1998) avaliaram o comportamento de dois solos reforçados com fibras curtas de polipropileno. Foram avaliados diferentes teores e comprimentos de fibras através de ensaios de compressão não-confinada e triaxiais não-drenados. Foram executados painéis de compósitos fibrosos para estudar o padrão de fissuramento deste material quando submetidos à variação térmica. Os autores verificaram que a inclusão de fibras curtas de polipropileno ao solo melhora, no geral, sua resistência ao cisalhamento e reduz a queda de resistência pós-pico. Observou-se que no solo arenoso as envoltórias tendem a bilinearidade na medida em que o teor e o comprimento das fibras aumentam. O efeito da inclusão de fibras nos painéis executados com o solo argiloso foi o de reduzir a dimensão das trincas, sem, no entanto, evitar o fissuramento.

Montardo (1999) observou que a influência da inclusão de fibras depende fundamentalmente das propriedades mecânicas da fibra e da matriz. Fibras relativamente rígidas (fibras de vidro e PET) exercem efeito mais pronunciado na resistência de ruptura, ao passo que fibras relativamente flexíveis (fibras de polipropileno) exercem efeito mais pronunciado no modo de ruptura e no comportamento último. Quanto à resistência ao cisalhamento, a inclusão de fibras PET aumentou a resistência à compressão não-confinada da matriz cimentada, sendo o aumento mais pronunciado para maiores porcentagens de fibras adicionadas. Já para a inclusão de fibras de vidro, o aumento da resistência à compressão não-confinada foi mais pronunciado para fibras longas. A inclusão de qualquer tipo de fibra aumentou a capacidade de absorção de energia de deformação, de forma mais acentuada para comprimentos de fibra maiores.

Murray et al. (2000) executaram ensaios de compactação e de compressão triaxial para avaliar as características de compactação e o potencial de deformação de um solo silto-arenoso reforçado com fibras de carpete recicladas e fibras de polipropileno fibriladas, distribuídas aleatoriamente. Inclusões de fibras discretas aumentaram a resistência de pico significativamente reduzindo a perda de resistência pós-pico, mudando em alguns casos, o comportamento do material, de rígido para dúctil. Os ensaios de compactação indicaram que o peso específico seco máximo diminuiu, aumentando o teor de umidade ótimo, com o aumento do teor de fibra. Os ensaios triaxiais revelaram que ambos os tipos de fibras aumentaram a resistência na ruptura e modificaram a taxa de deformação de um solo silto-arenoso. Não foi

observado um teor de fibra ideal para o material reforçado com fibras de carpete recicladas, porém, para as fibras de polipropileno, esse teor é de aproximadamente 1%, e as perdas de resistência referentes à saturação são reduzidas no solo reforçado.

Specht (2000) avaliou os efeitos da inclusão de fibras poliméricas de diferentes propriedades mecânicas (uma em forma de filamentos e outra fibrilada – tipo *mesh*, formada por pequenos filamentos unidos), sob condições de carregamento estático e dinâmico, sobre as propriedades de resistência e deformabilidade de um solo residual artificialmente cimentado. O autor concluiu que: (1) ambas as fibras aumentaram a ductilidade e tenacidade do compósito; (2) fibras de caráter extensivo (em forma de filamentos), se mostraram mais efetivas na melhoria das características de pós-ruptura do compósito, aumentando de forma expressiva a tenacidade, a ductilidade e a vida de fadiga dos compósitos; (3) as fibras do tipo fibriladas, que apresentam caráter inextensível, foram mais efetivas na redução da deformabilidade e no aumento de resistência de pico; (4) o efeito da inclusão de fibras foi mais evidente para comprimentos maiores. Foram dimensionadas estruturas de pavimento semi-rígido onde se observou uma significativa redução na espessura da camada cimentada quando se utilizaram reforços fibrosos em forma de filamentos.

Feuerharmel (2000) estudou o comportamento de uma argila caulinitica, artificialmente cimentada e não-cimentada, reforçada com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente na massa de solo. Comparando a influência da adição dessas fibras a dois outros solos (um arenoso e outro areno-siltoso), concluiu-se que: (1) a adição de fibras de polipropileno provocou reduções no módulo de deformação inicial do solo, sendo que a intensidade das alterações depende do tipo e das características de cada solo. Para misturas não-cimentadas, os solos menos rígidos foram os mais afetados enquanto que as alterações na areia foram pequenas; (2) quanto à resistência ao cisalhamento, o comportamento resistente dos solos não-cimentados reforçados pode ser dividido em três etapas, uma inicial, onde o comportamento é controlado basicamente pela matriz de solo, uma etapa intermediária, na qual o comportamento do material compósito é comandado juntamente pela matriz e pelos elementos de reforço, e uma etapa final, onde o comportamento do material é comandado exclusivamente pelas fibras; (3) para os solos não-cimentados, cujas deformações se distribuem por toda a amostra, as fibras constituem uma estrutura entrelaçada que impõe uma resistência às deformações radiais na amostra, aumentando assim as deformações de compressão do solo. Este efeito depende da adesão entre o solo e as fibras, sendo que para a

areia, onde esta adesão é inferior aos demais solos, não se observa alterações significativas na variação volumétrica.

Montardo et al. (2000) avaliaram os efeitos da inclusão de fibras distribuídas aleatoriamente e da adição de cimento sobre as propriedades de resistência e deformabilidade de um compósito solo-cimento-fibra. Foram utilizados para este fim uma areia fina uniforme, cimento Portland (CP V – ARI) e fibras de polietileno tereftalato (PET) obtidas a partir do reprocessamento de garrafas plásticas descartáveis. Os autores observaram que a inclusão de fibras teve uma influência significativa nas propriedades mecânicas do solo cimentado, aumentando a resistência à compressão não-confinada e à tração por compressão diametral, sendo este aumento mais pronunciado para maiores porcentagens de fibra. O efeito do comprimento da fibra, porém, mostrou-se nulo. Quanto ao comportamento na compressão triaxial, verificou-se o aumento da tensão desvio de pico, tanto com a porcentagem como com o comprimento das fibras, resultando basicamente de um aumento no ângulo de atrito de pico. Concluíram também que o reforço da areia cimentada com fibras PET resultou na melhoria do comportamento pós-pico, com o aumento da tensão desvio última e, embora tenha reduzido sensivelmente o índice de fragilidade do solo cimentado (de forma mais acentuada para o comprimento de fibra maior), não alterou expressivamente o modo de ruptura do material. A rigidez inicial não foi afetada pela inclusão das fibras, sendo esta uma função basicamente do nível de cimentação.

### **2.7.1 Alterações nas Características de Compactação dos Solos**

Hoare (1979) estudou a influência da adição de fibras de polipropileno na compactação de um cascalho com areia. Observou que as fibras conferem uma certa resistência à compactação, resultando porosidades maiores da mistura, para mesmas energias de compactação, sendo este aumento linear em relação à quantidade de fibra e independente do tipo de compactação empregada. Resultados de ensaios empregando-se dois tipos de reforços diferentes sugeriram ainda que a influência na compactação é comandada pela interação entre solo e reforço, atentando para aspectos como a granulometria do solo, forma das partículas, textura e área superficial do reforço.

Al Wahab & Al-Qurna (1995) avaliaram os efeitos da inclusão de vários teores de fibra (zero; 0,5; 1 e 2% em peso do solo seco) na curva de compactação de uma argila. Os resultados encontrados demonstraram um decréscimo da densidade e um acréscimo na umidade ótima para a adição de 2% de fibra, considerados não muito significativos.

## 2.7.2 Resistência de Pico

### *a) Materiais Argilosos:*

Segundo Maher & Ho (1994) a inclusão de fibras tem uma influência significativa nas propriedades mecânicas de argilas caulínicas. Através de uma série de ensaios de compressão não confinada e diametral, os autores observaram um aumento do pico de resistência à compressão e à tração, assim como o aumento da ductilidade do material. Os mesmos autores constataram que o aumento da quantidade de fibras aumenta a resistência à tração e à compressão, porém, o aumento do comprimento das fibras diminui a contribuição destas para a resistência, tanto à compressão como à tração. A umidade do solo no momento da compactação também afeta essas relações, sendo elas mais expressivas para menores umidades, como foi observado por Andersland & Kattak (1979) e por Nataraj et al. (1996).

Al Wahab & Al-Qurna (1995), estudando uma argila siltosa e buscando maximizar os benefícios em termos de resistência, trabalhabilidade e homogeneidade, estabeleceram uma quantidade ótima de fibra, correspondente ao ponto de maior taxa de acréscimo de resistência não confinada com a adição de fibras. O teor ótimo de fibras reportado pelos autores é de 1%. Para altas quantidades de argila ou solos expansivos, Al Wahab & El-Kedrah (1995), citado pelos autores, observaram um teor ótimo de 0,2% de fibras.

Estudos comparativos entre um material granular e um coesivo realizado por Bueno et al. (1996) mostraram que os solos coesivos são menos sensíveis ao aumento do comprimento das fibras. Análises baseadas em ensaios triaxiais revelaram um acréscimo no ângulo de atrito com a adição do reforço, sendo este maior quanto maior for a quantidade de fibras. Contrariando esta observação, resultados de ensaios triaxiais drenados mostraram que os solos com uma quantidade de argila superior a 15% apresentaram uma queda em seu ângulo de atrito.

Onime et al. (1996) observaram que quanto maior a esbeltez da fibra, isto é, quanto maior o seu fator de forma, maior é o acréscimo de resistência, fato este observado por Consoli et al. (1997) para um solo arenoso.

Com relação à coesão se chegou a um consenso de que esta é acrescida pela inclusão de fibras (e. g. Bueno et al., 1996; Nataraj et al., 1996; Al Wahab et al., 1997; Teodoro, 1999). Tal efeito não foi analisado por Andersland & Kattak (1979), que observaram ainda uma

grande taxa de acréscimo de resistência com a deformação, mesmo para níveis elevados de deformação axial (20%).

*b) Materiais Granulares:*

O aumento do ângulo de atrito e do intercepto coesivo com a inclusão de fibras e com a quantidade delas também foi relatado por vários autores (e. g. Hoare, 1979; Gray & Ohashi, 1983; Bueno et al., 1996; Staufer & Holtz, 1996). Discordando da maioria dos autores, Teodoro (1999) observou somente o aumento da parcela coesiva de uma areia siltosa, sem alterações significativas no ângulo de atrito.

Gray & Al-Refeai (1986) observaram que quanto menor for a rugosidade ou aderência na interface solo-fibra, maior é a tensão de confinamento crítica. Fibras mais rugosas tendem a ser mais efetivas no aumento da resistência.

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

Teodoro (1999) observou um aumento na resistência de uma areia siltosa reforçada com o aumento no comprimento das fibras de polipropileno de 0 para 30mm, comportamento este distinto do solo argiloso, que apresentou um máximo de resistência para fibras de 15mm.

### **2.7.3 Resistência Pós-Pico**

Praticamente todos os trabalhos que analisaram o comportamento do solo reforçado em termos da resistência pós-pico, concluíram que a adição de fibras reduz a queda da resistência (e. g. Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1985; Fatani et al., 1991; Ranjan & Charan, 1996; Staufer & Holtz, 1996; Consoli et al., 1997, 1999).

### **2.7.4 Deformabilidade**

Andersland & Kattak (1979) observaram o aumento da rigidez sob condições não drenadas e queda da mesma para grandes quantidades de fibra (40%).

Foi observado por McGown et al. (1988), através de um ensaio de placa de pequenas dimensões, uma grande parcela de deformação recuperada com o descarregamento, referente a 20% da deformação total imposta.

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

### **2.7.5 Variação Volumétrica**

Bueno et al. (1996) observaram que a inclusão de fibras aumenta a compressibilidade do solo. Stauffer & Holtz (1996) relataram que a adição de fibras aumenta as deformações volumétricas de compressão na ruptura, sendo este aumento mais pronunciado para uma areia mal graduada que para uma bem graduada (ambas com mesmo diâmetro  $D_{50}$  dos grãos).

### **2.7.6 Modo de Ruptura**

O aumento da ductilidade do solo com a adição de fibras é uma observação feita em caráter unânime pelos vários autores que avaliaram este parâmetro (Hoare, 1979; McGown et al., 1988; Maher & Ho, 1993; Nataraj et al., 1996; Consoli et al., 1999), sendo este aumento mais pronunciado quanto maior a quantidade de fibras.

O modo de ruptura de areias reforçadas por malhas de polipropileno foi estudado por Morel & Gourc (1997) em um ensaio biaxial. Os resultados mostraram que a inserção do reforço não modifica a posição da banda de cisalhamento, porém, modifica o comportamento de ruptura. Em função da ductilidade do reforço, mesmo após a formação da banda de cisalhamento, as tensões continuam a crescer, pois parte da carga passa a ser absorvida pelo reforço. O desenvolvimento da banda também é diferente, pois após um nível de deformações limite, elas se tornam menos ativas com o aumento das deformações. Mas por outro lado, na medida em que as deformações progridem, bandas de cisalhamento secundárias se iniciam e vão se tornando mais largas, localizadas próximas da primeira banda.

Montardo (1999) concluiu que a inclusão de fibras de polipropileno no compósito de matriz cimentada altera significativamente o seu modo de ruptura. Com a inclusão das fibras o comportamento do material na ruptura, que era frágil, torna-se dúctil. Estas constatações

resultaram da análise dos índices de fragilidade e da verificação visual da ausência ou presença de planos de ruptura nos corpos de prova rompidos. Concluiu ainda que a inclusão de fibras PET reduziu sensivelmente o índice de fragilidade da matriz cimentada, mas não foi suficiente para expressar uma modificação no modo de ruptura da matriz cimentada, e que a inclusão de fibras de vidro não modificou o modo de ruptura do material.

Specht (2000) avaliou os efeitos da inclusão de fibras poliméricas de diferentes propriedades mecânicas (uma em forma de filamentos e outra fibrilada – tipo *mesh*) num solo artificialmente cimentado e observou que com a inclusão de fibras mais alongáveis (em forma de filamento) o comportamento do material, que era frágil, torna-se dúctil. Sendo que para as fibras mais rígidas (tipo *mesh*) não se expressa uma modificação no modo de ruptura do material.

Segundo Feuerharmel (2000), a forma de ruptura do solo é grandemente alterada pela inclusão de fibras de polipropileno, reduzindo a fragilidade dos solos. A amplitude dessas alterações depende fundamentalmente de uma boa adesão solo-fibra, que pode ser atingida pela ação de um agente cimentante, formando uma estrutura cimentada bastante resistente ou por uma combinação apropriada dos fatores comprimento das fibras e tensões efetivas médias normais atuantes.

### **2.7.7 Condutividade Hidráulica e Outras Propriedades**

O aumento da condutividade hidráulica devido à adição de fibras em solos argilosos é relatado por vários autores. Maher & Ho (1994) observam um aumento na permeabilidade, sendo maior esse aumento quanto maior a quantidade de fibras, acréscimo da ordem de 10x para 4% de fibra (polipropileno e vidro). Já Al Wahab & El-Kedrah (1995) observam um aumento da permeabilidade em mais de uma ordem de grandeza para 2% de fibra (polipropileno).

Al Wahab & El-Kedrah (1995) observaram também a redução do potencial de retração e inchamento em torno de 30 a 35% com a adição de fibras, sendo este efeito mais pronunciado no ramo seco da curva de compactação e menos pronunciado no ramo úmido.

Bueno et al. (1996) relataram uma redução da permeabilidade de uma ordem de grandeza, causada pela adição de fibras a solos granulares.

Feuerharmel (2000) observa que são obtidos valores de condutividade hidráulica bem mais elevados no momento em que são adicionados fibras e cimento ao material argiloso, pois com a floculação das partículas de argila, estas, que antes aderiam às fibras, passam a se aglomerar ao redor de partículas de cimento, propiciando a segregação das fibras.

## 2.8 PROVA DE CARGA EM PLACA

A prática de investigações “in situ” é indiscutivelmente um dos mais importantes aspectos de um trabalho de engenharia geotécnica. O objetivo principal dos ensaios de campo é a obtenção de dados geotécnicos relevantes de um local em questão, a fim de que um projeto de engenharia possa ser satisfatoriamente realizado.

Segundo Terzaghi (1967), os resultados das provas de carga somente representam as características do solo até aproximadamente dois diâmetros abaixo da placa. Portanto, os resultados não podem ser extrapolados a sapatas de maiores diâmetros quando a mesma solicita camadas de distintas características às do ensaio. Para evitar este problema, é necessário conhecer a estatigrafia do local em estudo.

Marsland & Eason (1973) pesquisaram a argila de Londres através de provas de carga “in situ” e chegaram à conclusão que, para uma razão de 1,5 a 2,0 entre o diâmetro da cava e o da placa, a capacidade de carga era igual à obtida na superfície.

A crescente utilização dos ensaios de campo, segundo Mitchell & Katti (1981), é devido principalmente à habilidade para determinar as propriedades de solos que não podem ser facilmente amostrados no estado natural, à eliminação das dificuldades dos ensaios de laboratório (tais como amolgamento da amostra e simulação das condições “in situ”) e ao volume de solo envolvido no ensaio ser muito maior que o correspondente a um ensaio de laboratório.

De acordo com Pells (1983), os ensaios de placa podem ser classificados de acordo com o material a ser ensaiado, areias, argilas e rochas, e de acordo com a forma de execução do ensaio, ensaio de placa na superfície; placa carregada na superfície por um tensor ancorado centralmente à placa, fora ou na zona de influência; placa sobre a base de um furo no terreno, carregado horizontalmente, sobre bloco de concreto embutido ou múltiplas placas.

O mesmo autor salienta que a placa pode ser flexível ou rígida. Quanto aos deslocamentos, podem ser medidos sobre a placa, no centro de uma placa flexível, em pontos sobre a superfície do terreno fora da área carregada, ou no interior da área carregada através de extensômetros.

Segundo Robertson (1986), os ensaios “in situ” também possuem suas limitações, como por exemplo, a trajetória de tensões pode não ser controlada durante a execução do ensaio sendo diferente daquela do problema real; as condições de drenagem não podem ser controladas independentemente e não são consideradas possíveis futuras modificações nas condições do solo.

Provas de carga em placa foram uma das primeiras aplicações dos ensaios “in situ” para a determinação das propriedades de deformação e de ruptura do solo. Este tipo de ensaio tem sido utilizado em geotecnia não só especificamente em projeto de fundações, mas também no estudo do comportamento de pavimentos.

As provas de carga em placa possuem a principal vantagem de serem mais econômicas em relação às provas de carga em verdadeira grandeza. Outros fatores que podem levar a utilização desse tipo de ensaio, são:

- O ensaio tem se mostrado adequado para o estudo do comportamento de fundações superficiais, devido ao fato de que, em ambos os casos, o solo é submetido ao mesmo tipo de carregamento;
- O ensaio permite a observação da forma de ruptura que experimenta o solo quando carregado pela fundação (interação solo-estrutura);
- A existência de um grande número de soluções matemáticas fechadas e procedimentos empíricos e semi-empíricos, que podem ser utilizados para interpretar os resultados experimentais;
- As condições geométricas do problema são perfeitamente conhecidas, facilitando a aplicação de soluções analíticas, especialmente o Método dos Elementos Finitos.

Cudmani (1994) realizou ensaios de placa em solo natural no mesmo local de estudo onde se realizou esta pesquisa. Os ensaios foram realizados a diferentes profundidades e com vários tamanhos de placa. A partir dos resultados, o autor observou que: (1) a dispersão dos resultados foi inversamente proporcional ao diâmetro da placa. O autor atribui esta dispersão

ao amolgamento produzido durante a preparação do ensaio e à heterogeneidade do solo; (2) o efeito da profundidade foi comprovado, ou seja, uma mesma placa sob dada pressão apresentou recalques menores a maiores profundidades; (3) as curvas carga x recalque não apresentaram uma carga de ruptura definida, isto é, uma magnitude de carga constante a contínuas deformações. Este comportamento é característico de rupturas por puncionamento; (4) as deformações elásticas são de pequena magnitude quando comparadas com as deformações plásticas; (5) a tensão de fluência determinada através dos ensaios de placa coincide com a tensão de pré-adensamento avaliada no ensaio de compressão confinada; (6) a relação carga-recalque é praticamente linear até a tensão de fluência; (7) a previsão da capacidade de suporte pela teoria proposta por Terzaghi (1943) considerando a redução dos parâmetros resistentes, conduz a boas previsões dos valores experimentais; (8) a previsão de recalques do solo estudado através de procedimentos empíricos embasados em resultados de provas de carga se mostrou adequada.

Hilmer (1983) removeram 600.000m<sup>3</sup> de solo siltoso mole para substituição por pedregulho compactado a fim de ser construído no local uma fábrica de manufaturados. Além dos ensaios dinâmicos, em vista das altas cargas produzidas pelas máquinas, foram realizadas 270 provas de carga em placa com diâmetros de 0,30; 0,40; 0,50 e 0,76m. Os resultados mostraram que o módulo de deformação tem uma relação com o diâmetro da placa, isto é, o aumento do diâmetro da placa causou um decréscimo do módulo.

Mellios (1985) apresenta os resultados de ensaios de placa executados em um solo poroso. Os ensaios foram realizados com placas circulares de 0,80m de diâmetro a profundidades que variam de 0,60 a 1,20m. O autor conclui que, considerando o estado de baixa compactidade destes solos, o processo de carregamento representa mais um processo de adensamento do solo do que propriamente a clássica ruptura por cisalhamento de superfícies geometricamente definidas. O comportamento das curvas é bastante similar ao do ensaio de adensamento, o que sugere um tratamento análogo. Assim, considerou-se como tensão de ruptura o que corresponderia a pressão de pré-adensamento.

Rilling & Smolczyk (1994) realizaram ensaios de placa sobre um aterro compactado. O material usado para a construção do aterro consistia de um solo siltoso arenoso fino com uma rígida consistência no estado natural. O material foi compactado em camadas de 25cm com um compactador pé de carneiro vibratório. A densidade foi determinada e considerada condizente com a densidade obtida em ensaios de laboratório. Placas quadradas de 25 x 25cm foram utilizadas. O comportamento carga x recalque do solo

natural foi comparado com o do aterro compactado. O solo natural se mostrou mais rígido e mais resistente do que o solo compactado.

Vendruscolo (1996) realizou ensaios de placa de 0,30m de diâmetro sobre camadas de solo residual compactado e de solo tratado com cimento (teor de 5% de cimento), ambas com 0,60m de espessura. Os resultados dos ensaios de placa sobre camadas de solo melhorado demonstraram que houve um aumento significativo da capacidade de suporte, além de uma redução considerável dos recalques, quando comparadas ao comportamento carga x recalque do solo natural (Cudmani, 1994). A análise do comportamento de fundações superficiais assentes em solos estratificados, através de simulações numéricas, demonstrou ser eficiente na previsão do comportamento carga x recalque das mesmas.

Tessari (1998) executou provas de carga sobre cinza pesada de carvão misturada com 5% de cimento, compactada em camadas delgadas na superfície do solo de baixa capacidade de suporte. As provas de carga foram executadas com placas de 0,30; 0,60 e 0,90m de diâmetro sobre camadas de cinza pesada-cimento com 0,15 e 0,30m de espessura, sendo comparados com resultados de provas de carga sem camada de cinza pesada-cimento. Observou-se que as fundações assentes sobre a camada compactada de cinza pesada-cimento apresentaram menor recalque e maior capacidade de suporte que as fundações de mesmo diâmetro assentes sobre o solo natural. Além disto, quanto maior a relação entre a espessura da camada tratada e o diâmetro da placa ( $H/D$ ), maiores eram estas diferenças de recalque e capacidade de suporte, fato também comprovado por Vendruscolo (1996) e Sales (1998). A ruptura se deu sob a forma de puncionamento, comprovado pelas trincas em torno da placa e pela medição dos recalques ao lado da mesma.

Consoli et al. (1998-b) discutiram aspectos relacionados à interpretação de provas de carga de fundações superficiais assentes em camadas de solo tratadas com cimento. Foi analisada a influência da espessura de camadas de solo-cimento e também o efeito do tamanho do elemento de fundação no comportamento carga-recalque. A base de dados foi obtida através de resultados de ensaios em placas circulares de 0,30 e 0,60m de diâmetro assentes sobre camadas de solo-cimento de diferentes espessuras, fixadas de forma a obter-se quatro valores distintos da relação espessura da camada tratada/diâmetro da placa ( $H/D$ ) correspondentes a 0, 0,5; 1,0 e 2,0. Foi verificado um mecanismo de ruptura por puncionamento em todos os ensaios realizados, independente do tamanho da placa e da espessura de camada tratada.. Os autores concluíram que o efeito do diâmetro da área carregada ( $D$ ) e da espessura da camada superficial ( $H$ ), no espaço que relaciona tensão

normalizada x recalque relativo (razão entre o recalque e o diâmetro da placa), é desprezível para as várias relações H/D analisadas. Foi proposto então, um método numérico de interpretação baseado no processo de ajuste da curva experimental obtida em ensaios de placa, obtendo-se valores otimizados representativos do módulo de elasticidade e dos parâmetros de resistência da camada de solo-cimento, sendo possível estimar o comportamento de elementos de fundação de diferentes diâmetros assentes sobre camadas tratadas de diversas espessuras.

Thomé (1999) estudou o comportamento de fundações superficiais apoiadas em sistema de dupla camada, quando a superior é cimentada. Foram construídos aterros experimentais utilizando misturas de resíduos industriais como cinza pesada e cal de carbureto na estabilização de um solo residual de arenito Botucatu, e sobre esses aterros foram executadas provas de carga em placa. O autor concluiu que o comportamento de fundações superficiais sobre solos cimentados é controlado pela relação espessura da camada cimentada e diâmetro da fundação. O ângulo de atrito e o módulo de elasticidade da camada cimentada não influenciaram os resultados de prova de carga. A ruptura da fundação é função de dois mecanismos progressivos, os quais são função das tensões de tração geradas na parte inferior da camada cimentada e das tensões cisalhantes existentes logo abaixo das bordas de fundação.

Consoli et al. (2001) estudaram a influência de camadas compactadas de areia estabilizada com cimento e também da mistura areia-cimento reforçada com fibras de polipropileno, no comportamento carga-recalque de fundações superficiais. Ensaio de placas circulares de 0,30m de diâmetro foram executados sobre camadas compactadas de 0,30m de espessura. Observou-se um aumento da capacidade de suporte, resistência e rigidez da camada de areia-cimento. Verificou-se também um comportamento frágil com relação ao modo de ruptura, e após atingida a resistência de pico, a capacidade de carga caiu para aproximadamente o mesmo valor da capacidade de carga obtida no ensaio de placa para o solo residual. A inclusão de fibras na mistura de areia-cimento manteve a capacidade de carga máxima obtida anteriormente praticamente inalterada, porém, notou-se um comportamento pós-pico notadamente mais dúctil. O mecanismo de ruptura observado no campo para o ensaio de placa relativo à camada de areia-cimento mostrou trincas de tração verticais que se propagaram da base para o topo da camada, especialmente na borda da placa. Já o reforço com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente na mistura de areia-cimento mudou completamente o comportamento do mecanismo de ruptura, ou seja, a ruptura ocorreu pela formação de faixas espessas de cisalhamento ao redor da borda da placa (*shear bands*),

permitindo que as tensões se espalhassem por uma área maior na interface da camada subjacente.

## **CAPÍTULO 3**

### **3 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

#### **3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

O programa experimental estabelecido tem como objetivo investigar e identificar o efeito da adição de fibras de polipropileno nas propriedades mecânicas de um solo residual de arenito. Investigou-se a mudança dos parâmetros de deformabilidade e resistência ao cisalhamento, entre outros, diante da variação de fatores como tensão confinante, comprimento, teor e diâmetro das fibras de um solo areno-siltoso reforçado, como também a influência da velocidade de carregamento, o comportamento observado em ciclos de carga e descarga e o comportamento para diferentes umidades e densidades ao longo da curva de compactação definida.

#### **3.2 PROJETO DE EXPERIMENTOS**

Um projeto de experimentos precisa contemplar três etapas. A primeira etapa consiste da definição dos objetivos do trabalho e da identificação do objeto de estudo, que consiste em reunir e organizar todo o conhecimento já disponível sobre o mesmo. A seguir, é estabelecido o grau de confiança que se tem em cada informação e separa-se o conteúdo consolidado das informações questionáveis. Quanto mais se sabe a respeito de um determinado assunto, menor será o programa experimental necessário para levantar as informações ainda não disponíveis. Procura-se, então, definir todos os elementos em estudo que estão presentes no experimento. Estes são as características de qualidade e as variáveis de resposta.

As características de qualidade são aquelas características do produto ou processo que refletem a qualidade do mesmo. As variáveis de resposta são grandezas mensuráveis que possuem uma forte correlação com as características de qualidade, de tal forma que, medindo-se aquelas, sabe-se como está o desempenho destas. Muitas vezes são necessárias várias variáveis de resposta para representarem uma só característica de qualidade (variável controlável).

A segunda etapa de um projeto experimental é o desenvolvimento do projeto propriamente dito. Procuram-se informações que permitam estabelecer relações de causa-efeito entre, respectivamente, as variáveis controláveis de interesse e as variáveis de resposta. Ou seja, dentre o conjunto das variáveis controláveis, apenas algumas têm seus efeitos pesquisados sobre as variáveis de resposta. Para pesquisar o efeito de uma variável controlável sobre uma variável de resposta são realizados ensaios. Em cada ensaio, faz-se a variável controlável ter um determinado valor e mede-se a variável de resposta.

Na terceira etapa realiza-se a análise dos dados obtidos. Através de diversas técnicas tornam-se conhecidas as relações causais entre as variáveis controláveis pesquisadas e as variáveis de resposta.

### **3.2.1 Variáveis Investigadas**

Diversos autores destacam que o comportamento tensão-deformação de compósitos reforçados com fibras é influenciado tanto por fatores relacionados à matriz (granulometria, índice de vazios, umidade, etc.) quanto ao reforço (módulo, comprimento, espessura, rugosidade, orientação, teor e formato). Embora todos os fatores sejam importantes, o presente trabalho se restringe ao estudo da influência do comprimento de fibra, do teor de fibra, do diâmetro de fibra, da umidade de moldagem e peso específico aparente seco correspondente, das tensões de confinamento impostas e da variação da velocidade de carregamento em ensaios triaxiais. A escolha destas variáveis, bem como da sua faixa de variação, decorreu da necessidade de delimitação do trabalho, e foi baseado em estudos já realizados e mencionados no capítulo anterior.

Uma vez identificadas as variáveis mais importantes, avalia-se a influência destas variando-as de forma controlada enquanto mantêm-se as demais variáveis fixas.

Inicialmente, foram realizados ensaios de compactação, que auxiliaram na escolha das misturas a serem testadas nos ensaios triaxiais. A etapa principal deste trabalho se baseia,

então, na realização de ensaios de compressão triaxial adensados drenados (CID), levados a grandes deformações. As faixas de variação possíveis para as variáveis investigadas referentes aos ensaios triaxiais são apresentadas na Tabela 3.1. Os valores correspondentes às variáveis fixas (marcadas com um X no quadro abaixo) são: tensão confinante ( $TC$ ) de 60 kPa, comprimento de fibra ( $CF$ ) de 24mm, teor de fibra ( $TF$ ) de 0,5% em relação ao peso do solo seco, velocidade de carregamento ( $VC$ ) usual de 0,0173mm/min, umidade ótima ( $\omega_{ot}$ ) de 16,2% com respectiva densidade máxima de 17,4 kN/m<sup>3</sup>, e título da fibra ( $DF$ ) de 3,3 dtex (correspondente a um diâmetro médio de fibra de 0,023mm), esclarecendo que o título é a grandeza que representa a espessura dos filamentos das fibras na indústria têxtil, cuja unidade é o dtex (onde 1 dtex = 1g/10000m).

Tabela 3.1: Variáveis investigadas e fixas em ensaios triaxiais.

Variáveis investigadas	Faixa de variação	Variáveis fixas					
		$VC$	$\omega_{ot}$	$TF$	$CF$	$DF$	$TC$
$VC$	0,00432; 0,00865 e 0,0173 mm/min		X	X	X	X	X
$\omega_{ot}$ (solo e solo-fibra)	13; 16,2 e 18,8%	X		X	X	X	X
$TF$	0; 0,25; 0,5 e 0,75%	X	X		X	X	X
$CF$ e $TC$	6, 12 e 24mm 60 e 200 kPa	X	X	X		X	
$DF$ e $TC$	0,023mm (3,3 dtex) e 0,11mm (88 dtex) 60 e 200 kPa	X	X	X	X		
$TC$ (solo e solo-fibra)	20, 60, 100, 200, 300 e 400 kPa	X	X	X	X	X	

### 3.2.2 Variáveis de Resposta

Variáveis de resposta são grandezas mensuráveis utilizadas para representar as características de comportamento do objeto de estudo. As variáveis de resposta empregadas na análise do comportamento das misturas de solo-fibra são as seguintes:

- intercepto coesivo de pico ( $c'$ );
- ângulo de atrito interno de pico ( $\phi'$ );
- módulo de deformação secante ( $E_s$ );

- capacidade de absorção de energia de deformação ( $E_{def}$ );

A seguir são apresentadas algumas definições básicas a respeito das grandezas empregadas na análise. As variáveis  $p'$  e  $q$  são a tensão efetiva média normal e a tensão desvio, respectivamente, definidas em termos das tensões principais e aplicadas a uma situação axissimétrica de carregamento (Wood, 1984), calculadas pelas expressões:

$$p' = \frac{\sigma'_a + 2 \cdot \sigma'_r}{3} = \frac{\sigma_a + 2 \cdot \sigma_r}{3} - u \quad (3.1)$$

e

$$q = \sigma'_a - \sigma'_r = \sigma_a - \sigma_r \quad (3.2)$$

Onde:

$\sigma'_a$  e  $\sigma'_r$  são as tensões efetivas axial e radial respectivamente;

$\sigma_a$  e  $\sigma_r$  são as tensões totais axial e radial respectivamente;

$u$  é a poro pressão.

O módulo de deformação secante ( $E_s$ ) é definido pelo quociente entre a variação da tensão desvio e a variação da deformação axial correspondente, num determinado segmento da curva tensão-deformação. Já a capacidade de absorção de energia de deformação ( $E_{def}$ ) é definida pelo produto entre a tensão desvio e a variação da deformação axial correspondente.

A determinação do módulo de elasticidade ( $E$ ) do solo e do solo reforçado, através dos ensaios de placa realizados em campo, varia significativamente com o nível de tensões considerado (Poulos & Davis, 1973). Para placas circulares rígidas tem-se que:

$$E = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{P \cdot d_p}{\delta} \cdot (1 - \nu^2) \quad (3.3)$$

e

$$\nu = \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_v}{2\varepsilon_a} \quad (3.4)$$

Onde:

$P$  é a tensão aplicada à placa;

$d_p$  é o diâmetro da placa;

$\delta$  é o recalque;

$\nu$  é o coeficiente de Poisson;

$\varepsilon_a$  e  $\varepsilon_v$  são as deformações axiais e volumétricas.

### 3.3 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

Os materiais compósitos fibrosos são compostos de duas fases: a matriz e o elemento de reforço. Por isso, julga-se apropriado apresentar as propriedades mecânicas de cada um destes, ou seja, as características de resistência e deformabilidade da matriz e das fibras utilizadas nesse trabalho.

#### 3.3.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa é uma areia fina siltosa, mal graduada, fracamente plástica. Trata-se de um solo residual (horizonte C), substrato de arenito, pertencente à denominada Formação Botucatu. A jazida de onde foram coletadas as amostras apresenta um talude, de aproximadamente 20m de altura, situado às margens da rodovia estadual RS-240, na localidade de Vila Scharlau, município de São Leopoldo / RS, conforme ilustra a Figura 3.1 a seguir.

O solo foi escolhido principalmente devido à existência de trabalhos prévios de caracterização (Núñez, 1991; Prietto, 1996; Ulbrich, 1997; Thomé, 1999). Núñez (1991) constatou a homogeneidade da jazida ao realizar ensaios ao longo de sua profundidade. Thomé (1999) realizou ensaios adicionais de caracterização do solo, verificando que as amostras utilizadas em seu experimento eram consistentes com o conjunto de resultados obtidos pelo primeiro autor. As propriedades físicas médias do solo, determinadas por Nuñez (1991) e Thomé (1999) são apresentadas na Tabela 3.2. A Figura 3.2 apresenta a curva granulométrica obtida para o solo residual com o uso de defloculante. O material em questão

é composto por 14% de argila ( $< 0,005$  mm), 29,9% de silte (0,005 - 0,074 mm) e 56,1% de areia, sendo que desta porcentagem, 47,3% é de areia fina (0,074 - 0,42 mm) e somente 8,8% de areia média (0,042 - 2,0 mm). Segundo a classificação HRB, o solo é A-4 e na classificação unificada, é SM (areia siltosa).

Nuñez (1991) determinou as principais propriedades físico-químicas do solo residual, com ênfase para a mineralogia e a composição química da fração argila e todas as análises realizadas indicaram a predominância do argilo mineral caulinita. Observa-se, também, a presença de 3,2% de hematita, que é o óxido responsável pela cor rosada característica do solo residual de arenito Botucatu.

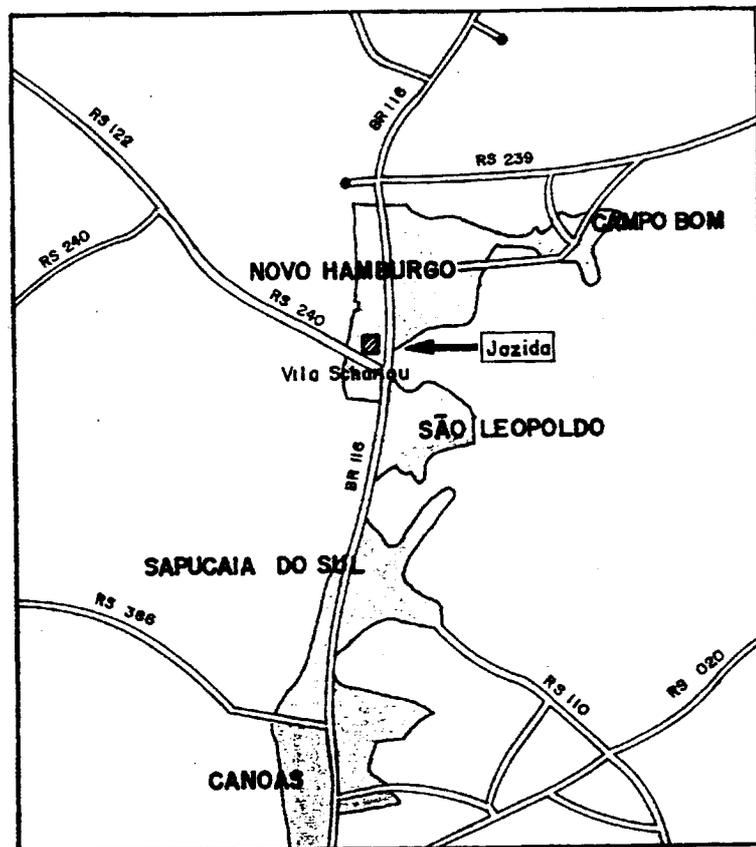


Figura 3.1 – Localização da jazida de solo residual de arenito Botucatu (Thomé, 1999).

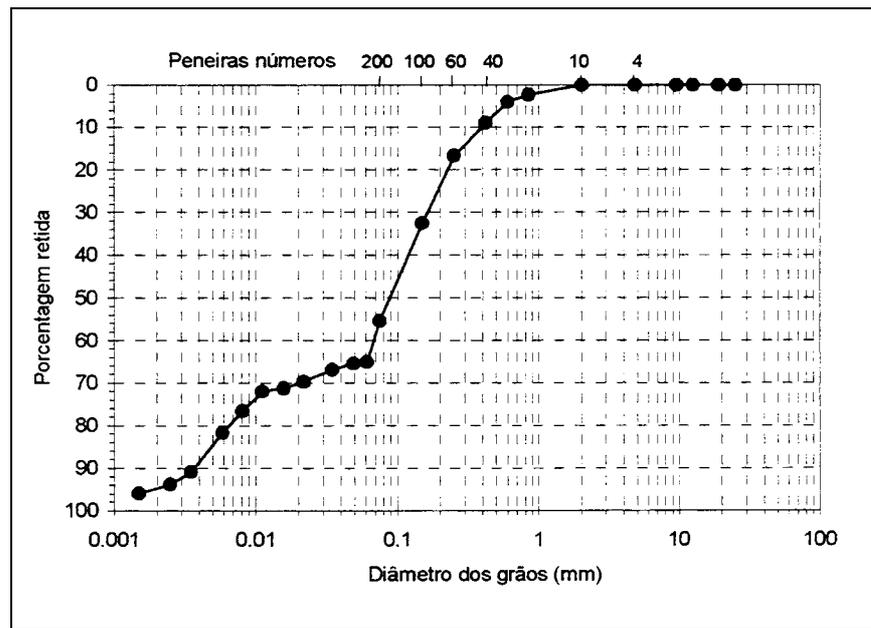


Figura 3.2 – Curva granulométrica do solo residual de arenito Botucatu (Thomé, 1999).

Tabela 3.2 – Propriedades físicas do solo residual de arenito Botucatu

Propriedades	Valores médios (Núñez, 1991)	Valores médios (Thomé, 1999)
Limite de Liquidez (LL)	21%	22%
Limite de Plasticidade (LP)	17%	19%
Índice de Plasticidade (IP)	4%	3%
Limite de Contração (LC)	19%	-
Densidade Real dos Grãos ( $\gamma_s$ )	26,7 kN/m <sup>3</sup>	26,7 kN/m <sup>3</sup>
Diâmetro Efetivo ( $D_{10}$ )	0,003 mm	0,004 mm
Coefficiente de Uniformidade ( $C_u$ )	43	30
Densidade Máxima ( $\gamma_d$ ) – (Proctor Normal)	17,40 N/m <sup>3</sup>	-
Umidade Ótima ( $\omega_{ot}$ ) – (Proctor Normal)	15,90%	-
Densidade Máxima ( $\gamma_d$ ) – (Proctor Modif.)	18,90 N/m <sup>3</sup>	19,40 kN/m <sup>3</sup>
Umidade Ótima ( $\omega_d$ ) – (Proctor Modif.)	13,90%	12,10%

### 3.3.2 Água

A água utilizada na preparação de todos os corpos de prova é a destilada, bem como a utilizada durante os ensaios triaxiais.

### 3.3.3 Fibras

As fibras de polipropileno utilizadas nessa pesquisa são produzidas pela Fitesa Fibras e Filamentos S/A. Foram escolhidos dois títulos, o primeiro de 3,3 dtex e diâmetro médio de 0,023mm e o segundo de 88 dtex (0,11mm de diâmetro). As fibras possuem uma resistência à tração na ruptura de 120 MPa, alongamento de ruptura de 80% e o módulo 2,3 GPa (dados fornecidos pela empresa).

As fibras de 3,3 dtex cedidas pela empresa possuem comprimentos de 6, 12, 24 e 60mm. E as fibras de 88 dtex são fabricadas e cedidas em filamentos inteiros e foram cortadas manualmente para atingir o comprimento de 24mm.

A Figura 3.3a apresenta as fibras de polipropileno de 24mm de comprimento e a Figura 3.3b apresenta um detalhe das fibras de polipropileno obtido de uma imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

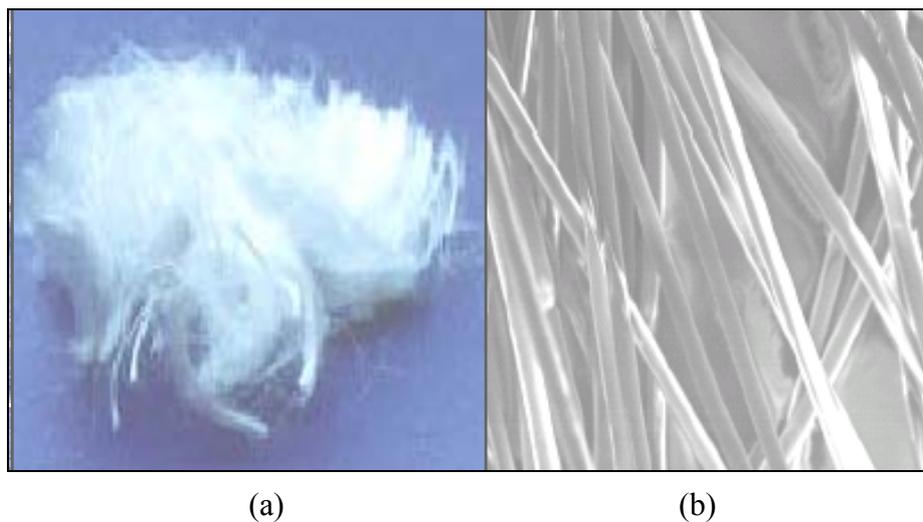


Figura 3.3 – Fibras de polipropileno (a) cortadas em comprimento de 24mm; (b) imagem de microscopia eletrônica de varredura com aumento de 90x.

### 3.4 ETAPA DE LABORATÓRIO

Nos sub-itens a seguir são apresentados os métodos de ensaio e os demais procedimentos empregados durante o programa experimental.

### **3.4.1 Programa de Ensaios**

De forma a cumprir com os objetivos propostos, foram realizados ensaios de laboratório que contemplam alguns ensaios de compactação e ensaios de compressão triaxial para as matrizes de solo e de solo-fibra.

Primeiramente, ensaios de compactação foram realizados visando-se avaliar os efeitos da inclusão de fibras de polipropileno nos parâmetros de compactação do solo residual areno-siltoso em questão. As misturas avaliadas foram: solo natural; solo com 0,5% de fibra de 12mm; solo com 0,5% de fibra de 60mm e misturas com fibras de 24mm de comprimento variando os teores em 0,5 e 0,75%. Conhecidas as curvas de compactação das misturas de solo e solo-fibra obtidas para a energia Proctor Normal, foi adotada uma curva de compactação destinada à moldagem dos corpos de prova, tanto de solo quanto de solo-fibra, devido a uma boa aproximação dos valores obtidos para umidades ótimas e densidades máximas correspondentes.

A etapa principal se baseou na realização de ensaios de compressão triaxial adensados drenados (CID), levados a grandes deformações (dentro de uma faixa de 20 a 25%). Foram executados 27 ensaios triaxiais no total, onde 2 destes são ensaios do tipo CID executados a partir de amostras retiradas do campo experimental, após a conclusão dos ensaios de placa.

De acordo com a metodologia de planejamento de experimentos, a etapa principal do programa experimental deste trabalho, referente aos ensaios triaxiais drenados, se baseou na variação dos seguintes fatores: tensão efetiva média inicial (20, 60, 100, 200, 300 e 400 kPa), comprimento de fibra (6, 12 e 24mm), título da fibra (3,3 e 88 dtex) e teor de fibra (0; 0,25; 0,5 e 0,75%), calculado em relação à massa de solo seco. Como também três teores de umidade (13; 16,2 e 18,8%) com valores de peso específico máximo variando entre 17 e 17,4 kN/m<sup>3</sup>, e três velocidades de carregamento distintas (0,0173; 0,00865 e 0,00432 mm/min).

### **3.4.2 Preparação dos Corpos de Prova**

Primeiramente as amostras de solo foram coletadas na jazida de origem, no estado deformado, trazidas para o laboratório, secas ao ar, destorroadas, peneiradas e acondicionadas em sacos plásticos.

Na preparação dos corpos de prova para os ensaios de compressão triaxial foram executadas misturas na umidade ótima (16,2%). Ao se avaliar a influência do teor de umidade, estando esta no ramo seco ou no úmido da curva de compactação, foram executadas misturas com 13,0 e 18,8% respectivamente. As densidades de compactação utilizadas para as misturas foram de 17,4 kN/m<sup>3</sup>, correspondente à umidade ótima, e de 17 kN/m<sup>3</sup>, relativa às umidades nos ramos seco e úmido da curva de compactação.

A preparação dos corpos de prova para os ensaios triaxiais compreendeu as seguintes etapas: mistura dos componentes, moldagem e acondicionamento.

*a) Mistura dos componentes:*

A quantidade de fibra adicionada à mistura foi determinada em relação à massa de solo seco e o peso de água foi calculado em relação ao peso total da matéria prima seca (solo + fibra). Todos os materiais (solo, fibra e água) foram pesados com resolução de 0,01gf. Os componentes foram adicionados em um recipiente na seguinte seqüência: solo, fibras e água. Esta seqüência foi a mais apropriada, pois permitiu a homogeneização dos componentes secos da mistura, antes de ser acrescentada a água. A mistura foi feita manualmente até ser obtida a homogeneização, verificada visualmente. Durante esse processo todas as precauções foram tomadas no sentido de se evitar as perdas de umidade por evaporação.

*b) Moldagem:*

Imediatamente após a mistura, a amostra era compactada estaticamente em três camadas no interior de um molde plástico bi-partido, devidamente lubrificado, de 5cm de diâmetro e 10cm de altura. O controle da densidade foi feito monitorando-se a altura de cada camada. Ao final desta etapa uma pequena amostra de material era retirada para o controle da umidade.

A técnica de compactação empregada foi a estática, na qual um êmbolo metálico é introduzido dentro do molde a uma velocidade aproximadamente constante.

*c) Acondicionamento:*

Ao ser retirado do molde, o corpo de prova tinha suas dimensões e massa registrados com resolução de 0,01cm e 0,01g, sendo imediatamente acondicionado em um saco plástico devidamente identificado e vedado para evitar mudanças no seu teor de umidade.

### 3.4.3 Ensaios de Compactação

Para os ensaios de compactação as amostras de solo foram preparadas conforme a norma NBR 6457 (ABNT, 1986a). O ensaio de compactação foi realizado conforme prescrito na norma NBR 7182 (ABNT, 1986b). Como descrito no item 3.3, as misturas avaliadas para a determinação das curvas de compactação na energia Proctor Normal foram: solo natural; solo com 0,5% de fibra de 12mm; solo com 0,5% de fibra de 60mm e misturas com fibras de 24mm de comprimento nos teores de 0,5 e 0,75%.

### 3.4.4 Ensaios de Compressão Triaxial

Ensaio de compressão triaxial adensados drenados (CID) foram executados sob carregamento estático. Os procedimentos adotados foram basicamente os descritos por Bishop & Henkel (1962). Foram adotados vários níveis de tensão efetiva, conforme o programa experimental (de 20 a 400kPa).

Após a montagem do corpo de prova na câmara triaxial e o ajuste dos sensores de efeito Hall, iniciava-se a fase de saturação da amostra. O processo de saturação foi feito de duas maneiras: (1) pela percolação de água, da base para o topo do corpo de prova; nesta etapa a amostra era submetida a uma tensão confinante de 30kPa para impedir o fluxo preferencial entre o corpo de prova e a membrana; (2) pela aplicação de contra-pressão, onde estágios de incrementos de 50kPa na tensão confinante e na contra-pressão eram aplicados, sendo a tensão confinante mantida a um nível ligeiramente superior (20kPa). Quando a poro-pressão monitorada na base do corpo de prova equalizava-se com a contra-pressão aplicada em seu topo, um novo incremento de pressão era aplicado. O processo continuava até chegar-se a um valor médio de aproximadamente 430kPa, o qual era mantido constante durante todo o ensaio.

A garantia de saturação da amostra foi monitorada através da medição do parâmetro B (Skempton, 1954), medido após a aplicação de um incremento de tensão, realizada nos dois últimos níveis de tensões possíveis, limitado pela contra-pressão utilizada na fase de cisalhamento.

A velocidade de carregamento empregada, para os ensaios onde não foi avaliada a influência deste fator, foi de 0,0173mm/min, e nos ensaios onde foi avaliada a influência da velocidade de carregamento, a mesma se concentrou em valores de 0,00432; 0,00865 e

0,0173mm/min. Resultando em respectivamente 25, 50 e 100% da velocidade usualmente empregada.

A seguir são relatadas as principais características do equipamento empregado nos ensaios triaxiais:

- Prensa: marca Wykeham Farrance, modelo WF 10056 Trittech 50, com capacidade máxima de 50kN;
- Câmara triaxial: marca Wykeham Farrance, modelo WF 11144;
- Sistema de aplicação de pressão: células de pressão com interface ar/água, onde o nível máximo de pressão aplicado foi de 700 kN/m<sup>2</sup>;
- Aquisição de dados: conversor analógico/digital (dataloger) da Helwett Packard e um microcomputador PC/AT 386;
- Medidores de pressão confinante e poro pressão: transdutor de pressão da marca Gefran, modelo TP86 e transdutor da marca Ashcroft;
- Medidores de variação volumétrica: para medição externa da variação volumétrica do corpo de prova utilizou-se um transdutor tipo Imperial College;
- Medidores de deformação: transdutor de deslocamento marca Gefran, modelo LTM 50Sm, como medidor externo e instrumentação interna composta por três sensores de efeito Hall (Soares et al., 1994), dois para medição de deformação axial e um para deformação radial;
- Medidores de força axial: célula de carga da marca Kratos, modelo KM.

### 3.5 ETAPA DE CAMPO

#### 3.5.1 Descrição do Campo Experimental

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC/UFRGS), em parceria com a Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE), mantém desde o final da década de 80, no município de Cachoeirinha – RS,

próximo à rodovia RS 020 (conforme ilustrado na Figura 3.4), um campo experimental onde vem sendo desenvolvido um amplo programa de pesquisas que abrange as mais diversas questões e problemas geotécnicos. Tal programa envolve o estudo de caracterização e comportamento de solos lateríticos, a determinação de parâmetros geotécnicos em laboratório e *in situ* viabilizando estudos analíticos e numéricos, o estudo do comportamento de solos melhorados e reforçados para o uso geotécnico, além de estudos relacionados ao comportamento de estacas e micro-estacas, análise de integridade e mecanismos de interação solo-estrutura.

Diferentes tipos de ensaios de campo foram feitos por pesquisadores da UFRGS no campo experimental. Luzzardi & Militistky (1987) realizaram provas de carga em sapatas quadradas de concreto; Meskraitis (1988), Matos (1989) e Ramires (1993) realizaram provas de carga em estacas escavadas de pequeno diâmetro. Cudmani (1994) realizou ensaios de placas de diferentes diâmetros sobre o horizonte B do solo natural; Mántaras (1995) e Nakahara (1995) realizaram ensaios pressiométricos; Vendruscolo (1996) realizou ensaios de placa sobre uma camada de solo natural compactado e estabilizado com cimento. Prezzi (1990) e Averbek (1996) executaram ensaios de CPT mecânico e elétrico, respectivamente; Sales (1998) realizou ensaios de placa sobre camadas de solo natural estabilizado com cimento; Tessari (1998) realizou ensaios de placa sobre camadas de cinza pesada estabilizada com cimento; Thomé (1999) executou provas de carga em placas sobre aterros utilizando a mistura de resíduos industriais de cinza pesada e cal de carbureto na estabilização de um solo de arenito e Consoli et al. (2001) estudaram a influência de camadas compactadas de areia estabilizada com cimento e também de areia-cimento reforçada com fibras de polipropileno, no comportamento carga-recalque de fundações superficiais.

Seguindo a linha de pesquisa que busca o reforço de solos para o uso em fundações superficiais, este trabalho busca contribuir para o desenvolvimento do conhecimento do uso de fibras distribuídas aleatoriamente na massa de um solo residual areno-siltoso, verificando o comportamento carga x recalque de fundações superficiais, assentes sobre espessas camadas de solo tratado, através de provas de carga. A espessura das camadas tratadas foi de pelo menos 4 vezes o diâmetro das placas utilizadas, garantindo, do ponto de vista prático, a total independência do solo residual subjacente da região.

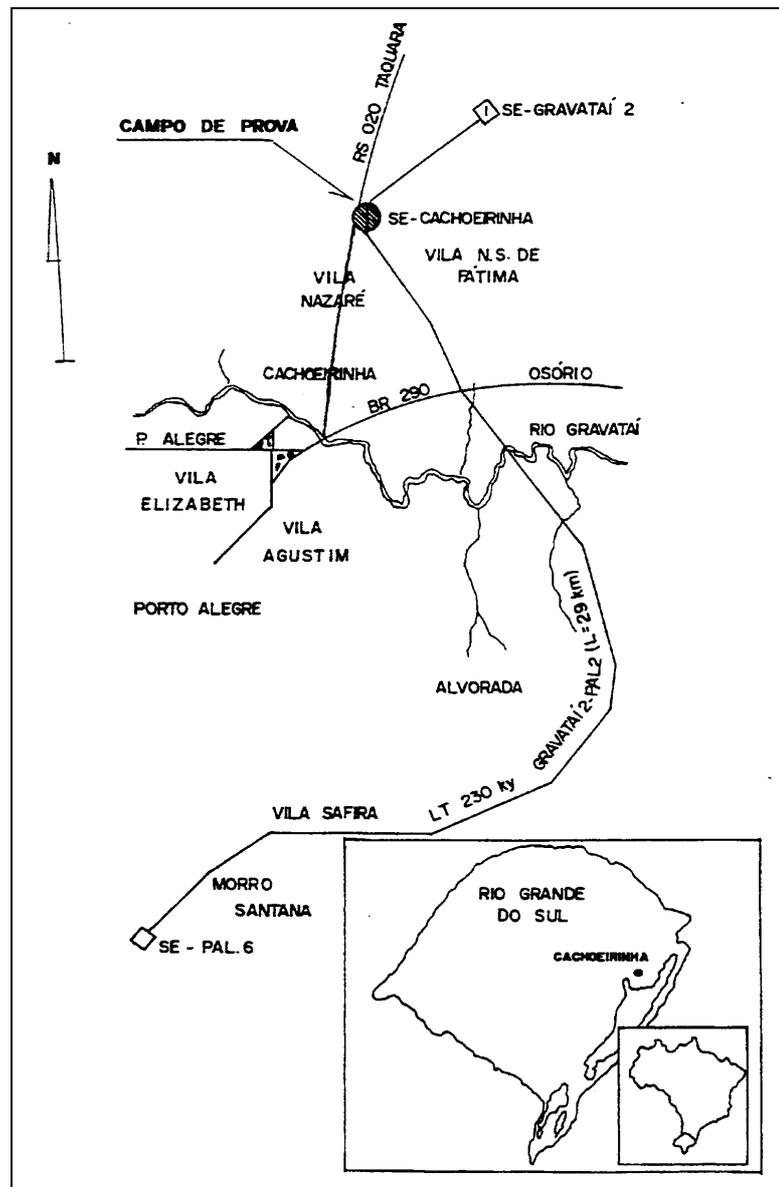


Figura 3.4 – Localização do campo experimental da UFRGS (Ramires, 1993).

### 3.5.2 Preparação e Execução dos Ensaios de Placa

#### 3.5.2.1 Preparação da Cava e Construção das Bases de Fundação

Inicialmente, para a execução das camadas compactadas de solo-fibra, foi aberta uma vala com dimensões totais de 1,5m de largura x 1,5m de comprimento e com 2,2m de profundidade, escavada, nivelada e regularizada com o auxílio de instrumentos manuais. Após executado o ensaio de placa referente à camada de solo-fibra, o material foi removido com o

auxílio de uma retroescavadeira, abrindo-se novamente a vala para que fossem executadas, então, as camadas compactadas de solo.

O solo residual de arenito Botucatu foi coletado na jazida (localizada em São Leopoldo – RS) e armazenado no campo experimental de Cachoeirinha até a sua utilização. Devido ao alto teor de umidade natural, o mesmo foi espalhado sobre lonas plásticas para secar ao ar. O solo foi submetido a um processo de destorroamento antes de sua utilização. Após esse processo, o material foi coberto com lona plástica a fim de evitar a variação de umidade. No momento do uso, o teor de umidade do solo foi verificado através do método da frigideira. O teor de umidade médio obtido foi de aproximadamente 10%.

Foram necessários 25,7 kg de fibras de polipropileno de 24mm de comprimento, referentes à inclusão de 0,5% de fibras em relação ao peso do solo seco. As fibras foram desfiadas manualmente e distribuídas aleatoriamente na massa de solo com o auxílio de uma betoneira.

A execução das bases de fundação foram realizadas em duas diferentes datas. As bases de solo e solo-fibra foram executados com 1,5m de largura x 1,5m de comprimento x 1,2m de espessura, destinados aos ensaios com a placa de 0,30m de diâmetro.

Todos os materiais foram dosados em massa e a mistura dos mesmos foi feita em betoneira convencional para argamassa, com capacidade de 320 litros. Primeiramente, o solo foi misturado com as fibras até que fosse visível uma homogeneidade do mesmo; logo após, adicionava-se a água e continuava-se a misturar por aproximadamente 10 minutos. A Figura 3.5 apresenta o resultado da mistura, onde se observa a formação de “esferas” de vários diâmetros. Internamente foi assegurada uma mistura homogênea entre o solo e as fibras, onde estas se distribuíram de forma aleatória, sendo essas “esferas” “amassadas” durante o processo de compactação. Para as camadas de solo a mistura também apresentou a mesma característica, mas foi realizada apenas adicionando a quantidade prevista de água.



Figura 3.5 – Mistura dos materiais obtida em betoneira.

A mistura foi transportada com carrinho-de-mão até a cava e espalhada com o auxílio de equipamentos manuais. Depois de espalhada, foi realizada uma pré-compactação por “pisoteio”, a fim de obter uma base mais firme para a passagem do compactador. Foi utilizado um compactador do tipo “sapo” movido a gasolina. O controle de compactação foi realizado tanto pela altura das camadas, como pela retirada de anéis (6cm de diâmetro e 2cm de altura), após cada passagem do compactador, fixando como 3 o número máximo de passadas (Figura 3.6). Depois de compactados, as bases de fundação foram cobertas com lona plástica a fim de evitar a perda de umidade até o dia de execução dos ensaios.



Figura 3.6 – Compactação das camadas sob a viga de reação.

Na execução da base de fundação de solo-fibra foram obtidos os valores médios de 15,8% de umidade e  $18,4 \text{ kN/m}^3$  de peso específico aparente seco, para as 12 camadas executadas, com 10cm de espessura cada. Para as camadas de solo, realizadas também com 10cm de espessura, foram obtidos uma umidade de 16% e  $17,0 \text{ kN/m}^3$  de peso específico aparente seco. Para efeito de comparação, os valores médios de laboratório obtidos foram de 16,2% e  $17,4 \text{ kN/m}^3$  para umidade ótima e peso específico aparente seco, respectivamente.

Foram extraídas amostras diretamente do campo experimental e moldados corpos de prova para a realização de ensaios de compressão triaxial adensados drenados (CID). Estes ensaios tiveram como objetivo obter os parâmetros de resistência e deformabilidade da camada executada em campo.

### 3.5.2.2 Equipamento de Ensaio

O equipamento utilizado nos ensaios de placa era constituído basicamente de três sistemas: sistema de reação, sistema de aplicação de carga e sistema de leitura e aquisição de dados.

#### a) Sistema de reação:

O sistema de reação consistiu de um pórtico com duas sapatas de concreto, uma viga de aço e sobrecarga sobre a viga. As sapatas eram constituídas de uma base de concreto de

forma piramidal, na qual se engastava uma coluna formada por dois perfis U, pesando 20kN cada uma, aproximadamente. A viga de reação era constituída de um perfil H fabricado com chapas de aço de 25,4mm de espessura e pesando 20kN, aproximadamente. A sobrecarga sobre a viga era constituída de 11 blocos de concreto com 10kN cada, aproximadamente. Este sistema já existia no campo experimental e foi utilizado por Vendruscolo (1996), Sales (1998), Tessari (1998), Thomé (1999) e Consoli et al. (2001).

*b) Sistema de transmissão de carga:*

O sistema de transmissão de carga consistiu de um conjunto de macaco e bomba hidráulica, células de carga, tubos de transmissão e placas. O macaco e a bomba hidráulica, da marca ENERPAC, tinham capacidade de 500kN. A célula de carga utilizada era da marca KRATOS, com capacidade de 500kN, calibrada em laboratório em incrementos de 30kN. Para a transferência da carga entre a placa e o sistema de reação, foram utilizados tubos metálicos de 0,20m de diâmetro. As placas foram confeccionadas em aço, com espessura de 25,4mm e, para aumentar a rigidez à flexão, foram soldados três contrafortes em sua superfície. Neste trabalho foi utilizada uma placa de 0,30m de diâmetro.

*c) Sistema de medição dos deslocamentos e aquisição de dados:*

As medidas dos deslocamentos verticais foram realizadas diretamente sobre a placa e sobre a superfície da camada de solo reforçado e não reforçado. Os deslocamentos da placa foram medidos em três pontos e o deslocamento da superfície da camada de solo-fibra e de solo foi medido em um único ponto, sempre a uma distância de 10cm da borda das placas. Os deslocamentos foram medidos com quatro medidores de deslocamento linear, da marca GEFTRAN (modelo LTM-50-S), com erro máximo de 0,005% e 50mm de curso. Esses medidores tinham a função de transformar o deslocamento da placa em um sinal elétrico correspondente, o qual era transferido para um sistema de aquisição de dados. Todos os medidores de deslocamentos foram calibrados em laboratório antes de sua utilização no campo. Os medidores de deslocamentos foram fixados em vigas de referência de madeira, as quais foram fixadas nas laterais da cava com hastes metálicas de aproximadamente 0,30m.

Para aquisição dos dados de deslocamento foi utilizado um *notebook* PC/AT486 e um conversor de sinal analógico digital (*data-logger*), como mostra a Figura 3.7. O software utilizado para gerenciamento do ensaio foi escrito na linguagem Q-basic e tinha a função de, a cada 10 segundos, atualizar as medidas obtidas da instrumentação e calcular os

deslocamentos em função das constantes de calibração e seus valores iniciais. Os deslocamentos obtidos eram apresentados na tela do computador a fim de se ter um acompanhamento do andamento do ensaio, e os correspondentes valores em volts foram gravados em um arquivo, o qual foi manipulado posteriormente em planilha eletrônica. As leituras da célula de carga foram realizadas manualmente através de um multímetro com precisão de 0,01mV. Todos os instrumentos foram excitados com voltagem de 10 volts, utilizando-se uma fonte Leader LPS-136.



Figura 3.7 – Detalhe do sistema de aquisição de dados.

### 3.5.3 Método de Ensaio

A execução do ensaio de placa pode ser dividido em três fases: instalação do sistema de reação, preparação do ensaio e aplicação do carregamento. A instalação do sistema de reação foi realizada com o auxílio de um guindaste (caminhão “Munk”) com capacidade de 75kN.

A preparação do ensaio consistiu na regularização da base onde a placa era assentada e montagem do sistema de aplicação de carga e do sistema de medição de deslocamentos. Finalmente era instalado o sistema de aquisição de dados que efetuava a medida da carga aplicada e dos deslocamentos da placa e da superfície da base de fundação.

A aplicação do carregamento foi realizada em estágios sucessivos. Os valores dos incrementos de carga seguiram as recomendações da NBR 6489 (ABNT, 1984d), que limita o valor do incremento em no máximo 20% da carga de ruptura prevista. Os valores destes incrementos não foram fixados, variando de ensaio para ensaio. No entanto, tomou-se o

cuidado de reduzir os valores dos incrementos após a passagem do trecho elástico, para que a curvatura da curva carga x recalque ficasse bem definida. As leituras dos defletômetros foram feitas em intervalos de tempo de 1, 2, 4, 8, 15, 30 e 60 minutos após a aplicação do estágio de carga. A aplicação de um novo estágio de carregamento só era realizada após ser verificado o critério de estabilização dos recalques propostos pela MB 3472 (ABNT, 1991), a qual estabelece que:

$$L_n - L_{n-1} < 5\%(L_n - L_1)$$

Onde:

$L_n$  = leitura em um instante n qualquer;

$L_{n-1}$  = leitura imediatamente anterior à leitura  $L_n$ ;

$L_1$  = primeira leitura após a aplicação do estágio de carregamento.

Durante os ensaios verificou-se que a estabilização dos deslocamentos ocorria rapidamente, principalmente nos primeiros incrementos de carga.

## **CAPÍTULO 4**

### **4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO E DE CAMPO**

#### **4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em todos os ensaios de laboratório realizados nessa pesquisa, onde se pretende avaliar a influência das variáveis investigadas no comportamento de resistência e deformação do solo residual de arenito reforçado com fibras de polipropileno. A apresentação dos mesmos, com relação aos ensaios de compressão triaxial, se dá de acordo com as variáveis de interesse investigadas, esclarecidas no item 4.3 a seguir.

#### **4.2 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO**

A Figura 4.1 apresenta as curvas de compactação obtidas para as misturas de solo natural; solo com 0,5% de fibra de 12mm; solo com 0,5% de fibra de 60mm e misturas com fibras de 24mm de comprimento nos teores de 0,5 e 0,75%, obtidas mediante o emprego do esforço de compactação correspondente àquele especificado pela energia de Proctor Normal.

Em linhas gerais percebe-se que a inclusão de fibras não causou alterações significativas nos parâmetros ótimos de compactação do solo residual de arenito. Devido à pouca variação nos valores obtidos para umidades ótimas e pesos específicos secos máximos correspondentes, foi adotada uma curva de compactação destinada à moldagem dos corpos de prova, tanto de solo quanto de solo-fibra, com umidade ótima de 16,2% e peso específico seco máximo de 17,4 kN/m<sup>3</sup>.

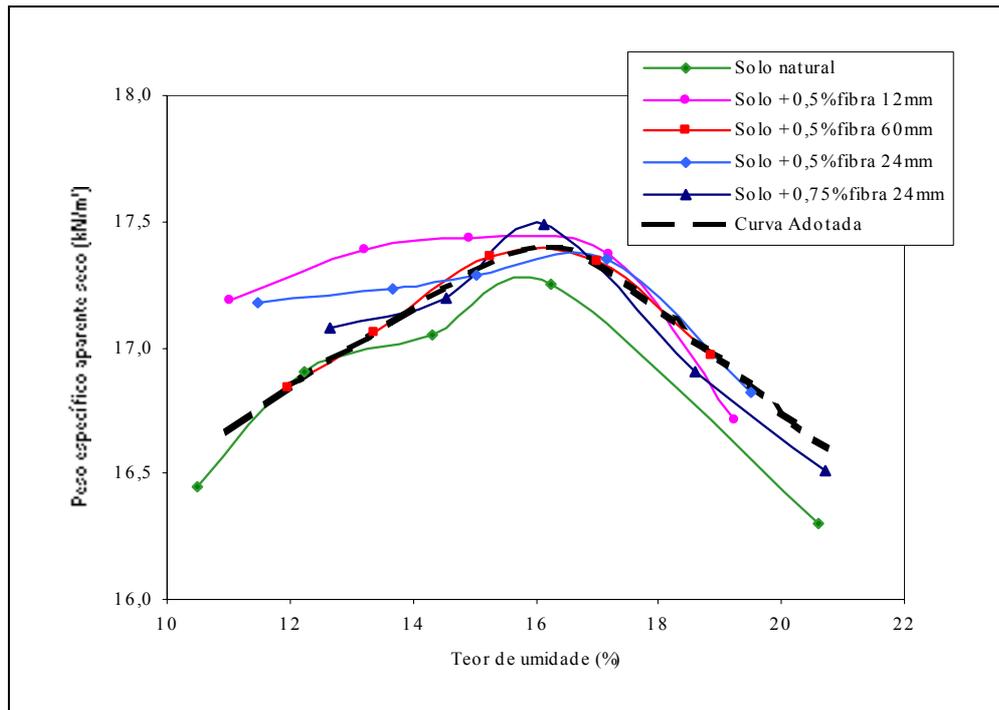


Figura 4.1 – Curvas de compactação das misturas de solo e solo-fibra (Proctor Normal).

### 4.3 ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios triaxiais adensados drenados (CID) realizados sobre amostras de solo e de solo reforçado com fibras de polipropileno. O estudo abrange aspectos relacionados com as condições de realização dos ensaios, como a influência da tensão confinante, da velocidade de carregamento e do comportamento carga-descarga-recarga do solo reforçado, da variação de umidade e densidades correspondentes, da variação dos teores, dos comprimentos e dos títulos das fibras, buscando-se uma comparação entre estes.

#### 4.3.1 Influência da Tensão de Confinamento e da Inclusão de Fibras

Foram executados ensaios triaxiais drenados no solo residual de arenito Botucatu compactado e do mesmo reforçado com 0,5% de fibras de 24mm de comprimento, nas tensões confinantes de 20, 60, 100 e 200kPa para o solo compactado e de 20, 60, 100, 200, 300 e 400kPa para o solo reforçado, estando as amostras na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, de acordo com a curva de compactação adotada para o solo e para o solo-fibra.

#### 4.3.1.1 Trajetória de Tensões Efetivas

As Figuras 4.2 e 4.3, apresentadas a seguir, mostram as trajetórias de tensões efetivas seguidas nos ensaios triaxiais drenados para o solo residual de arenito compactado e para o solo-fibra, respectivamente. As trajetórias foram plotadas a partir do monitoramento da poro pressão na base do corpo de prova durante toda a fase de cisalhamento do ensaio, verificando-se que a condição de drenagem foi satisfatoriamente assegurada durante todo o ensaio.

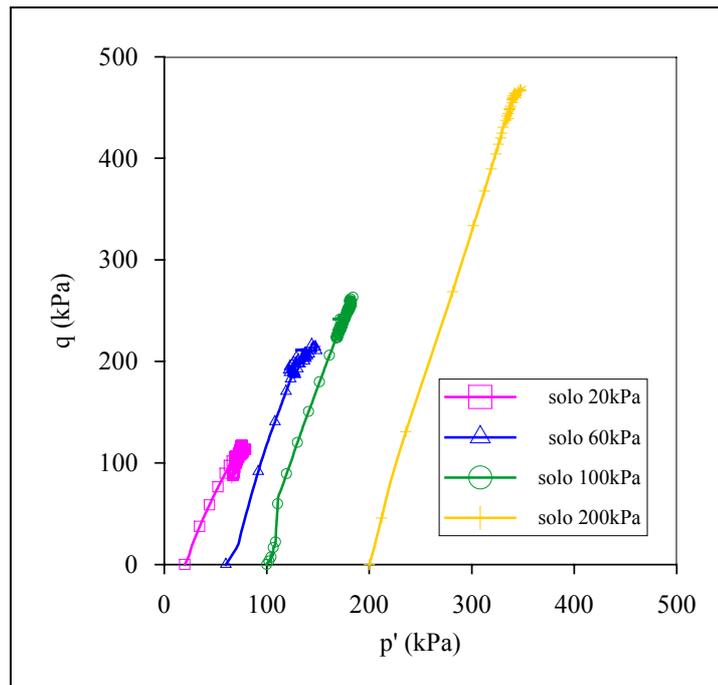


Figura 4.2 – Trajetória de tensões do solo residual de arenito compactado.

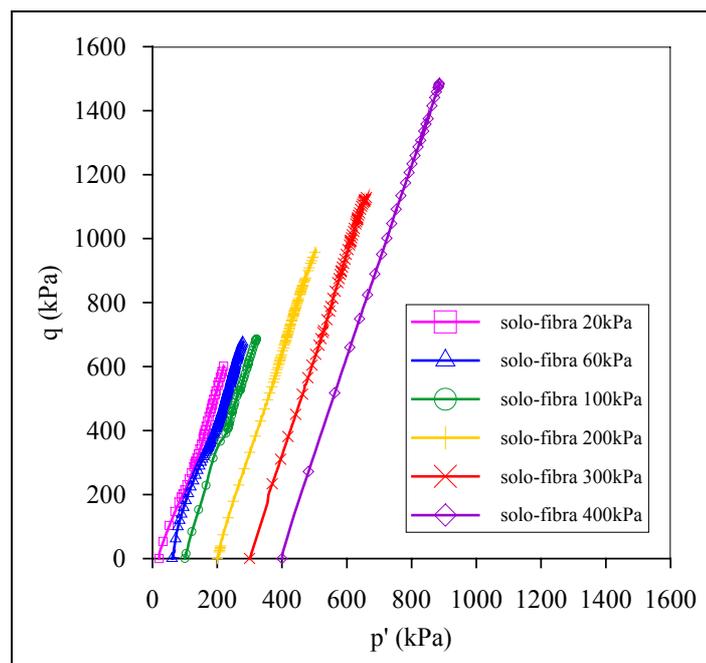


Figura 4.3 – Trajetória de tensões do solo reforçado (0,5% de fibras de 24mm de comprimento).

#### 4.3.1.2 Curvas Tensão-Deformação Axial e Variação Volumétrica

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram as curvas tensão-deformação plotadas no espaço deformação axial versus tensão desvio e também as curvas correspondentes de variação volumétrica, no espaço deformação axial versus deformação volumétrica, para os ensaios triaxiais no solo compactado e no solo-fibra, respectivamente.

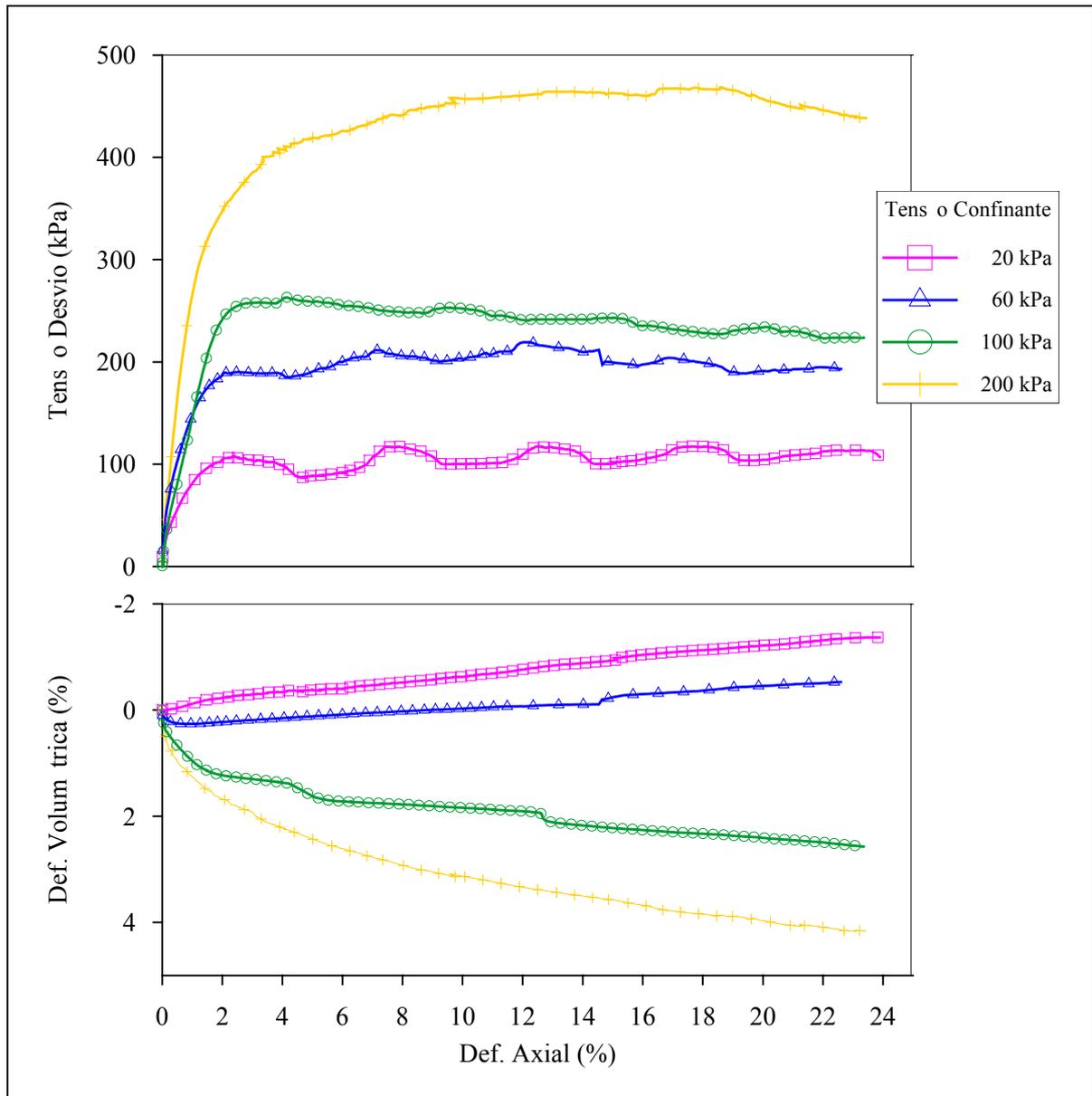


Figura 4.4 – Curvas tensão-deformação axial e deformação volumétrica-deformação axial para o solo residual de arenito compactado.

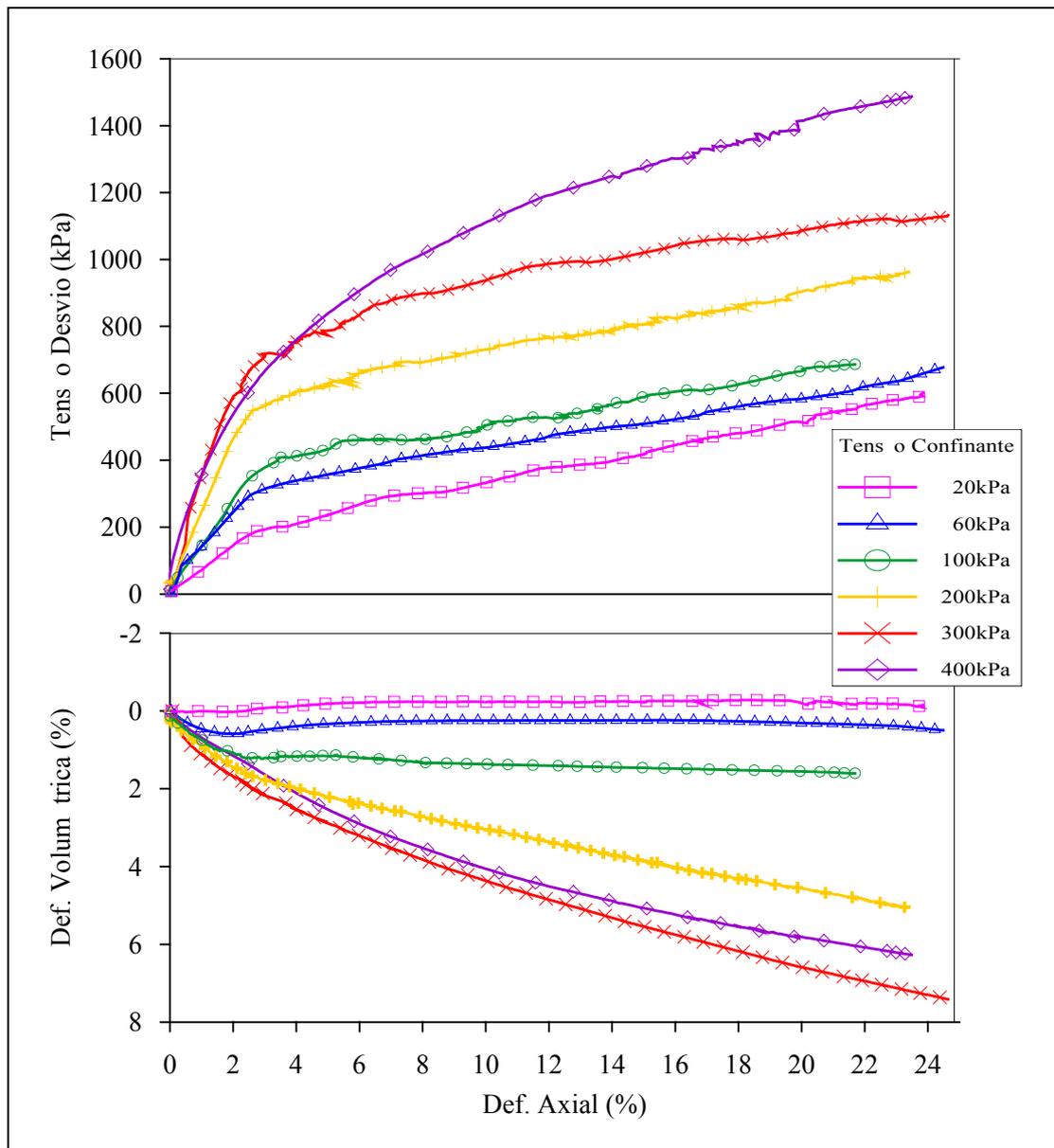


Figura 4.5 – Curvas tensão-deformação axial e deformação volumétrica-deformação axial para o solo reforçado (0,5% de fibras de 24mm de comprimento).

Para o solo residual de arenito Botucatu observa-se, nas curvas de variação volumétrica, uma pequena tendência dilatante para baixas tensões confinantes e tendência de contração para tensões confinantes maiores. Nas amostras de solo compactado pode ser observado um aumento de resistência com o aumento da tensão confinante.

As principais alterações provocadas pela inclusão de fibras de polipropileno ao solo compactado estão relacionadas à deformabilidade e ao comportamento resistente da matriz para grandes deformações. Observa-se então um crescimento constante de resistência com o

aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elasto-plástico de enrijecimento. Nota-se um aumento da deformação volumétrica compressiva do material, tanto maior quanto maior for o valor da tensão confinante.

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam uma comparação entre as curvas tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial para os ensaios triaxiais com 20, 60, 100 e 200kPa de tensão confinante, relativos ao solo compactado e ao solo reforçado. Verifica-se na Figura 4.7 uma maior rigidez inicial do solo compactado quando comparado com o solo reforçado a uma deformação axial de aproximadamente 1%.

Na Figura 4.7 as setas indicam o instante no qual as fibras passam a contribuir de forma mais significativa para o acréscimo de resistência do material, em aproximadamente 2,5% de deformação axial. A partir desta deformação torna-se evidente a diferença de comportamento entre as curvas tensão versus deformação axial do solo reforçado. São determinadas, então, três etapas que definem o comportamento resistente do solo reforçado. Uma etapa inicial, onde o comportamento é controlado basicamente pela matriz de solo, uma etapa intermediária, na qual o comportamento do material compósito é comandado conjuntamente pela matriz e pelas fibras, e uma etapa final, onde o comportamento do material é comandado essencialmente pelas fibras. Este comportamento também foi verificado para outros materiais no estudo realizado por Feuerharmel (2000).

Observa-se, para grandes deformações, um paralelismo entre as curvas tensão-deformação para as misturas com 0,5% de fibras de 24mm de comprimento, para todas as tensões confinantes estudadas, como também a existência de uma única taxa de acréscimo de tensão desvio em relação à deformação axial, de aproximadamente  $10^\circ$ , a partir do momento em que as fibras são mobilizadas. Os resultados indicam que as fibras de polipropileno quando adicionadas ao solo, alteram de forma marcante e definitiva as suas propriedades de resistência e deformabilidade.

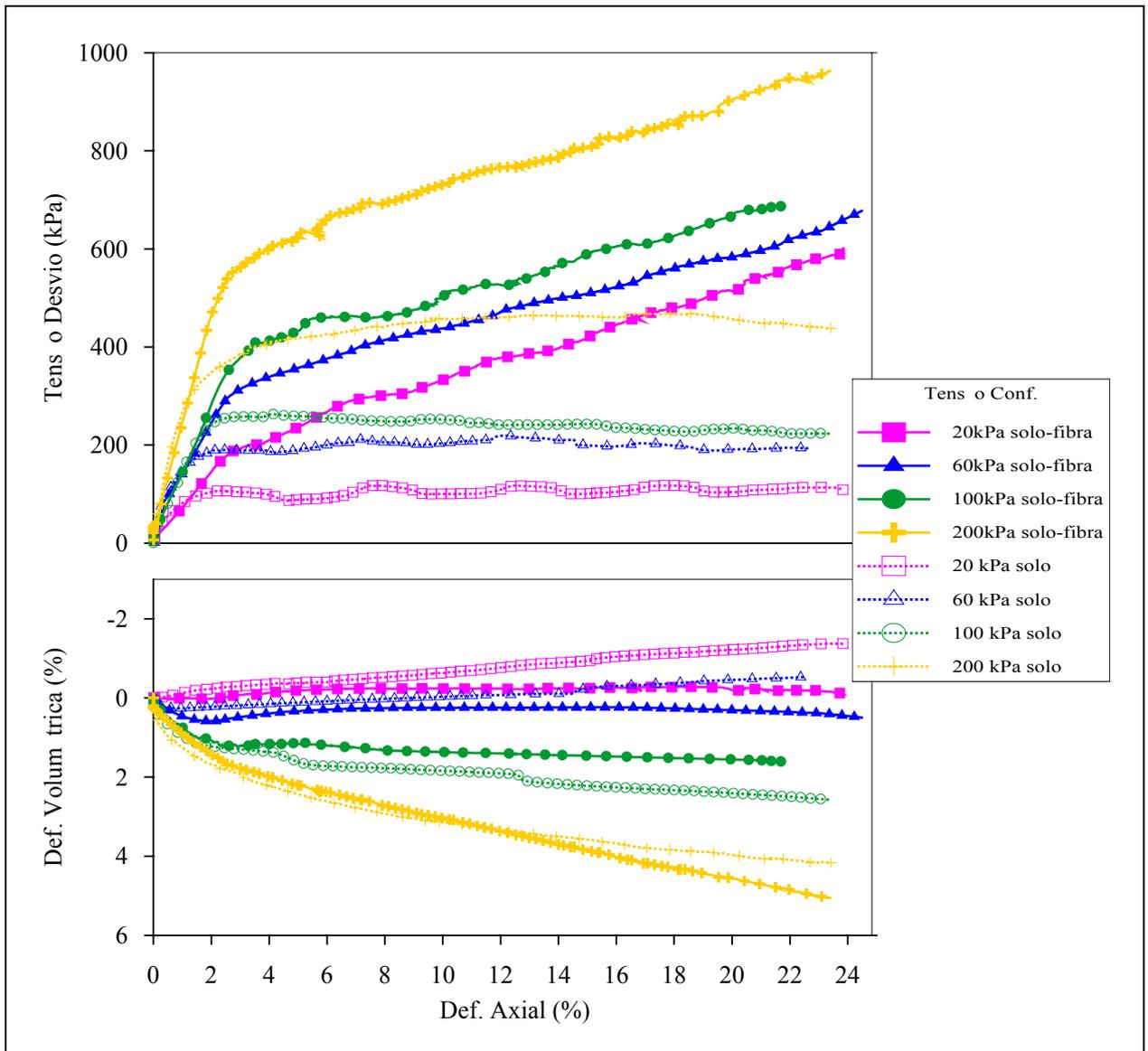


Figura 4.6 – Comparação entre as curvas tensão-deformação axial e deformação volumétrica-deformação axial para o solo residual compactado e o solo-fibra.

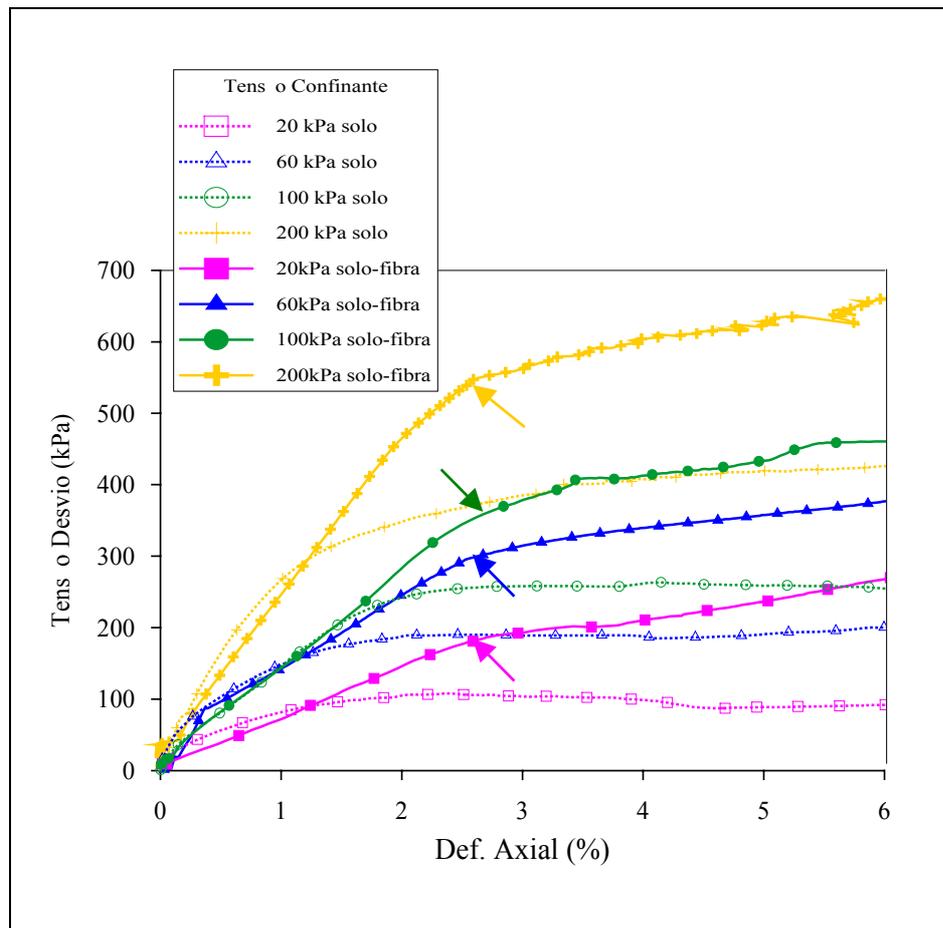


Figura 4.7 – Detalhe - comparação entre as curvas tensão-deformação axial e deformação volumétrica-deformação axial para o solo residual compactado e o solo-fibra.

#### 4.3.1.3 Envoltórias e Parâmetros de Resistência

A Figura 4.8 apresenta as envoltórias de resistência obtidas para o solo e o solo-fibra a 20% de deformação axial. A obtenção da coesão efetiva e do ângulo de atrito interno do solo foi executada a 10, 15 e 20% de deformação axial (Tabela 4.1).

A adição de fibras provocou um grande aumento na coesão do material, mantendo o ângulo de atrito praticamente inalterado. No processo de mistura do solo com a fibra notava-se claramente que as fibras proporcionavam um emaranhado que envolvia e, de certa forma “vinculava” os grãos do solo, promovendo um efeito de ancoragem. Esta observação foi traduzida no aumento do intercepto coesivo e comprovada pelos valores obtidos.

Analisando-se os valores apresentados na Tabela 4.1 percebe-se que, com o aumento da deformação axial (de 10 para 20%), o ângulo de atrito interno do solo reforçado permanece inalterado, havendo um aumento de 46% na coesão efetiva do mesmo. Isso reforça a hipótese de que as fibras concedem maior resistência ao solo e apresentam uma maior mobilização quanto maior for a deformação imposta ao material reforçado.

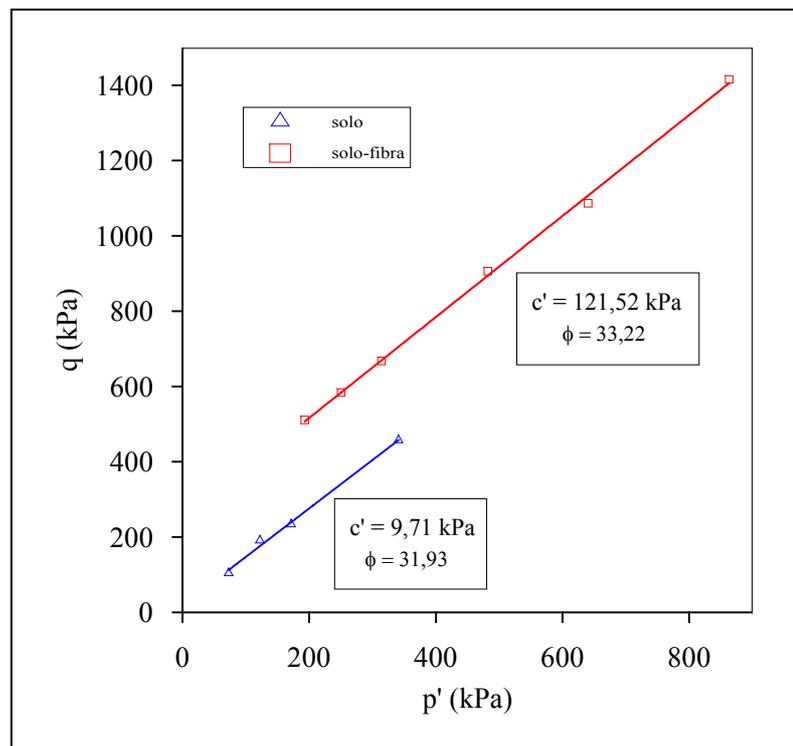


Figura 4.8 – Envoltória de tensões para o solo residual de arenito compactado e o solo reforçado com fibras a 20% de deformação axial.

Os parâmetros  $E_s$  (módulo secante) a 0,5% de deformação axial e  $E_{def}$  (energia de deformação absorvida) a 20% de deformação axial são apresentados na Tabela 4.2.

#### a) Módulo de deformação secante

A variação do módulo secante medido a 0,5% de deformação axial para as tensões confinantes estudadas para o solo e para o solo-fibra é apresentada na Figura 4.9 e na Tabela 4.2.

Observa-se que o módulo secante cresce com o aumento das tensões confinantes tanto para o solo quanto para o solo-fibra. De maneira geral a adição de fibras de polipropileno provoca uma redução do módulo secante do solo residual de arenito em

aproximadamente 20%. Isso pode ser conseqüência de mudanças na estrutura do material devido à incorporação das fibras.

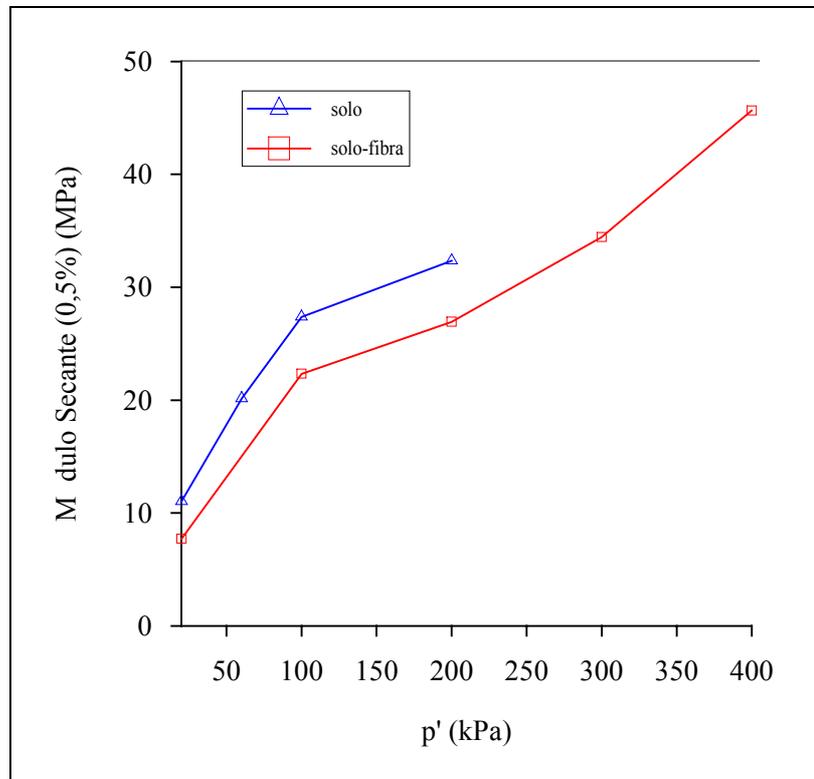


Figura 4.9 – Variação do módulo secante a 0,5% de deformação axial com a tensão confinante, do solo residual compactado e do solo reforçado.

#### b) Capacidade de absorção de energia de deformação

A Figura 4.10 mostra a variação das energias de deformação absorvidas para o solo compactado e para o solo-fibra, com a variação das tensões confinantes estudadas, medidas a 20% de deformação axial, também apresentada na Tabela 4.2.

Ao se comparar as energias de deformação absorvida obtidas com a variação da tensão confinante, observa-se o aumento da energia de deformação com a inclusão de fibras no solo compactado, onde a inclusão das mesmas causa um acréscimo de aproximadamente 220% na energia absorvida para a tensão confinante de 20kPa e um aumento de 65% para 200kPa de tensão confinante. Isso indica que a adição de fibras majora a tenacidade do solo residual de arenito, principalmente para baixas tensões de confinamento.

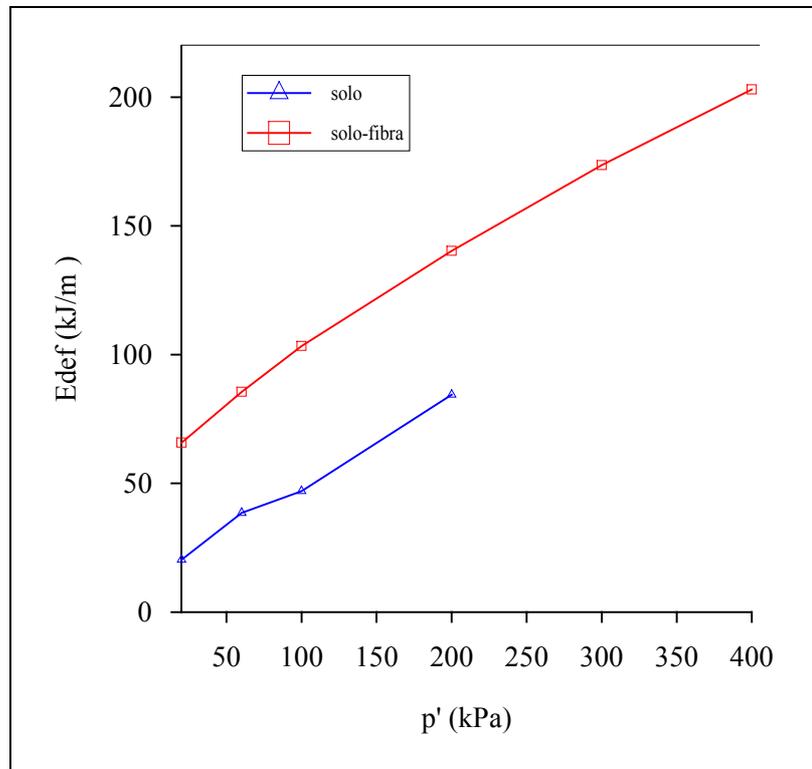


Figura 4.10 – Energias de deformação absorvidas para 20% de deformação axial, com variação da tensão confinante, para o solo residual compactado e o solo reforçado.

Tabela 4.1 – Valores de atrito interno e coesão efetiva do solo e do solo-fibra com variação da deformação axial.

mistura	$\epsilon_a = 10\%$		$\epsilon_a = 15\%$		$\epsilon_a = 20\%$	
	$\phi'$ (graus)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (graus)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (graus)	$c'$ (kPa)
Solo	32,54	7,15	32,53	7,15	31,93	9,71
Solo-fibra	31,51	83,14	32,64	100,37	33,22	121,52

Tabela 4.2 – Módulo de deformação secante e energia de deformação absorvida para o solo residual compactado e para o solo reforçado com fibras.

<b>Ensaio – variação tensão confinante</b>	<b><math>E_{s(0,5\%)}</math></b>	<b><math>E_{def(20\%)}</math></b>
Solo 20kPa	11,05	20,34
Solo 60kPa	20,16	38,54
Solo 100kPa	27,38	47,00
Solo 200kPa	32,37	84,41
Solo-fibra 20kPa	7,73	65,80
Solo-fibra 60kPa	17,34	85,54
Solo-fibra 100kPa	22,33	103,36
Solo-fibra 200kPa	26,94	140,34
Solo-fibra 300kPa	34,44	173,64
Solo-fibra 400kPa	45,66	203,01

#### 4.3.2 Influência da Velocidade de Carregamento

A Figura 4.11 mostra as curvas tensão-deformação axial e variação volumétrica-deformação axial, resultantes dos ensaios executados com variação da velocidade de carregamento, para solo-fibra com 0,5% de fibra de 24mm de comprimento na umidade ótima e densidade máxima, com tensão confinante de 60kPa. A velocidade se concentrou em valores de 0,00432; 0,00865 e 0,0173 mm/min, sendo esta última a usualmente empregada, resultando em 25, 50 e 100% da velocidade usualmente adotada, respectivamente.

Observa-se que a mudança da velocidade de carregamento não afeta os parâmetros de resistência e deformabilidade do solo reforçado para os níveis de velocidade estudados, mesmo constatando-se uma maior rigidez inicial no caso do carregamento mais lento realizado (correspondente a 0,00432mm/min). A deformação volumétrica apresenta um caráter inicialmente compressivo até a deformação axial de aproximadamente 6%, permanecendo constante no decorrer dos ensaios para as três velocidades estudadas.

Lembrando que os resultados obtidos não podem ser considerados definitivos pelo fato das fibras de polipropileno virem a apresentar características de fluência quando

submetidas a ensaios mais lentos, o que não foi estudado nessa pesquisa. Ou seja, se elas forem utilizadas em um compósito para suportar tensões altas permanentemente, consideráveis alongamentos e deflexões podem ocorrer ao longo do tempo.

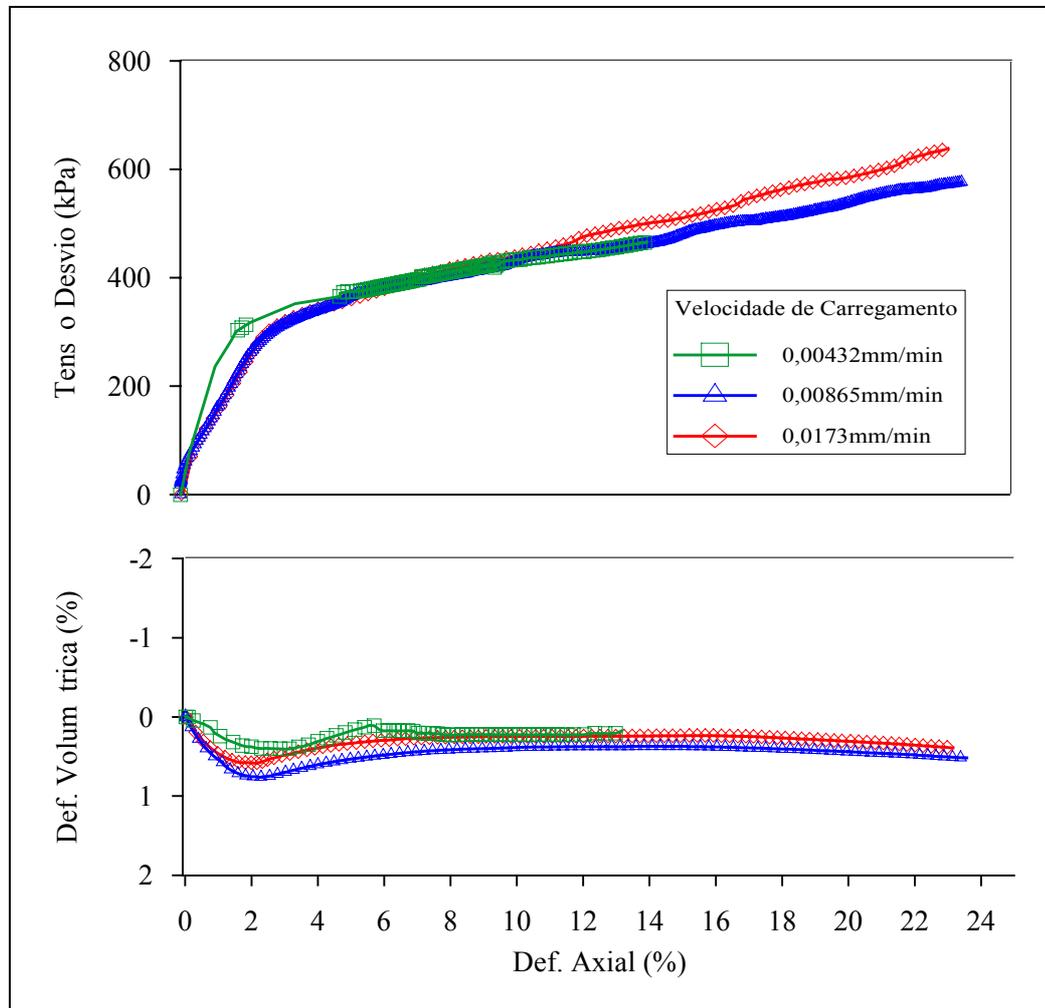


Figura 4.11 – Comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial para solo-fibra sob diferentes velocidades de carregamento.

### 4.3.3 Comportamento Carga-Descarga-Recarga

Primeiramente, na Figura 4.12, são apresentados os tipos de comportamento tensão x deformação que podem ser obtidos em um ensaio de compressão de uma amostra cilíndrica. Nas Figuras 4.12a e 4.12b as curvas de carga e descarga são coincidentes. Este comportamento é chamado de elástico, ou seja, todas as deformações são recuperadas quando o carregamento é retirado. Este comportamento pode ser linear (Figura 4.12a) ou não linear

(Figura 4.12b). Quando alguma das deformações não é recuperada no descarregamento, esta é chamada de deformação plástica e o material exibe um comportamento plástico (Figura 4.10c). A Figura 4.12d apresenta o comportamento chamado rígido plástico, no qual não ocorrem deformações elásticas recuperáveis. Na Figura 4.12e estão apresentados os três diferentes tipos de comportamento elasto-plástico que podem existir, os quais se distinguem pelo comportamento após a tensão ter atingido o valor de plastificação ( $\sigma_y$ ). Na curva 1 é apresentado o comportamento elástico perfeitamente plástico, o qual significa que a tensão de plastificação não é influenciada pelo nível de deformação no tramo plástico. As curvas 2 e 3 apresentam os casos de endurecimento e amolecimento, respectivamente. Isto quer dizer que após atingir a tensão de plastificação, a tensão pode aumentar (curva 2) ou diminuir (curva 3) com o nível de deformação (Desai & Christian, 1977).

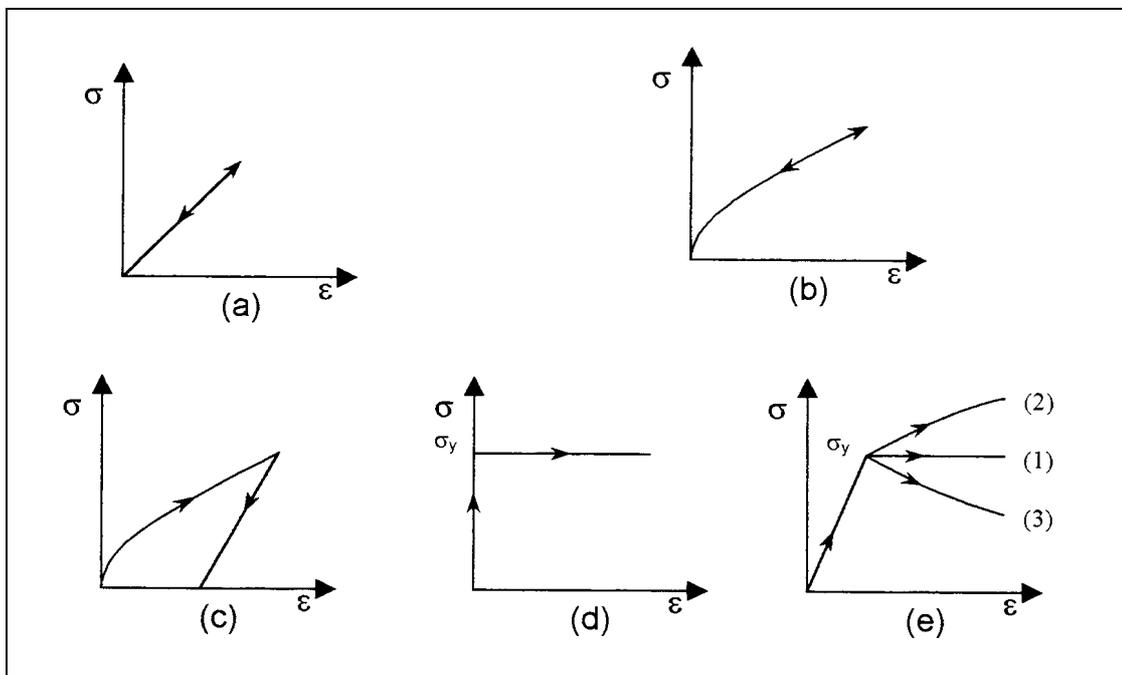


Figura 4.12 – Tipos de comportamento tensão x deformação: (a) linear elástico; (b) não-linear elástico; (c) não elástico ou plástico; (d) rígido perfeitamente plástico; (e) elástico-plástico: (1) perfeitamente plástico; (2) enrijecimento; (3) amolecimento (Desai & Christian, 1977).

Na Figura 4.13 são apresentadas as curvas tensão-deformação axial e variação volumétrica-deformação axial resultantes dos ensaios triaxiais realizados em solo compactado reforçado com 0,5% de fibras de 24mm de comprimento na umidade ótima e densidade máxima com tensão de confinamento de 60kPa. Entretanto um dos ensaios foi submetido a ciclos sucessivos de carga, descarga e recarga, respectivamente a 0,75, 8 e 22% de deformação axial.

Comparando-se as curvas obtidas, observa-se que os ciclos de carga, descarga e recarga não influenciaram a resistência do solo reforçado. O mesmo pode ser dito com relação à deformação volumétrica.

O comportamento carga-descarga-recarga relativo aos ciclos realizados é predominantemente plástico na descarga, com grandes deformações irreversíveis, apresentando uma pequena parcela elástica. No ciclo descarga-recarga pode ser verificado um certo nível de histerese (como se observa na Figura 4.13 para o segundo e terceiro ciclos e na Figura 4.14 para o primeiro ciclo), fato este devido à energia elástica armazenada nas partículas, correspondente a uma maior rigidez no processo de recarregamento do solo reforçado.

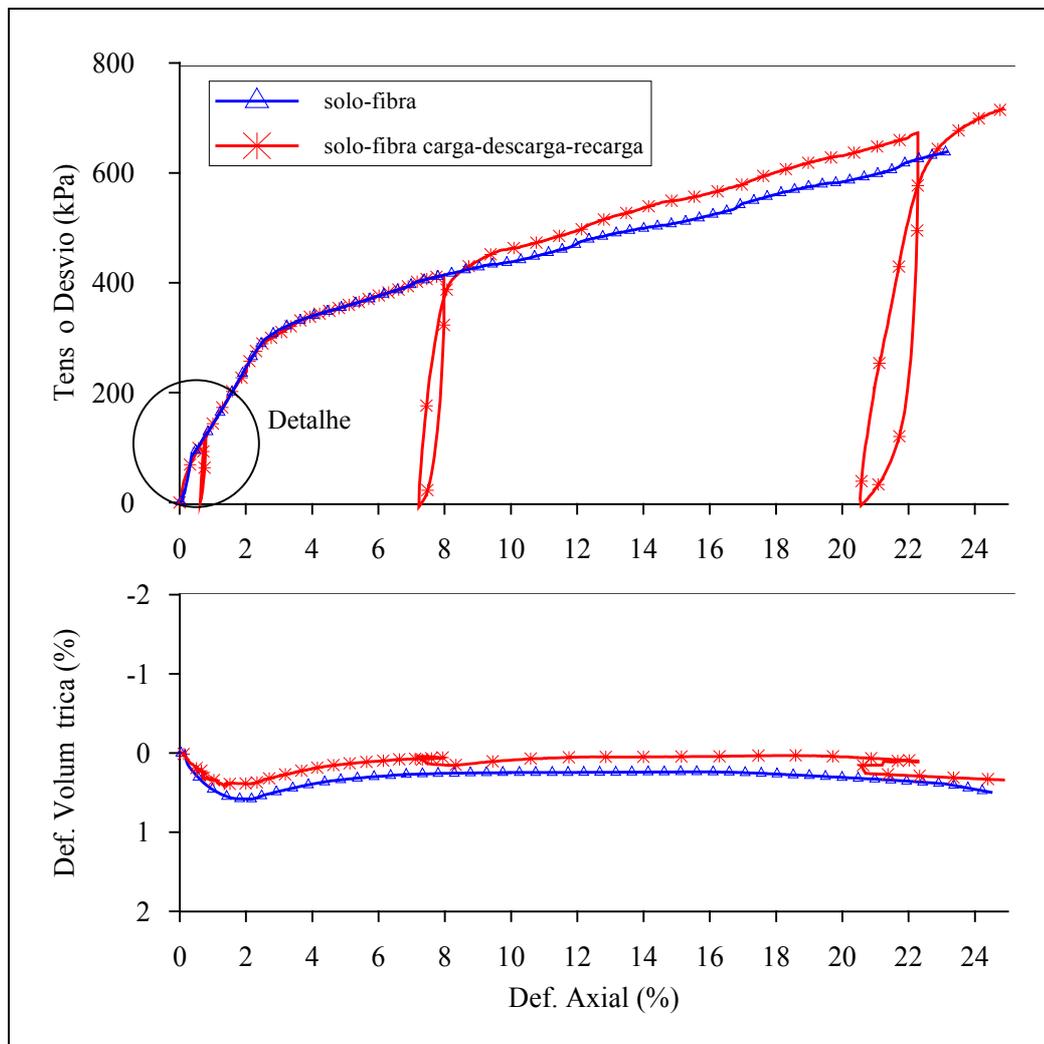


Figura 4.13 - Comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial para solo-fibra em ciclos de carga-descarga-recarga.

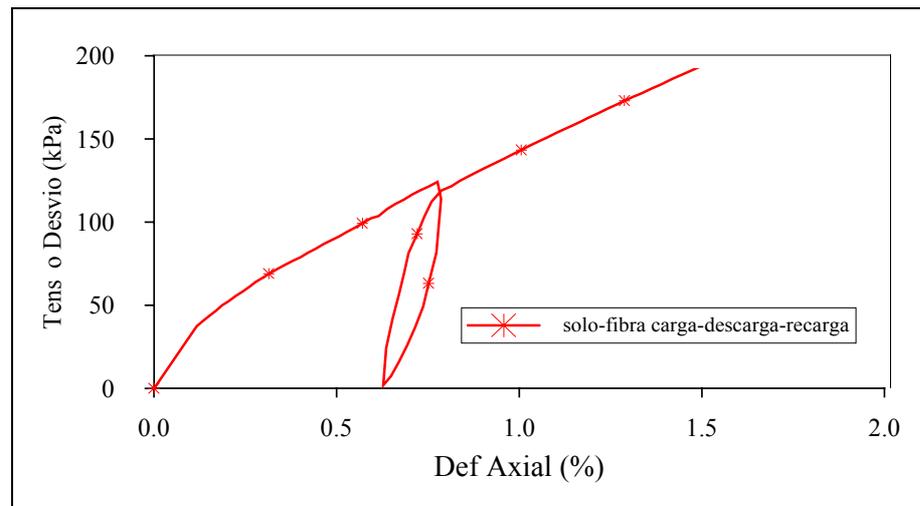


Figura 4.14 – Detalhe comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial para solo-fibra em ciclos de carga-descarga-recarga em 0,75% de deformação axial.

#### 4.3.4 Influência da Umidade e da Inclusão de Fibras

Na Figura 4.15 encontram-se os resultados de ensaios triaxiais para o solo residual de arenito compactado e para o mesmo reforçado com 0,5% de fibras de polipropileno de 24mm de comprimento, realizados ao longo de três pontos da curva de compactação (seco, ótimo e úmido), todos para uma mesma tensão de confinamento de 60kPa.

A resistência máxima atingida pela mistura ótima e úmida do solo se situa em torno de 200kPa. Já para o ramo seco, a curva se apresenta um pouco mais rígida a pequenas deformações, não atingindo o mesmo patamar de resistência do solo na umidade ótima e no ramo úmido. Entretanto, não se observam alterações significativas em termos de deformabilidade para os três resultados obtidos. Por outro lado, é nítido o aumento de resistência observado nas curvas tensão-deformação para o solo-fibra, onde as misturas ótima e úmida atingem aproximadamente 600kPa de resistência. Observa-se também uma menor resistência atingida pela curva correspondente ao ramo seco da curva de compactação e uma maior rigidez inicial do solo reforçado no ramo seco. O acréscimo de resistência é sempre crescente para o solo reforçado, independentemente do seu teor de umidade, mesmo a grandes deformações.

Percebe-se que, não havendo alterações em termos de deformação volumétrica e de resistência para as curvas do solo e do solo-fibra, submetidas a diferentes teores de umidade,

pode se considerar que a sua influência e do seu respectivo peso específico seco, tanto no solo como no solo reforçado, não é muito significativa.

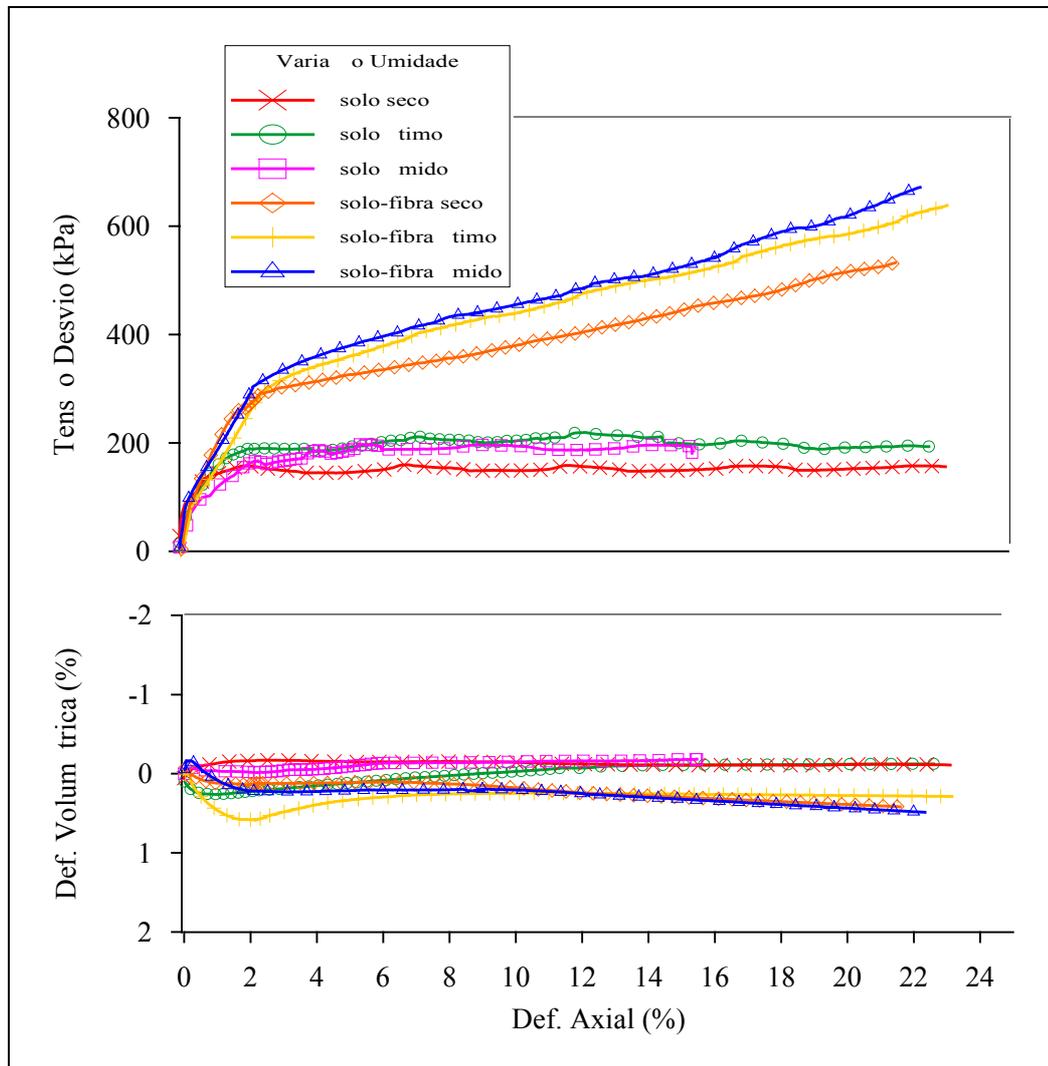


Figura 4.15 - Comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial em diferentes umidades ao longo da curva de compactação definida, para o solo residual de arenito compactado e solo-fibra.

#### 4.3.5 Efeito da Variação do Teor de Fibra

A influência do teor de fibra utilizado, estando as amostras na umidade ótima e submetidas à tensão de confinamento de 60kPa, é apresentada na Figura 4.16, onde foram utilizadas fibras de polipropileno de 24mm de comprimento nos teores de 0; 0,25; 0,5 e 0,75%.

Observa-se que a influência do teor de fibra no solo é significativa e o aumento de resistência ocorre numa mesma proporção, ou seja, ao se avaliar o acréscimo de resistência

relativo à 10% de deformação axial percebe-se um aumento de 100kPa com o acréscimo de 0,25% de fibra (do teor de 0,25 para 0,5%), e outro acréscimo de 100kPa com a inclusão de mais 0,25% de fibra (do teor de 0,5 para 0,75%), resultando em resistências de 350, 450 e 550kPa, respectivamente, para 0,25; 0,5 e 0,75% a 10% de deformação.

Com relação à deformação volumétrica o comportamento inicial é de compressão para todos os teores estudados, sendo esse comportamento mais acentuado para maiores teores de fibra.

Não existe, porém, tendência à existência de uma única taxa de acréscimo de tensão desvio em relação à deformação axial, para grandes deformações, como foi observado nos ensaios triaxiais executados com 0,5% de fibra de 24mm de comprimento (Figura 4.5). Fica em aberto uma discussão sobre a tendência da taxa de acréscimo da tensão desvio para mesmos teores de fibras com a variação da tensão confinante.

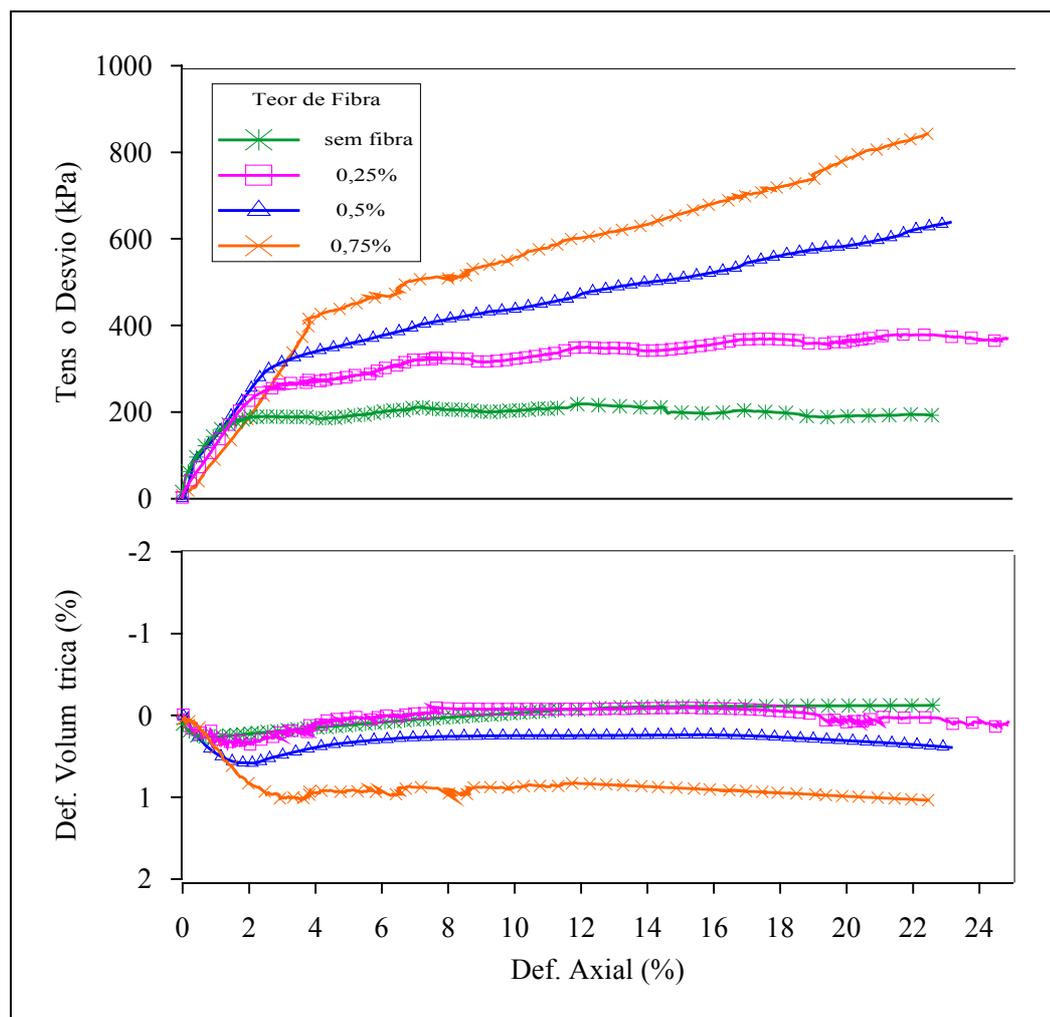


Figura 4.16 - Comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial com variação do teor de fibra.

#### 4.3.6 Efeito da Variação do Comprimento de Fibra

A influência do comprimento de fibra é apresentada na Figura 4.17, estando as amostras na umidade ótima e submetidas às tensões confinantes de 60 e 200kPa. Foram utilizados os comprimentos de 6, 12 e 24mm, todos para um teor de 0,5% de fibra.

Com relação ao comportamento tensão-deformação, observa-se uma influência significativa do comprimento de fibra a baixas tensões confinantes, sendo maior a resistência quanto maior for o comprimento das fibras. Porém, para altas tensões confinantes, o comportamento resistente do solo reforçado com fibras é praticamente inalterado quando se varia o comprimento destas. Isso provavelmente se deve ao fato de que a baixas tensões confinantes as fibras atuam individualmente, ou seja, quanto maior for o comprimento da fibra, mais resistência esta irá mobilizar, porém, quando as fibras são submetidas a altas tensões de confinamento elas atuam como um reforço único, onde o comprimento da fibra não influencia o comportamento resistente do solo reforçado. O comportamento deformação volumétrica-deformação axial apresenta-se inalterado para tensões confinantes baixas e torna-se mais compressivo com o aumento do comprimento das fibras, para maiores tensões de confinamento.

Observa-se também que a tendência à existência de uma única taxa de acréscimo de tensão desvio em relação à deformação axial, para grandes deformações, obtida para os ensaios realizados com 0,5% de fibra de 24mm de comprimento (Figura 4.5), não se aplica quando o teor de fibra se mantém fixo e o comprimento de fibra é variado, obtendo-se valores diferentes nas misturas de solo com fibras de 6 e 12mm, avaliando-se a influência da tensão confinante. Isso demonstra um mesmo comportamento resistente, ou seja, uma mesma mobilização das fibras com relação ao teor de 0,5% de fibra com 24mm de comprimento, fato este não válido para menores comprimentos de fibra estudados. Porém, esse aumento de angulação referente à variação do comprimento de fibra para a tensão confinante de 60kPa é visível, em aproximadamente 5°, isto é, a curva obtida para o comprimento de 6mm apresenta um comportamento similar ao do solo sem reforço e, aumentando-se o comprimento da fibra para 12mm a taxa de acréscimo de tensão desvio é de aproximadamente 5°, sendo de 10° a taxa de acréscimo de tensão desvio para 24mm de comprimento, como comentado nos itens anteriores.

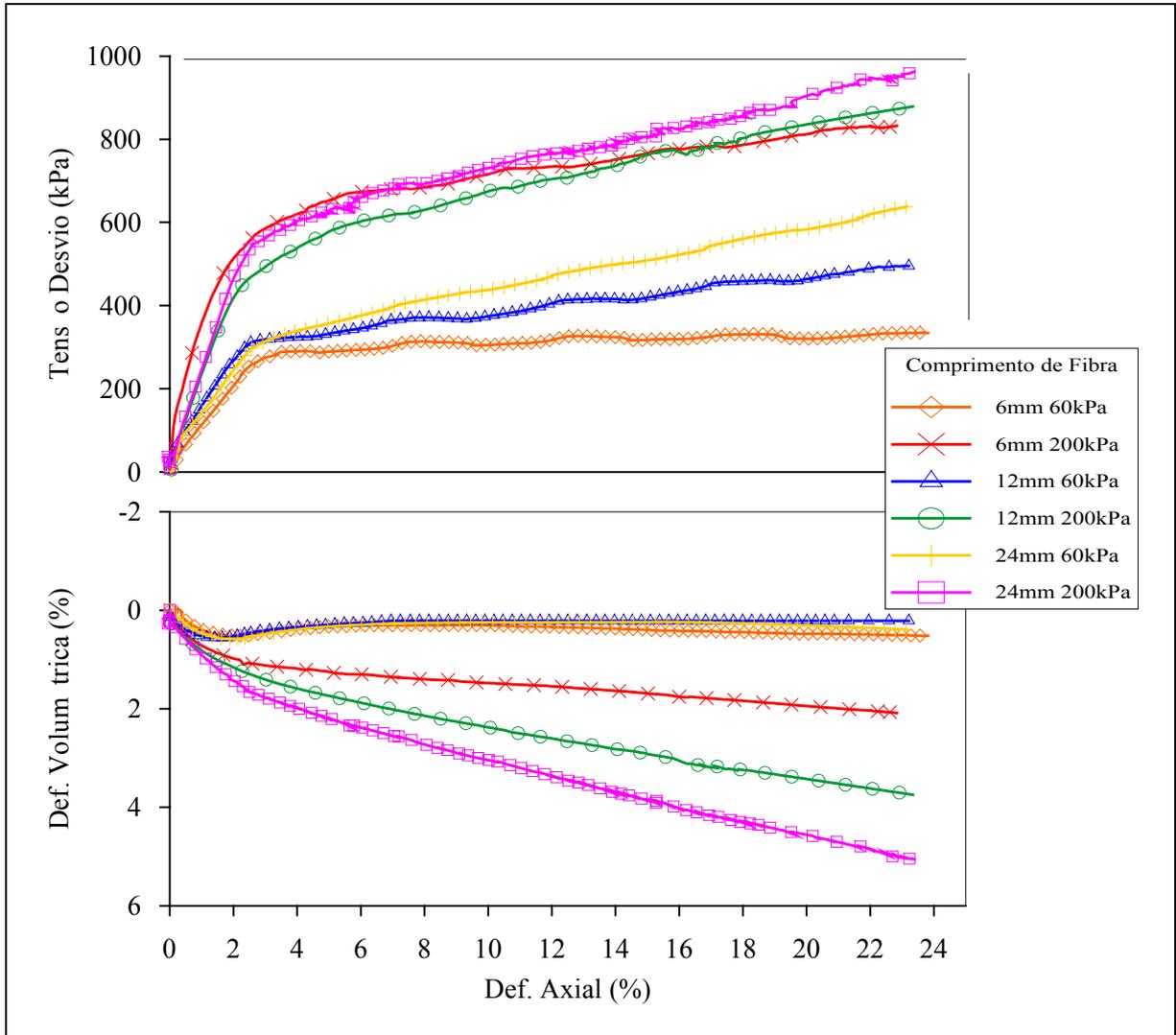


Figura 4.17 - Comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial com variação do comprimento de fibra.

#### 4.3.7 Efeito da Variação do Título da Fibra

A Figura 4.18 apresenta as curvas tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial para dois diferentes títulos de fibra (3,3 e 88 dtex) - correspondentes respectivamente aos diâmetros de 0,023 e 0,11mm, ambos com 0,5% de fibras de 24mm de comprimento, submetidos às tensões confinantes de 60 e 200kPa.

Com relação ao comportamento tensão-deformação, observa-se uma influência da variação do título da fibra a baixas tensões confinantes, sendo maior a resistência quanto menor for o título/diâmetro das fibras. Porém, para altas tensões confinantes, o

comportamento resistente do solo reforçado com fibras é praticamente inalterado quando se varia o título. A explicação para esse fato se baseia na mesma hipótese apresentada anteriormente com relação ao comprimento das fibras, ou seja, a baixas tensões confinantes o comportamento resistente é comandado pela influência das propriedades de cada fibra em particular, sendo que quando submetidas a altas tensões, as fibras apresentam um comportamento único, não interessando se o diâmetro é superior ou não. O comportamento deformação volumétrica-deformação axial apresenta-se inalterado quando se avalia a influência do título da fibra, mas o comportamento se torna mais compressivo a altas tensões confinantes, para ambos os títulos de fibras analisados.

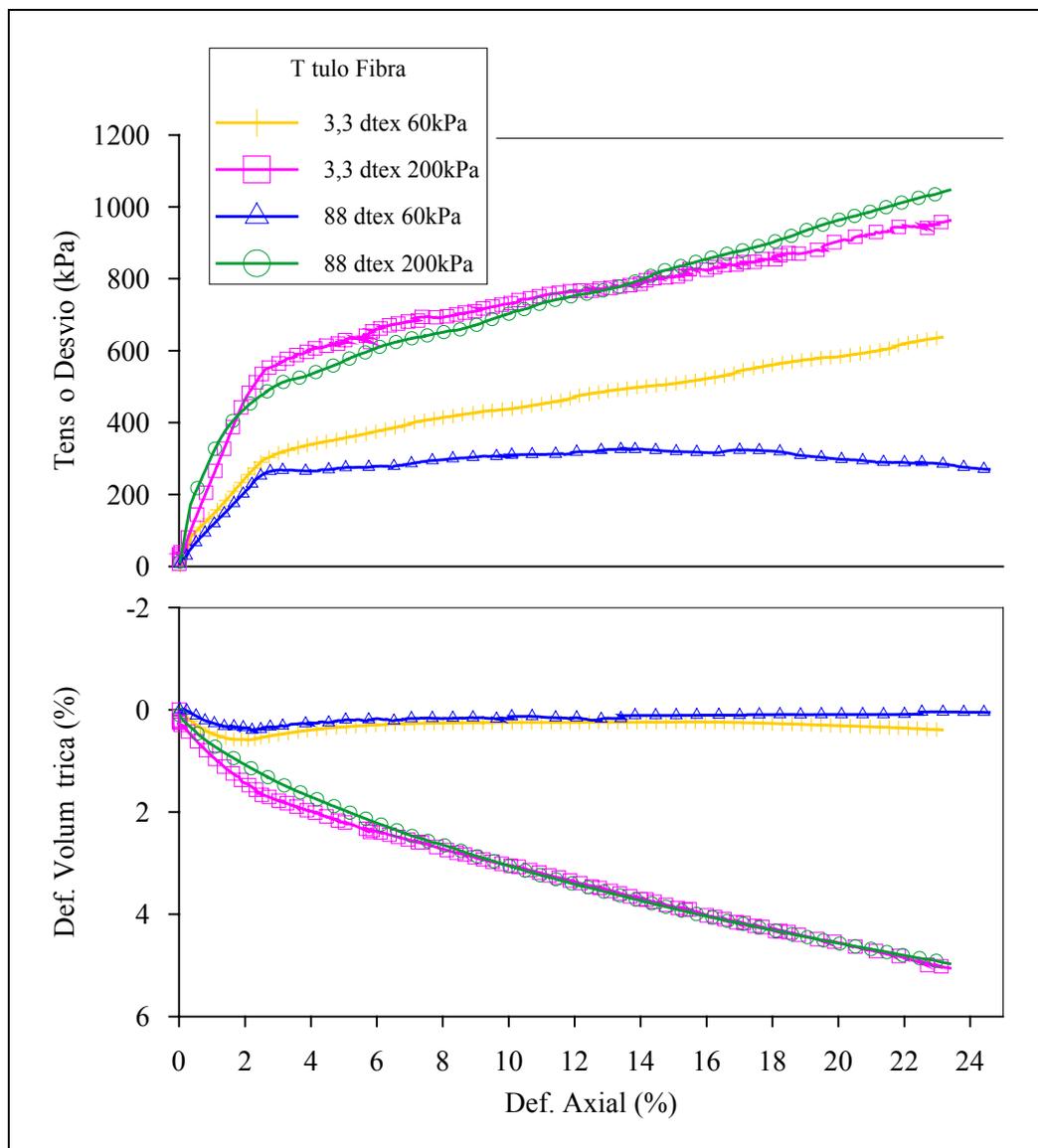


Figura 4.18 - Comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial com variação do título de fibra.

#### 4.4 ENSAIOS DE PLACA – COMPORTAMENTO CARGA-RECALQUE

Os resultados experimentais dos ensaios de placa são apresentados na forma de gráficos carga-recalque. Os ensaios realizados não atingiram a ruptura, pois a carga máxima foi limitada pelo peso da estrutura de reação. Entretanto, foram verificados grandes deslocamentos e surgimento de fissuras circulares junto à borda da placa. O monitoramento dos recalques na superfície da camada tratada ao lado da placa indicou recalque em todos os ensaios realizados.

As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam as curvas carga versus recalque obtidas para os ensaios utilizando placa de 0,30m de diâmetro apoiadas sobre as bases de 1,20m de espessura (uma razão de 4 entre a espessura do aterro de solo e de solo-fibra e o diâmetro da placa). São apresentadas duas curvas, uma referente ao solo residual de arenito compactado e outra referente ao solo compactado reforçado com fibras.

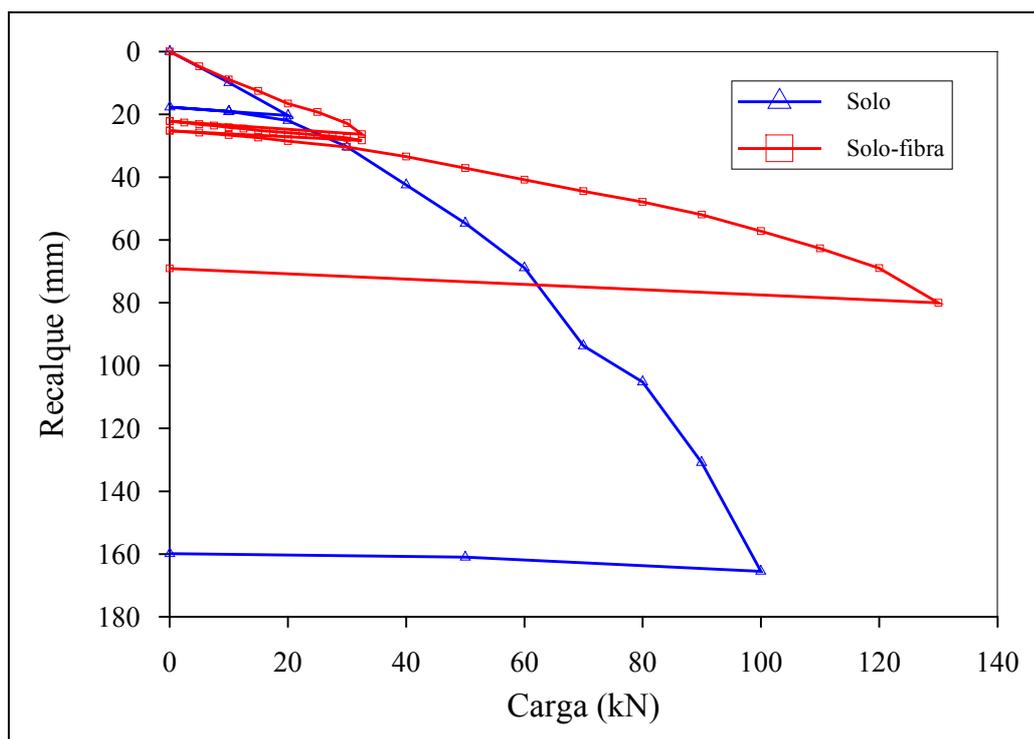


Figura 4.19 – Resultados dos ensaios de placa de 0,30m de diâmetro assentes sobre camadas de solo residual compactado e do solo-fibra.

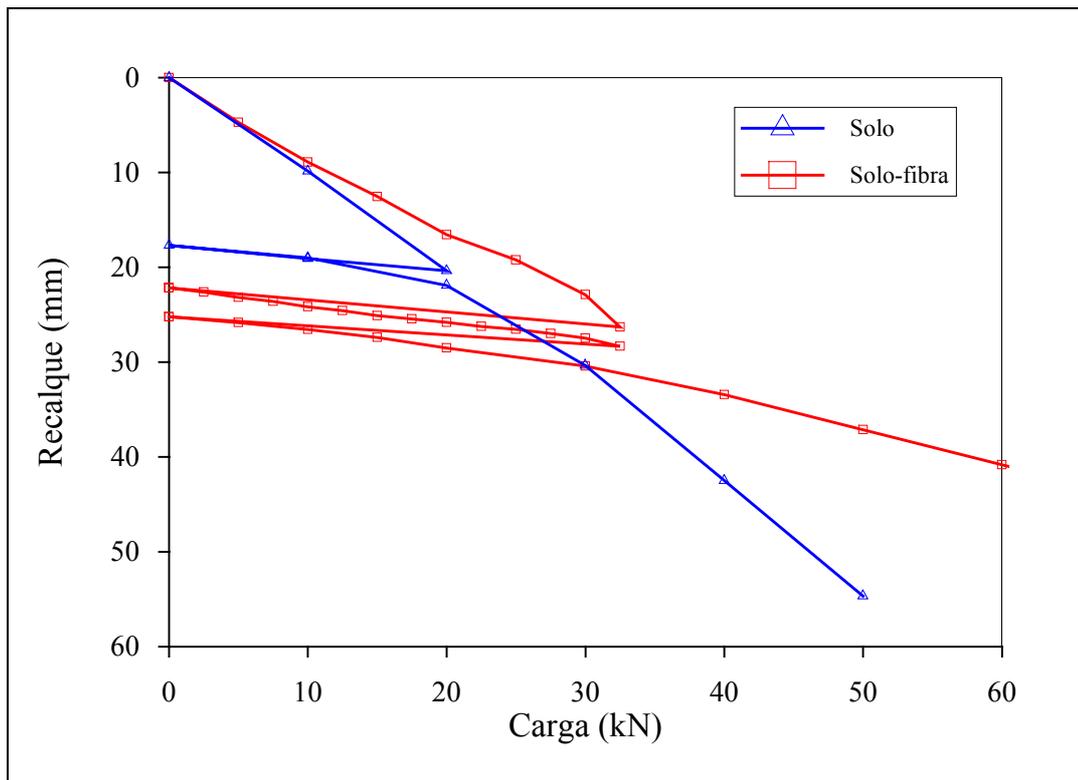


Figura 4.20 – Detalhe dos resultados dos ensaios de placa de 0,30m de diâmetro assentes sobre camadas de solo residual compactado e do solo-fibra.

Verifica-se, na Figura 4.19, uma redução significativa dos recalques do solo compactado reforçado quando comparado ao solo compactado, ou seja, o comportamento do solo reforçado se distingue por atingir o máximo valor de carga imposta (limitada pelo peso da estrutura de reação), a recalques menores. Observou-se a ocorrência de puncionamento na camada de solo compactado, fato esse não ocorrido na camada de solo-fibra. O solo compactado atingiu um recalque de 50mm submetido a uma carga de 50kN aproximadamente, enquanto que o solo-fibra atingiu o mesmo recalque quando submetido a uma carga superior a 100kN. O recalque total obtido para a camada de solo compactado atingiu 165,5mm para 100kN de carga, contra 80mm de recalque obtido para 130kN de carga para a camada de solo reforçado.

Na Figura 4.20 se observa que o solo reforçado apresenta uma maior rigidez no carregamento quando comparado ao solo compactado. O solo compactado foi carregado e descarregado a 20kN de carga aplicada, apresentando um comportamento predominantemente plástico na descarga, com pequena parcela elástica. Para o solo reforçado foram realizados dois ciclos de descarregamento e recarregamento a 30kN de carga aplicada, apresentando

comportamento basicamente plástico com pequena parcela elástica na descarga e elasto-plástico no recarregamento, com deformações permanentes irreversíveis. Um paralelismo entre as curvas de solo compactado e de solo-fibra é perceptível nos ciclos de descarregamento, apresentando valores aproximados de recalque recuperado.

A Figura 4.21 mostra a variação do módulo de elasticidade com a carga aplicada, de acordo com a formulação proposta por Poulos & Davis (1973), nos ensaios de placa para o solo residual compactado e o solo reforçado com fibras. O módulo foi calculado através dos valores de carga aplicados e respectivos recalques obtidos, sendo desprezados os ciclos de descarga e recarga. Observa-se que o módulo do solo compactado decresce e do solo reforçado cresce com a aplicação da carga. Esse fato se deve possivelmente à atuação das fibras em profundidade, pois o valor das tensões cresce com o aumento da aplicação de carga, aumentando também a taxa de deformação do solo reforçado, o que mobiliza um número maior de fibras (ação mais intensa a grandes deformações).

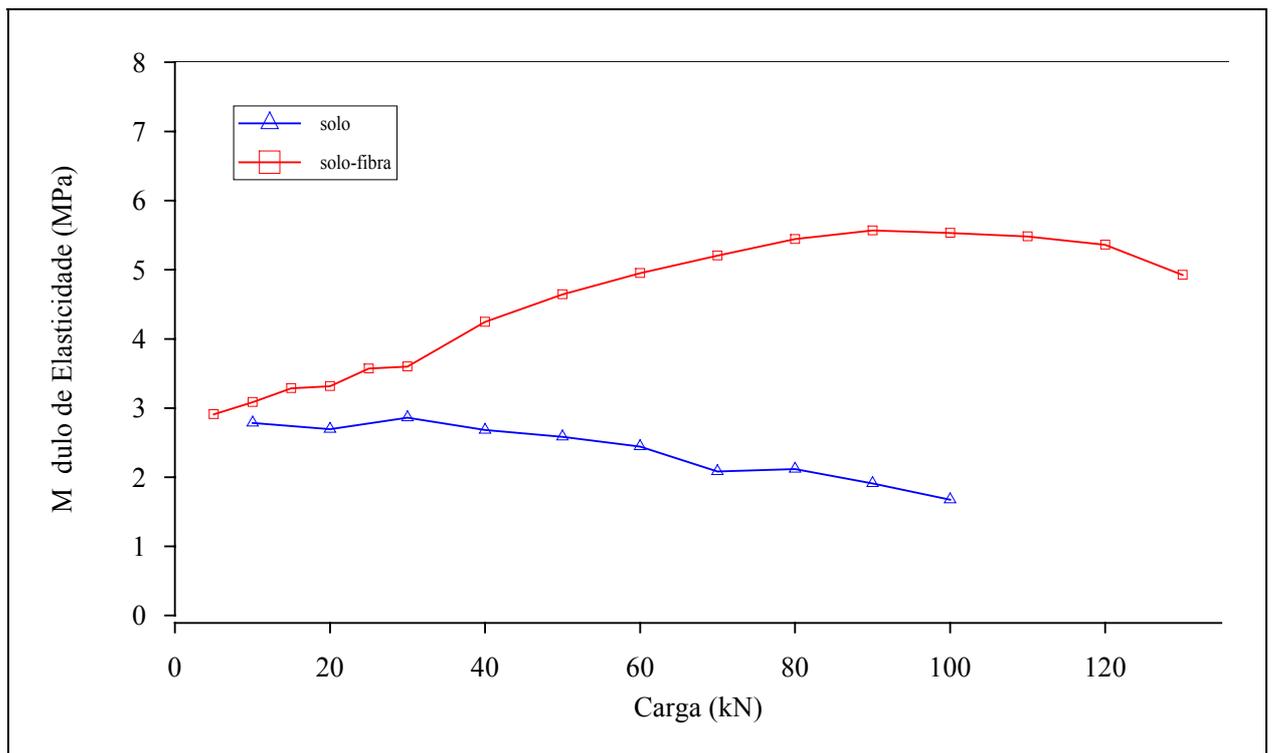


Figura 4.21 – Variação do módulo de elasticidade com a carga aplicada nos ensaios de placa para o solo residual compactado e para o solo reforçado.

#### 4.5 ENSAIOS TRIAXIAIS - COMPARAÇÃO CAMPO / LABORATÓRIO

Ensaio de compressão triaxial adensados drenados foram realizados sobre amostras obtidas no campo experimental com o objetivo de obter os parâmetros de resistência dos aterros executados. A Figura 4.22 mostra uma comparação das curvas tensão-deformação axial e deformação volumétrica-deformação axial entre os ensaios triaxiais realizados com amostras de campo e laboratório para o solo residual compactado e o mesmo reforçado com fibras, para a tensão confinante de 60kPa.

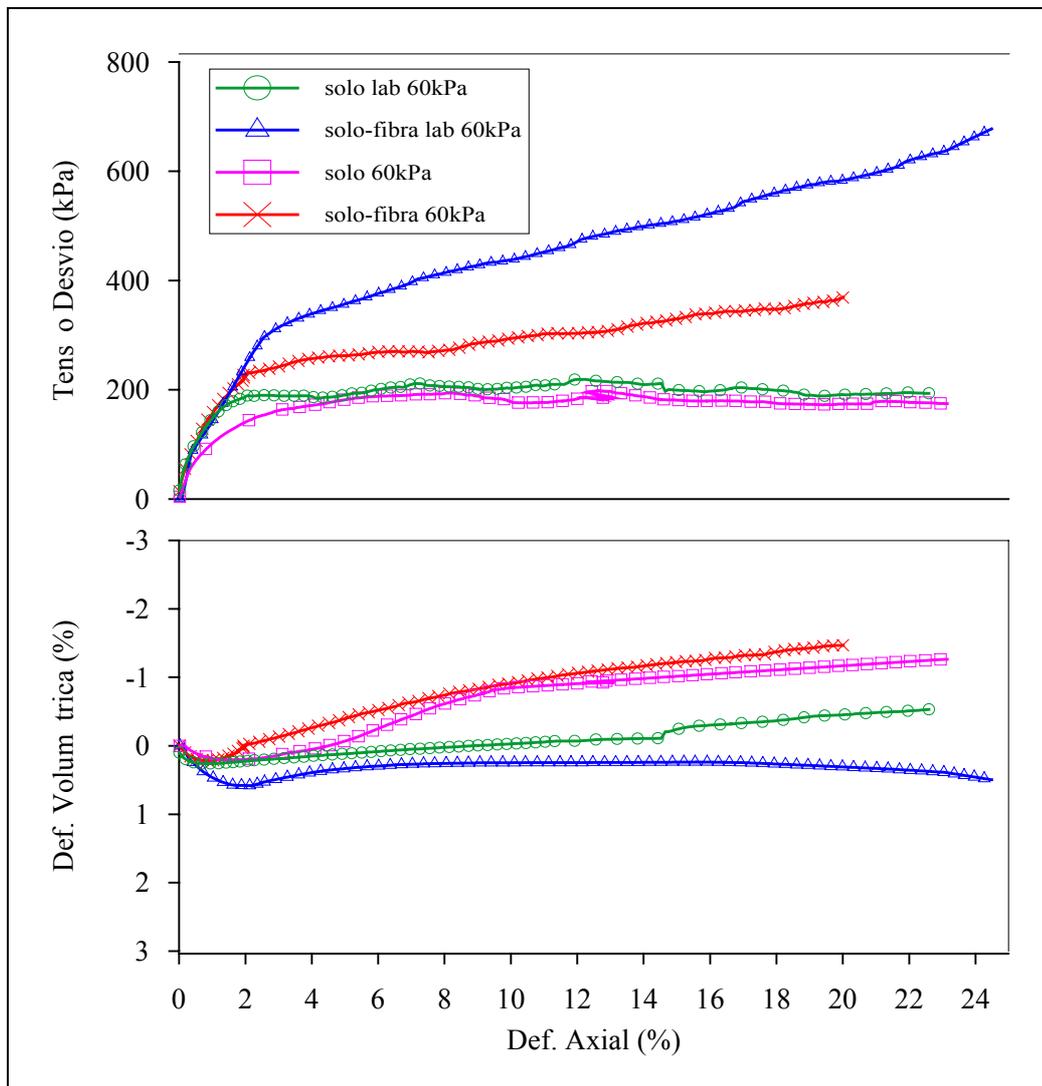


Figura 4.22 - Comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial para amostras de campo e de laboratório do solo compactado e do solo-fibra.

Para o solo compactado, a amostra de campo apresenta um comportamento tensão-deformação idêntico à amostra de laboratório, sendo que a amostra de campo apresenta um

comportamento deformação volumétrica-deformação axial de expansão após cerca de 2% de deformação axial.

Para o solo reforçado com fibras, o ensaio triaxial realizado com amostra de campo apresentou uma resistência inferior à amostra de laboratório apresentando uma tendência dilatante quando comparado com a amostra de laboratório, este fato pode ser devido à heterogeneidade da mistura de solo-fibra obtida em campo.

## **CAPÍTULO 5**

### **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

#### **5.1 SUMÁRIO E CONCLUSÕES**

A partir dos ensaios de laboratório e de campo em misturas solo-fibra executados nesta pesquisa e das análises destes resultados, foram estabelecidas algumas conclusões relatadas a seguir.

##### **5.1.1 Quanto aos Ensaios de Laboratório**

- As principais alterações provocadas pela inclusão aleatória de fibras de polipropileno ao solo residual de arenito compactado estão relacionadas às propriedades de deformabilidade e ao comportamento resistente da matriz para grandes deformações.
- Nas amostras de solo compactado observa-se um aumento de resistência com o aumento da tensão confinante. Para o solo reforçado se observa um crescimento constante de resistência com o aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elasto-plástico de enrijecimento.
- As fibras passam a contribuir de forma mais significativa para o acréscimo de resistência do material em aproximadamente 2,5% de deformação axial. Este acréscimo corresponde ao instante no qual passam a predominar as deformações plásticas na matriz não reforçada.
- O comportamento resistente do solo reforçado pode ser dividido em três etapas: uma etapa inicial, onde o comportamento é controlado basicamente pela matriz de solo, uma etapa intermediária, na qual o comportamento do material compósito é comandado

conjuntamente pela matriz e pelas fibras, e uma etapa final, onde o comportamento do material é comandado essencialmente pelas fibras.

- Observa-se, para grandes deformações, um paralelismo entre as curvas tensão-deformação para as misturas com 0,5% de fibras de 24mm de comprimento, para todas as tensões confinantes estudadas, como também a existência de uma única taxa de acréscimo de tensão desvio em relação à deformação axial, a partir do momento em que as fibras são mobilizadas.
- A adição de fibras provocou um grande aumento na coesão do material, mantendo seu ângulo de atrito praticamente inalterado. As fibras proporcionam um emaranhado que envolve e “vincula” os grãos do solo, promovendo um efeito de ancoragem, que se traduz no aumento da coesão do solo residual.
- Com o aumento da deformação axial de 10% para 20%, o ângulo de atrito interno do solo reforçado permanece inalterado, havendo um aumento de 46% na coesão efetiva do mesmo. Isso reforça a hipótese de que as fibras concedem maior resistência ao solo e apresentam uma maior mobilização quanto maior for a deformação imposta ao material reforçado.
- O módulo secante cresce com o aumento das tensões confinantes tanto para o solo quanto para o solo-fibra. A adição de fibras de polipropileno provoca uma redução do módulo secante do solo residual de arenito.
- A energia de deformação absorvida aumenta com a inclusão de fibras ao solo compactado, majorando a tenacidade do mesmo, principalmente para baixas tensões de confinamento.
- A mudança da velocidade de carregamento nos ensaios triaxiais adensados drenados não afeta os parâmetros de resistência e deformabilidade do solo reforçado para os níveis de velocidade estudados. Os resultados obtidos não podem ser considerados definitivos pelo fato das fibras de polipropileno poderem apresentar características de fluência quando submetidas a ensaios mais lentos, o que não foi estudado nessa pesquisa.
- Ciclos de carga, descarga e recarga não influenciaram o comportamento tensão-deformação do solo reforçado. O mesmo pode ser dito com relação à deformação volumétrica. O comportamento de carga-descarga-recarga relativo aos ciclos realizados é predominantemente plástico na descarga, com grandes deformações irreversíveis,

apresentando uma pequena parcela elástica. No ciclo descarga-recarga pode ser verificado um certo nível de histerese, devido provavelmente à energia elástica armazenada nas partículas, correspondente a uma maior rigidez no processo de recarregamento do solo reforçado.

- A influência da variação da umidade e do respectivo peso específico seco, tanto para o solo como para o solo reforçado, não é muito significativa. O acréscimo de resistência para o solo reforçado é sempre crescente mesmo a grandes deformações, não sendo observadas alterações significativas em termos de deformabilidade. A resistência atingida para o ramo seco da curva de compactação é menor, apresentando uma maior rigidez inicial.
- O aumento do teor de fibra no solo aumenta a sua resistência. Cada curva apresenta uma taxa de acréscimo de tensão desvio própria, ficando em aberto a discussão sobre a tendência dessa taxa para mesmos teores de fibra com a variação da tensão confinante. Com relação à deformação volumétrica, o comportamento inicial é de contração para todos os teores estudados, sendo esse comportamento mais acentuado para maiores teores de fibra.
- A influência do comprimento de fibra é verificada a baixas tensões confinantes, sendo maior a resistência quanto maior for o comprimento das fibras. Porém, para altas tensões confinantes, o comportamento resistente do solo reforçado com fibras é praticamente inalterado. O comportamento deformação volumétrica-deformação axial apresenta-se inalterado para tensões confinantes baixas e torna-se mais compressivo com o aumento do comprimento das fibras, para maiores tensões de confinamento. A tendência à existência de uma única taxa de acréscimo de tensão desvio em relação à deformação axial, para grandes deformações, não se aplica quando o comprimento é variado, avaliando-se a influência da tensão confinante.
- A influência da variação do título da fibra é verificada a baixas tensões confinantes, sendo maior a resistência quanto menor for o título/diâmetro das fibras. Para altas tensões confinantes o comportamento resistente do solo reforçado com fibras é praticamente inalterado quando se varia o título. O comportamento deformação volumétrica-deformação axial apresenta-se inalterado, mas observa-se uma tendência compressiva a altas tensões confinantes, para ambos os títulos de fibras analisados.

### 5.1.2 Quanto aos Ensaio de Campo

- Os ensaios realizados não atingiram a ruptura, pois a carga máxima foi limitada pelo peso da estrutura de reação. Entretanto, foram verificados grandes deslocamentos e surgimento de fissuras circulares junto à borda da placa.
- O monitoramento dos recalques na superfície da camada tratada ao lado da placa indicou recalque em todos os ensaios realizados. Observou-se a ocorrência de puncionamento na camada de solo compactado, fato esse não ocorrido na camada de solo-fibra.
- Nas curvas carga-recalque se verifica uma redução significativa dos recalques do solo compactado reforçado quando comparado ao solo compactado, ou seja, o comportamento do solo reforçado se distingue por atingir o máximo valor de carga imposta (limitada pelo peso da estrutura de reação), a recalques menores. O solo reforçado apresenta uma maior rigidez no carregamento quando comparado ao solo compactado.
- Observa-se para os ciclos de carga-descarga-recarga, que o solo compactado apresenta um comportamento predominantemente plástico na descarga, com pequena parcela elástica. Para o solo reforçado foram realizados dois ciclos de descarregamento e recarregamento, onde se observa um comportamento basicamente plástico com pequena parcela elástica na descarga e elasto-plástico no recarregamento, com deformações permanentes irreversíveis. Um paralelismo entre as curvas de solo compactado e de solo-fibra é perceptível nos ciclos de descarregamento, apresentando valores aproximados de recalque recuperado.
- O módulo de elasticidade do solo compactado decresce e do solo reforçado cresce com a aplicação da carga. Esse fato se deve possivelmente a uma melhor atuação das fibras em profundidade, pois o valor das tensões cresce com o aumento da aplicação de carga, aumentando também a taxa de deformação do solo reforçado, o que mobiliza um número maior de fibras, que atuam de forma mais intensa a grandes deformações.
- Nos ensaios triaxiais adensados drenados, a amostra de campo relativa ao solo compactado apresentou um comportamento tensão-deformação idêntico à amostra de laboratório, sendo que a amostra de campo apresenta um comportamento deformação volumétrica-deformação axial de expansão após cerca de 2% de deformação axial.

- Para o solo reforçado com fibras, o ensaio triaxial realizado com amostra de campo apresentou uma resistência inferior à amostra de laboratório, apresentando uma tendência dilatante, este fato pode ser devido à heterogeneidade da mistura de solo-fibra obtida em campo.

## 5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Durante um estudo de mestrado, doutorado ou qualquer outro trabalho de pesquisa sempre se procura aprofundar um determinado assunto. Porém, durante esse processo, a percepção que se tem do problema se modifica e se revelam novas alternativas que até então não haviam surgido. Muitas possibilidades acabam sendo deixadas para trás por não terem sido contempladas no cronograma inicial, por motivos de falha ou pela falta de tempo. Ficam então algumas sugestões para a ampliação do conhecimento e o prosseguimento dos estudos sobre o reforço de solos com fibras:

- Verificar o efeito da fluência das fibras de polipropileno a altas tensões permanentes quando submetidas a ensaios lentos;
- Avaliar a influência da tensão confinante para diferentes teores e tipos de fibras;
- Desenvolver modelos constitutivos em códigos numéricos (programas embasados no método dos elementos finitos) para misturas de solo-fibra, o que é de fundamental importância para a simulação de obras geotécnicas, em especial aterros sobre solos moles e cobertura de aterros sanitários;
- Realizar estudos com a utilização de fibras em concreto compactado a rolo, prevendo a simulação de obras geotécnicas, como barragens e pavimentos rígidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL WAHAB, R.M.; AL-QURNA, H.H. Fiber Reinforced cohesive soils for application in compacted earth structures. GEOSYNTHETICS '95 CONFERENCE. 1995, Nashville. **Proceedings ...** v.2,p.433-466.
- AL WAHAB, R.M.; HENCKEL, G.B.; AL-QURNA, H.H. Total and effective strength parameters of compacted fiber reinforced soils. 1996, p.423-426.
- AL WAHAB, R.M.; EL-KEDRAH, M.A. Using fibers to reduce tension cracks and shrink/swell in a compacted clay. **GEOENVIRONMENT 2000: Characterization, Containment, Remediation and Performed in Environmental Geotechnics**, Louisiana, Geotechnical Special Publication, ASTM, 2v, v.1, n.46, p.791-805, 1995.
- ANDERSLAND, O.B.; KATTAK, A.S. Shear strength of Kaolinite/fiber soil mixtures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL REINFORCEMENT, 1979, Paris. **Proceedings ...** 1979. p.11-16.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6489**: Prova de carga direta sobre o terreno da fundação. Rio de Janeiro, 1984d. 2p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 1986. 61p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostra de solo – preparação para ensaio de compactação e ensaios de caracterização Rio de Janeiro, 1986a. 2p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986c. 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB 3472**: Estaca – Prova de carga estática. 1991.

- AVERBECK, J.H.C. **O cone elétrico e sua aplicação no estudo de fundações em solos coesivos friccionais**. Porto Alegre, 1996. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.
- BISHOP, A.W.; HENCKEL, D.J. The measurements of soil properties in triaxial test. 2ed., London: Edward Arnold, 1962, 277p.
- BUDINSKI, K.G. **Engineering Materials**; properties and selection. New Jersey: Prentice Hall International., 5ed, 1996. 653p.
- BUENO, B.S.; LIMA, D.C.; TEIXEIRA, S.H.C.; RIBEIRO N.J. Soil fiber reinforcement: basic understanding. In: International Symposium, on Environmental Geotechnology, 3., 1996 San Diego. **Anais ...** v1., p.878-884.
- CASAGRANDE, A. The determination of the preconsolidation load and its practical significance. In:INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERINGS, 1., 1936, Cambridge. **Proceedings...** London: 1936. v.3, p.60.
- CONSOLI, N.C.; ULBRICH, L.A.; PRIETTO, P.D.M. Engineering behavior of random distributed fiber-reinforced cement soil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RECENT DEVELOPMENTS IN SOIL AND PAVEMENT MECHANICS, 1997, Rio de Janeiro. **Proceedings ...** Rotterdam: A. A. Balkema, 1997. p.481-486.
- CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M.; ULBRICH, L.A. Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, v.124. n.12, p.1211-1214, 1998-a.
- CONSOLI, N.C.; SCHNAID, F.; THOMÉ, A.; VENDRUSCOLO, M.A.; SALES, L.F.P. Interpretação de provas de carga de fundações superficiais assentes em camadas de solo-cimento. **Solos e Rochas ...** São Paulo: ABMS/AABGE, v.21, n.1, 1998-b.
- CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M.; ULBRICH, L.A. The behavior of a fiber-reinforced cement soil. **Ground Improvement**, ISSMGE, v.3 n.3, p.21-30, 1999.
- CONSOLI, N.C.; VENDRUSCOLO, M.A.; PRIETTO, P.D.M. Behavior of plate load tests on soil layers improved with cement and fiber, 2001 [Submetido ao **Journal of Geotechnical and Environmental Engineering**, ASCE].

- CUDMANI, R.O. **Estudo do comportamento de sapatas assentes em solos residuais parcialmente saturados através de ensaios de placa.** Porto Alegre, 1994. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.
- DESAI, C.S.; CHRISTIAN, J.T. **Numerical methods in geotechnical engineering.** New York: Mc Graw Hill, 1977. 783p.
- DIAS, R.D. **Aplicação da pedologia e geotecnia no projeto de fundações de linhas de transmissão.** Rio de Janeiro, 1987. 349p. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ.
- FEUERHEMEL, M.R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno.** Porto Alegre, 2000. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS.
- FATANI, M.N.; BAUER, G.E.; AL-JOULLANI, N. Reinforced soil with ligned and randomly oriented mettalic fibers. **Geotechnical Testing Journal**, Philadelphia, v.14, n.1, p.78-87, 1991.
- FREITAG, D.R. Soil randomly reinforced with fibers. **Journal of Geotechnical Engineering**. New York, v.112, n.8, p.823-826, 1986.
- GRAY, D.H.; AL-REFEAI, T. Behavior of fabric versus fiber-reinforced sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v.112, n.8, p.804-820, 1986.
- GRAY, D.; OHASHI, H. Mechanics of fiber reinforced in sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v.109, n.3, p.335-353, 1983.
- HANNANT, L. Fiber-reinforced cements and concretes. In: J. M. ILLSTON. **Construction Materials; their nature and behavior.** 2ed. London: J. M. Illston/E & FN Spon, 1994. p.359-403.
- HIGGINS, R.A. **Properties of engineering materials.** London: E. Arnold, 2ed., 1994. 495p.
- HILF, J.W. Compacted fill. In: H. F. WINTERKORN; H. FANG. **Foundation Engineering Handbook.** New York: Var Nostrand Reinhold, 1975. p. 244-311.
- HILMER, K. Ground Improvement by soil replacement. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 8., 1983, Helsinki. **Proceedings ...** Rotterdam: A. A. Balkema, 1983, v.1, p.37-43.

- HOARE, D.J. Laboratory study of granular soils reinforced with randomly oriented discrete fibres. Int: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL REINFORCEMENT. Paris, 1979. **Proceedings ...** 1979. v.1, p.47-52.
- HOLLAWAY, L. Polymers and polymer composites. In: J. M. ILLSTON. **Construction Materials; their nature and behavior**. London: J. M. Illston/E & FN Spon, 2ed., 1994. p.321-358.
- ILLSTON, J.M. [Ed]. **Construction Materials; their nature and behavior**. London: E & FN Spon, 2ed., 1994. 518p.
- INGLES, O.G.; METCALF, J.B. **Soil stabilization principles and practice**. Melbourne: Butterworks, 1972. 374p.
- JOHNSTON, C.D. Fiber-reinforced cement and concrete. In: V. M. MALHORTA. **Advances in concrete technology**. 2ed. Ottawa: V. M. Malhorta, 1994. p.603-673.
- LAMBE, T.; WHITMAN, R.V. **Soils Mechanics**, SI version. New York: John Willey & Sons Inc, 1979. 553p.
- LEMOS, R.C. **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul**. Recife: Departamento nacional de pesquisa agropecuária, Divisão de pesquisa Pedológica (Boletim Técnico). 1973.
- LIMA, D.C.; BUENO, B.S.; TOMASI, L. The mechanical response of soil-lime mixtures reinforced with short syntetic fiber. In: International Symposium on Environmental Geotechnology, 3., San Diego, 1996. **Proceedings ...** v.1. p.868-877.
- LUZZARDI, F.; MILITITSKY, J. **Provas de carga em fundações superficiais assentes em solos residuais parcialmente saturados**. Porto Alegre, 1987. CPGEC/UFRGS.
- MAHER, M.H.; GRAY, D.H. Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers. **Journal of Geotechnical Engineering**, v.116, n.11, p.1661-1677, 1990.
- MAHER, M.H.; HO, Y.C. Behavior of fiber-reinforced cement sand under static and cyclic loads. **Geotechnical Testing Journal**, v.16, n.3, p.330-338, 1993.
- MAHER, M.H.; HO, Y.C. Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite. **Journal of Geotechnical Engineering**, v.120, n.8, p.1387-1393, 1994.

- MAHER, M.H.; WOODS, R.D. Dynamic response of sand reinforced with randomly distributed fibers. **Journal of Geotechnical Engineering**, v.116, n.7, p.1116-1131, 1990.
- MÁNTARAS, F.M. **Análise numérica do ensaio pressiométrico aplicada à previsão do recalque de fundações superficiais em solos não saturados**. Porto Alegre, 1995. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.
- MATOS, L.F.S. **Pesquisa experimental da resistência ao arrancamento de estacas escavadas de pequeno diâmetro num solo parcialmente saturado**. Porto Alegre, 1989. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia).
- MARSLAND, A.; EASON, B.J. Measurements of displacement in the ground below loaded plates in deep boreholes. In: BRITISH GEOTECHNICAL SOCIETY SYMPOSIUM ON FIELD INSTRUMENTATION, 1973, Butterworths. **Proceedings ...** 1973. p.304-317.
- McGOWN, A.; ANDRAWES, K.Z.; AL-HASANI, M.M. Effect of inclusion properties on the behavior of sand. **Géotechnique**, London, v.28, n.3, 1978. p.327-346.
- McGOWN, A.; ANDRAWES, K.Z.; HYTIRIS, N.; MERCER, F.B. Soil strengthening using randomly distributed mesh elements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. 11., San Francisco, 1988. **Proceedings ...** v.3, p.1735-1738.
- MELLIOS, G.A. Provas de carga em solos porosos. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS, 1985, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: ABMS/ABEF, 1985. v.2, p.73-102.
- MESKRAITIS, P.R.C. **Comportamento de microestacas**. Porto Alegre, 1988. 176p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.
- MITCHELL, J.K.; KATTI, R.K. Soil improvement. State-of-the-art report. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. 10., 1981, Stockholm. **Proceedings ...**Rotterdam: A. A. Balkema, 1981. v.4, p.261-317.
- MONTARDO, J.P. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. Porto Alegre, 1999. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.

- MONTARDO, J.P.; PRIETTO, P.D.M.; CONSOLI, N.C. Comportamento de um solo reforçado com resíduos fibrosos. In: II SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL – GEOSUL'2000, .Porto Alegre. **Anais ...** Porto Alegre: ABMS/ABINT/PPGEC-UFRGS, p.213-225.
- MOREL, J.C.; GOURC, J.P. Mechanical behavior of sand reinforced with mesh elements. **Geosynthetics International**, Minnesota, v.4, n.5, p.481-508, 1997.
- MURRAY, J.J.; FROST, J.D.; WANG, Y. Behavior of a sandy silt reinforced with discontinuous recycled fiber inclusions. In: PROC. OF THE 79<sup>TH</sup> ANNUAL MEETING TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2000, Washington. 29p.
- NAKAHARA, S.M. **Determinação de propriedades de um solo não saturado através de ensaios pressiométricos e de laboratório**. Porto Alegre, 1995. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.
- NATARAJ, M.S.; ADDULA, H.R.; McMANIS, K.L. Strength and deformations characteristics of fiber reinforced soils. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIROMENTAL GEOTECHNOLOGY, 3., San Diego, 1996. **Proceedings...** Pennsylvania: Technomic Publishing Co., Inc, 1996. v.1, p.826-835.
- NÚÑEZ, W.P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação**. Porto Alegre, 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS, 150P.
- OMINE, K.; OCHIAI, H.; YASUFUKU, N.; KATO, T. Effect of plastic wastes in improving cement-treated soils. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY. **Proceedings ...** Rotterdam: Balkema, 1996. p.875-880.
- PACHECO E SILVA, F. Uma nova construção gráfica para determinação de pr=e- adensamento de uma amostra de solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E FUNDAÇÕES, 4., 1970, Rio de Janeiro. **Anais ...** Rio de Janeiro: ABMS, 1970. v.1, p.225-232.
- PALMEIRA, E.M. Geossintéticos: tipos e evolução nos últimos anos. In: SEMINÁRIO SOBRE APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS EM GEOTECNIA. **Geossintéticos 92 ...** Brasília: 1992. p.1-20.

- PALMEIRA, E.M. Evolução dos Geossintéticos no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS, 2., 1995. **Geossintéticos 95 ...** Palestras Especiais, 1995. p.5-15.
- PELLS, P.J.N. Plate loading tests on soil and rock. In: EXTENSION COURSE ON IN-SITU TESTING FOR GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS, 1983, Sydney. **Proceedings ...** Rotterdam: A. A. Balkema, 1983, p.73-85.
- POULOS, H.G.; DAVIS, E.H. **Elastic solutions for soil and rock mechanics**. New York. John Wiley & Sons, Inc. 1974. 411p.
- PREZZI, M. **Ensaio de penetração tipo cone (CPT) na região metropolitana de Porto Alegre**, 1990. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.
- PRIETTO, P.D.M. **Estudo do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado**. Porto Alegre, 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS. 150p.
- PRIETTO, P.D.M.; SCHNAID, F.; CONSOLI, N.C. Aspectos do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado. **Solos e Rochas**, São Paulo, v.20, n.3, p.145-166, 1997.
- RAMIRES, M.P. **Estudo do comportamento a compressão de estacas escavadas de pequeno diâmetro em solo parcialmente saturado**. Porto Alegre, 1993. 119p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.
- RANJAN, G.R.; CHARAN, H.D. Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil. **Journal of Geotechnical Engineering**, v.122, n.6, p.419-426, 1996.
- ROBERTSON, P.K. In situ testing and its application to foundation engineering. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, v.23, p.537-588, 1986.
- ROHLFES JR, J.A. **Estudo do comportamento de um solo residual melhorado através de técnicas mecânicas e físico-químicas e sua aplicação em análises de fundações superficiais**. Porto Alegre, 1996. 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.

- SALES, L.F.P. **Estudo do comportamento de fundações superficiais assentes em solos tratados**. Porto Alegre, 1998. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.
- SCHAEFER, V.R.; SHARP, K.D.; DRUMHELLER, C.; ABRAMSON, L.W. Ground Improvement, Ground Reinforcement and Ground Treatment: Developments 1987-1997. Geotechnical Special Publication. ASCE, 1997. N.69. Cap.2.11: Fiber reinforced soils, p.273-291.
- SHEWBRIDGE, E.; SITAR, N. Deformation characteristics of reinforced sand in direct shear. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v.115, n.8, p.1134-1147, 1989.
- SILVA, M.A.; BUENO, B.S.; LIMA, D.C. Estabilização de solos com inclusões curtas aleatórias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS, 2., São Paulo, 1995. **Geossintéticos 95 ...** p.327-335.
- SKEMPTON, A.W. The pore-pressure coefficients A and B. **Géotechnique**, London, v.4, p.143-147, 1954.
- SOARES, J.M.D., BICA, A.V.D.; BRESSANI, L.A.; MARTINS, F.B. Medição local de deformações utilizando sensores de efeito Hall. **Solos e Rochas**, São Paulo, v.17, n.3, p.183-188, dez. 1994.
- SPECHT, L.P. **Comportamento de misturas de solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando à pavimentação**. Porto Alegre, 2000. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS.
- STAUFFER, S.D.; HOLTZ R.D. Stress-strain and strength behavior of staple fiber and continuous filament-reinforced sand. Transportation Research Record, Washington, D.C., n.1474, p.82-95, 1996.
- TAYLOR, G.D. **Materials in Construction**. London: Longman Scientific & Technical, 2ed, 1994. 284p.
- TEODORO, J.M. **Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas**. São Carlos, 1999. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – EESC/USP.

- TEODORO, J.M.; BUENO, B.S. Estudo do comportamento dos solos reforçados com fibras plásticas de polipropileno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., Brasília, 1998. **Anais ...** v.2, p.1093-1100.
- TERZAGHI, K. **Theoretical soil mechanics**. New York: John Willey, 1967. 722p.
- TESSARI, M.A. **Ensaio de placas em camadas de cinza pesada de carvão tratadas com cimento**. Porto Alegre, 1998. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.
- THOMÉ, A. **Comportamento de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais**. Porto Alegre, 1999. Tese (D. Sc, Engenharia) – PPGEC/UFRGS. 245p.
- ULBRICH, L.A. **Aspectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras**. Porto Alegre, 1997. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.
- VAN IMPE, W.F.V. **Soil improvement techniques and their evolution**. Rotterdam, A.A. Balkema, 1989. 125p.
- VENDRUSCOLO, M. **Estudo do comportamento de fundações superficiais em solo melhorado mediante ensaios de placa**. Porto Alegre, 1996. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.
- VIDAL, H. **The principle of reinforced earth**. Highway Research Record. Washington, D. C., NCR-HRB n.282. 1969. p.01-16.
- WOOD, D.M. On stress parameters. **Géotechnique**, London, v.34, n.2, p.282-287, 1984.