

PAULO ROBERTO RESCHETTI JUNIOR

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM
SOLO ARENOSO FINO LATERÍTICO REFORÇADO COM
FIBRAS PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil – Área de concentração: Transportes.

Orientador: Prof. Titular Alexandre Benetti Parreira

São Carlos
2008

Livros Grátis

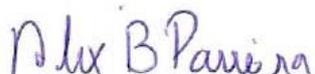
<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **PAULO ROBERTO RESCHETTI JUNIOR**

Dissertação defendida e julgada em 16/02/2009 perante a Comissão Julgadora:



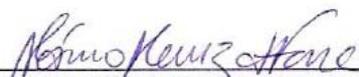
APROVADO

Prof. Titular **ALEXANDRE BENETTI PARREIRA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)



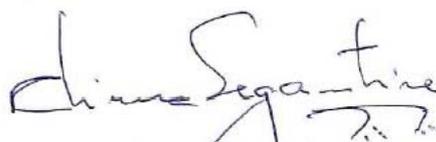
APROVADO

Prof. Associado **JOSÉ LEOMAR FERNANDES JUNIOR**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)



APROVADO

Prof. Dr. **MARCIO MUNIZ DE FARIAS**
(Universidade de Brasília/UnB)



Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes



Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

DEDICATÓRIA

À minha filha, Sarah Gonçalves Reschetti.

AGRADECIMENTOS

A minha família, meus pais, Paulo e Soeli, e meu irmão, Lelo, que desde o início me apoiaram e deram todo o suporte necessário para esta empreita.

Ao Prof. Tit. Alexandre Benetti Parreira, pelos ensinamentos, conselhos, paciência e orientação essenciais para o bom desenvolvimento e conclusão desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Glauco por viabilizar a utilização de equipamentos e programas que utilizados nos ensaios de compactação triaxial cíclico.

Ao Prof. Tit. Orencio Monje Vilar por disponibilizar o Laboratório de Geotecnia para realização dos ensaios de compressão simples.

A todos os professores do Departamento de Transportes pelos ensinamentos.

Às empresas Fibertex Louveira Produtos Têxteis Ltda., Owens Corning, Fitesa S.A. e Huesker International que forneceram as fibras que foram utilizadas na pesquisa.

À CNPq pela bolsa cedida.

Aos técnicos do Laboratório de Estradas, Gigante, pelo conhecimento transmitido, João, pelo esforço e Paulo, pela amizade.

À minha namorada, Fabiana, pela compreensão e apoio.

Àqueles que iniciaram comigo o programa de mestrado, Matheus, Luis, Vivian e Alex, que, do decorrer do tempo, se mostraram pessoas espetaculares, suprimindo em vários momentos a saudade da família.

Aos companheiros de sala David, Walter e Francis pelas discussões e conselhos.

A todos os amigos que fazem parte do Departamento de Transporte, que, nas mais diversas situações estávamos juntos, em especial ao Jesner, Davisão e Sr. Sérgio.

Aos amigos da república do Matheus, Tripa, Tales, Yu, Bife, Japonês, Samuel e Prego pelos bons momentos de descontração e diversão.

Aos amigos que deixei no Paraná para dar prosseguimento às minhas aspirações, pois eles nunca me faltaram nas ocasiões que foram solicitados.

Enfim, a todos que contribuíram direta e indiretamente para a realização desta pesquisa.

*“Pensar é o trabalho mais difícil que existe.
Talvez por isso tão poucos se dediquem a ele.”*

(Henry Ford)

RESUMO

RESCHETTI, P. R. Jr. (2008). *Avaliação do comportamento mecânico de um solo arenoso fino laterítico reforçado com fibras para uso em pavimentos*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

O objetivo do estudo apresentado nesta dissertação é avaliar a influência da inserção de fibras curtas, dispostas aleatoriamente, nas resistências à compressão e tração, na deformabilidade e no módulo de resiliência de um solo arenoso fino laterítico (SAFL) visando sua utilização na base de pavimentos. Foram estudadas fibras de vidro e de polipropileno. A primeira foi adicionada nos teores de 0,5%, 1,0% e 1,5% com comprimentos de 13 mm e 24 mm, já para a segunda, utilizaram-se os teores de 0,2%, 0,4% e 0,6% com comprimentos de 12 mm e 30 mm. O ensaio de compactação resultou em pouca variação da umidade ótima e leve decréscimo da massa específica máxima para as duas fibras. Para se determinar o comportamento mecânico do solo e dos compósitos, realizaram-se ensaios de compressão simples, compressão diametral e compressão triaxial cíclico. Previamente à realização destes ensaios, os corpos-de-prova eram mantidos ao ar durante um dia e posteriormente em câmara úmida, selados, durante dois dias. Esta condição procura aproximar a situação de laboratório às condições de campo. Ensaio complementares na umidade ótima de compactação foram realizados com algumas misturas. Para os ensaios de compressão simples, observou-se que a adição de fibra de polipropileno não influencia a tensão de ruptura, aumenta a deformação de ruptura e diminui o módulo tangente inicial e máximo. Já a adição da fibra de vidro, reduz a tensão de ruptura, aumenta a deformação de ruptura e diminui o módulo tangente inicial e máximo. No caso dos ensaios de compressão diametral, não houve alteração na resistência para a fibra de vidro, enquanto que para a fibra de polipropileno, observa-se um ganho de resistência para os teores mais elevados de fibra. Foram calibrados quatro modelos para representação do módulo de resiliência com o estado de tensão, sendo que o modelo composto foi aquele que apresentou melhor desempenho. Resultados de uma simulação de um pavimento constituído com base de SAFL mostraram que a inclusão de fibras, em qualquer das condições acarreta em diminuição do módulo de resiliência. Finalmente, conclui-se que, nas condições e com os materiais utilizados, o emprego de fibras não seria indicado para o reforço de SAFL destinado à base de pavimentos.

Palavras-Chave: Solo Arenoso Fino Laterítico, Reforço com Fibras, Fibras Comportamento Mecânico, Pavimentos.

ABSTRACT

RESCHETTI, P. R. Jr. (2008). *Evaluation of the mechanic behavior of fiber reinforcement in a fine sandy lateritic soil applies in pavement layers*. Dissertation (Master's degree). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

The propose of this study is to evaluate the effect of the randomly distributed fiber reinforcement in the compression and tension resistances, deformability and resilient modulus of a fine sandy lateritic soil (FSLs) for base layer of pavements. Glass fibers and polypropylene fibers were studied. The first was added in contents of 0,5%, 1,0% and 1,5% with lengths of 13 mm and 24 mm. For the second, the contents of 0,2%, 0,4% and 0,6% were used with lengths of 12 mm and 30 mm. The compaction tests show slight variation of optimum moisture content and a decrease of the maximum dry unit weight for both fibers. Unconfined compression tests, Brazilian tension tests and cyclic triaxial compression tests were carried out to determine the mechanic behavior of the soil and composite materials. The samples were dried in ambient condition for 24 hours and than wrapped up in film paper and stored for 48 hours in humid camera to homogenize the humidity. This procedure was adopted intending to simulate the constructive process adopted in pavement with lateritic soil bases. With some mixtures, complementary tests in the optimum moisture content were carried out. For the unconfined compression tests, the reinforcement with polypropylene fiber did not influence in the rupture tension, increased the rupture deformation and decreased the initial and maximum tangent modulus. The glass fiber reduced the rupture tension, increased the rupture deformation and decreased the initial and maximum tangent modulus. In the diametrical compression tests, there was not any alteration for the resistance adding the glass fiber, while for the polypropylene fiber there was an increase of the resistance for highest fiber contents. Four models were used to represent the resilient modulus behavior with relationship to the tension's state, and, between those, the compost model had the best performance. A simulation of a pavement composed with FSLs bases show that adding fibers, in any condition, the resilient modulus decrease. Finally, concluded that, with the conditions and materials used I this research, the fiber reinforcement would not be indicated for a FSLs apply in a base layer of pavement.

Key-words: Fine Sandy Lateritic Soil, Fiber Reinforcement, Fibers, Mechanic Behavior, Pavements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Curvas de massa específica e umidade ótima variando com o teor de fibra na argila (gráfico A) e na areia (gráfico B).....	19
Figura 2.2:	Curvas tensão <i>versus</i> deformação obtida com tensão de confinamento de 50 kPa (STAUFFER E HOLTZ, 1995).....	21
Figura 2.3:	Curva tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio triaxial com tensão de confinamento de 20 kN/m ² (CONSOLI et. al., 1998).	22
Figura 2.4:	Efeito da tensão confinante observado por Maher E Gray (1990).....	24
Figura 2.5:	Efeito da adição de fibras na tensão desvio de pico (MAHER E HO, 1993).....	25
Figura 2.6:	Efeito da tensão de confinamento na tensão desvio de pico (MAHER E HO, 1993).....	25
Figura 2.7:	Aumento na resistência à compressão simples com relação ao teor de fibra (RAFALKO et. al., 2007).....	27
Figura 3.1:	Curva granulométrica do solo.....	32
Figura 3.2:	Localização do solo no gráfico da classificação MCT.....	33
Figura 3.3:	Fibra de vidro.....	35
Figura 3.4:	Microfibra de polipropileno lisa.....	37
Figura 3.5:	Fibra de polipropileno corrugada.....	37
Figura 3.6:	Apetrechos utilizados no ensaio qualitativo de retração.....	41
Figura 3.7:	Equipamento utilizado no ensaio de resiliência.....	44
Figura 3.8:	Estrutura do pavimento utilizado na simulação do módulo de resiliência.....	46
Figura 3.9:	Fibra de vidro desfiada.....	48
Figura 4.1:	Aspecto do fibrossolo.....	54
Figura 4.2:	Detalhe da aglomeração de fibra no plano de ruptura.....	54
Figura 4.3:	Curva típica 'tensão <i>versus</i> deformação' do solo reforçado com ambas as fibras de polipropileno.....	55

Figura 4.4:	Variação da resistência à compressão simples em relação ao dias de secagem.....	57
Figura 4.5:	Exemplos de curvas 'tensão <i>versus</i> deformação' típicas com as indicações de E_o e $E_{máx}$	59
Figura 4.6:	Corpos-de-prova com 0% (a), 0,2% (b), 0,4% (c) e 0,6% (d) de fibra de polipropileno de 12 mm de comprimento mostrando os diferentes níveis de fissuras.....	60
Figura 4.7:	Variação da resistência à compressão simples das fibras de polipropileno de 12 e 30 mm de comprimento com relação ao teor de fibra.....	61
Figura 4.8:	Variação da resistência à compressão simples das fibras de vidro de 13 e 24 mm de comprimento com relação ao teor de fibra.....	64
Figura 4.9:	Deformação na ruptura das fibras de polipropileno de 12 e 30 mm de comprimento com relação ao teor de fibra.....	66
Figura 4.10:	Deformação na ruptura das fibras de vidro de 13 e 24 mm de comprimento com relação ao teor fibra.....	67
Figura 4.11:	Variação do módulo tangente inicial para as misturas com fibras de polipropileno de 12 e 30 mm de comprimento com relação ao teor de fibra.....	68
Figura 4.12:	Variação do módulo tangente máximo para as misturas com fibras de polipropileno de 12 e 30 mm de comprimento com relação ao teor de fibra.....	69
Figura 4.13:	Variação do módulo tangente inicial para as misturas com fibras de vidro de 13 e 24 mm de comprimento com relação ao teor de fibra.....	70
Figura 4.14:	Variação do módulo tangente máximo para as misturas com fibras de vidro de 13 e 24 mm de comprimento com relação ao teor fibra.....	71
Figura 4.15:	Variação da resistência à compressão diametral das fibras de polipropileno de 12 e 30 mm de comprimento com relação ao teor de fibra.....	72
Figura 4.16:	Variação da resistência à compressão diametral das fibras de vidro de 13 e 24 mm de comprimento com relação ao teor de fibra.....	73

Figura 4.17: Variação do módulo de resiliência das misturas com fibras de polipropileno de 12 e 30 mm de comprimento com relação ao teor fibra.....	81
Figura 4.18: Variação do módulo de resiliência das misturas com fibras de vidro de 13 e 24 mm de comprimento com relação ao teor fibra.....	82
Figura 4.19: Variação da redução do diâmetro da pastilha com relação ao teor de fibra de polipropileno de 12 e 30 mm de comprimento..	84
Figura 4.20: Variação da redução do diâmetro da pastilha com relação ao teor de fibra de vidro de 13 e 24 mm de comprimento.....	84
Figura 4.21: Pastilha de solo sem reforço antes e depois da secagem.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:	Modelos matemáticos de módulo de resiliência.....	12
Tabela 2.2:	Sistemas de reforço de solos (McGOWN et. al., 1978).....	17
Tabela 2.3:	Massa específica máxima e umidade ótima (FLETCHER e HUMPHRIES, 1991).....	19
Tabela 2.4:	Melhora observada no ensaio de compressão simples.....	20
Tabela 2.5:	Características das fibras.....	27
Tabela 3.1:	Massa específica e limites de Atterbreg.....	31
Tabela 3.2:	Parâmetros e índices obtidos nos ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão.....	33
Tabela 3.3:	Especificações do DNER para base de solo arenoso fino laterítico (DNER, 1991) e valores correspondentes para o solo pesquisado.....	34
Tabela 3.4:	Classificação segundo HRB, USCS e MCT.....	34
Tabela 3.5:	Especificações da fibra de vidro.....	36
Tabela 3.6:	Especificações da fibra de polipropileno.....	37
Tabela 3.7:	Seqüência de ensaios para base/sub-base segundo a AASHTO T307-99.....	45
Tabela 3.8:	Relação de grandezas obtidas com os ensaios mecânicos.....	51
Tabela 4.1:	Resultados obtidos no ensaio de compactação.....	58
Tabela 4.2:	RCS das misturas na ω_0 e as respectivas com secagem.....	62
Tabela 4.3:	Constantes de calibração e R^2 para os quatro modelos utilizados.....	75
Tabela 4.4:	Constantes de calibração e R^2 na umidade ótima para os quatro modelos utilizados.....	79
Tabela 4.5:	Estado de tensão e módulo de resiliência obtidos na simulação de um pavimento de SAFL.....	80
Tabela 4.6:	Estado de tensão e módulos de resiliência obtidos na umidade ótima.....	83

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DER/SP	Departamento de Estradas e Rodagem de São Paulo
DER/PR	Departamento de Estradas e Rodagem do Paraná
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
ES	Especificação de Serviço
HRB	Highway Research Board
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
MCT	Miniatura Compactado Tropical
MCV	Moisture Condition Value
ME	Método de Ensaio
NBR	Norma Brasileira Registrada
PF	Fibra de Polipropileno Fibrilada
PVA	Fibra de Álcool Polivinílico
SAFL	Solo Arenoso Fino Laterítico
TRB	Transportation Research Board
USCS	Unified Soil Classification System
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

#	Abertura da peneira
θ	Primeiro invariante de tensão
σ_3	Tensão de confinamento
σ_a	Tensão máxima
σ_c	Tensão de contato
σ_d	Tensão desvio
A-2-6	Solo areno siltoso
c'	Coeficiente de deformabilidade da classificação MCT
cm	Centímetro
D	Diâmetro
d'	Coeficiente que caracteriza o ramo seco da curva de compactação obtida pelo método MCT
$dtex$	1g/10.000m
e'	Índice de classificação MCT, calculado em função de P_i e d'
ε_r	Deformação axial resiliente
ε_{rup}	Deformação de ruptura
IP	Índice de plasticidade
kgf	Quilograma-força
km	Quilômetro
kN/m^3	Quilo-newton por metro cúbico
kPa	Quilo-pascal
L	Comprimento da fibra
LA	Areias lateríticas
LA'	Solo arenoso laterítico
LG'	Solo argiloso laterítico
LC	Limite de contração
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MPa	Mega-pascal
ml	Mililitro
mm	Milímetro
M_R	Módulo de resiliência
NA	Areia não laterítica
NA'	Solo arenoso não laterítico
NG'	Solo argiloso não laterítico
NS'	Solo siltoso não laterítico
p_a	Pressão atmosférica
P_i	Porcentagem de perda de material por imersão
$\rho_{máx}$	Massa específica máxima
ρ_s	Massa específica
R^2	Coeficiente de determinação
RCD	Resistência última à compressão diametral
RCS	Resistência última à compressão simples
SC	Solo areno argiloso
τ_{oct}	Tensão cisalhante octaédrica
ν	Coeficiente de Poisson
ω_o	Umidade ótima

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. OBJETIVO.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. SOLOS TROPICAIS LATERÍTICOS.....	6
2.1.1. <i>GENERALIDADES.....</i>	6
2.1.2. <i>CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS.....</i>	7
2.1.3. <i>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS.....</i>	8
2.1.3.1. Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade	8
2.1.3.2. Granulometria	8
2.1.3.3. Características de compactação.....	9
2.1.3.4. Expansão e Contração	9
2.1.3.5. Módulo Resiliente	10
2.1.4. <i>CARACTERÍSTICAS DE CAMPO.....</i>	13
2.2. REFORÇO DE SOLOS.....	14
2.2.1. <i>CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....</i>	14
2.2.2. <i>EFEITO DA ADIÇÃO DE FIBRAS ALEATÓRIAS NO COMPORTAMENTO DO SOLO.....</i>	17
2.2.2.1. Massa Específica Máxima e Umidade Ótima	18
2.2.2.2. Resistência Última à Compressão.....	20
2.2.2.3. Resistência Pós-ruptura	21
2.2.2.3. Resistência à Compressão Diametral.....	22
2.2.2.4. Módulo de Resiliência.....	23
2.2.3. <i>FATORES QUE AFETAM O COMPORTAMENTO DO FIBROSSOLO ...</i>	23
2.2.3.1. Tensão Confinante	23
2.2.3.2. Teor de Fibra	26
2.2.3.3. Geometria da Fibra.....	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1. MATERIAIS	30
3.1.1. <i>SOLO.....</i>	30
3.1.1.1. Massa Específica dos Sólidos e Limites de Atterberg	31
3.1.1.2. Granulometria	31
3.1.1.3. Ensaio da Metodologia MCT.....	32
3.1.1.4. Classificação.....	34
3.1.2. <i>FIBRAS.....</i>	34
3.1.2.1. Fibra de Vidro	35
3.1.2.2. Fibra de Polipropileno.....	36
3.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	38
3.2.1. <i>ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....</i>	38
3.2.2. <i>COMPOSIÇÃO DA MISTURA.....</i>	38
3.2.3. <i>MOLDAGEM E SECAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA.....</i>	40

3.2.4. <i>ENSAIO QUALITATIVO DE RETRAÇÃO</i>	41
3.2.4. <i>ENSAIOS MECANICOS</i>	42
3.2.4.1. Ensaio de Compressão Simples	42
3.2.4.2. Ensaio de Compressão Diametral.....	42
3.2.4.3. Ensaio de Compressão Triaxial Cíclico.....	43
3.2.5. <i>ESTUDOS EXPLORATÓRIOS</i>	47
3.2.5.1. Escolha da Condição de Uso da Fibra de Vidro.....	47
3.2.5.2. Escolha do Tipo de Fibra de Polipropileno.....	49
3.2.5.3. Escolha do Processo de Secagem dos Corpos-de-prova	49
3.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS	50
3.3.1. <i>ELIMINAÇÃO DE RESULTADOS</i>	51
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	53
<hr/>	
4.1. ESTUDOS EXPLORATÓRIOS	53
4.1.1. <i>CONDIÇÃO DO USO DA FIBRA DE VIDRO</i>	53
4.1.2. <i>ESCOLHA DO TIPO DE FIBRA DE POLIPROPILENO</i>	55
4.1.3. <i>ESCOLHA DO PROCESSO DE SECAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS</i>	56
4.2. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	57
4.3. COMPRESSÃO SIMPLES	58
4.3.1 <i>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES</i>	61
4.3.2. <i>DEFORMAÇÃO DE RUPTURA</i>	65
4.3.3. <i>RIGIDEZ</i>	67
4.4. ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL	71
4.5. COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICO	74
4.6. ENSAIO QUALITATIVO DE RETRAÇÃO	83
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	86
<hr/>	
5.1. SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
ANEXO I	94
ANEXO II	108

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A experiência brasileira na construção de pavimentos utilizando solos que, de acordo com normas internacionais, julgavam-se impróprios para tanto, evidenciou a diferença de comportamento dos solos tropicais se comparado aos solos considerados não tropicais. Para um solo ser considerado tropical ele deve ter sofrido processos geológicos e/ou pedológicos típicos de regiões tropicais úmidas. Portanto, a classificação de um solo como tropical não está restrita à área da faixa astronômica tropical ou à região de clima tropical úmido. Dentre os solos tropicais destacam-se duas grandes classes: os solos lateríticos e os saprolíticos (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Solos lateríticos são originados em regiões com intemperismo intenso e rápido, com altas temperaturas, ambiente úmido, com chuvas abundantes e percolação d'água. Este ambiente propicia ao solo sofrer o processo de laterização. De acordo com Santos (2006), neste processo cátions básicos são lixiviados e há

uma conseqüente concentração residual de óxidos de ferro e de alumínio. Também devido a esse processo a fração argila do solo é constituída essencialmente de argilo-minerais do grupo das caulinitas e de hidróxidos e óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio. O solo fica estável em presença de água devido ao recobrimento dos argilos-minerais pelos hidróxidos e óxidos hidratados, que também atuam como cimentantes naturais entre partículas. Na fração areia e silte são encontrados principalmente quartzo, agregações lateríticas e, em menor escala, minerais pesados.

Os solos lateríticos ocupam a parte superficial do maciço e a espessura da camada pode variar de alguns centímetros até alguns metros, raramente alcançando mais de dez metros de espessura. Este tipo de solo pode ser encontrado na maioria dos estados do Brasil, mas os estados de São Paulo e do Paraná se destacam, historicamente, por sua utilização na estrutura do pavimento (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Na década de 50 foi realizada a primeira construção de rodovia utilizando-se um solo arenoso fino laterítico (SAFL) como base do pavimento. O trecho executado foi um dos acessos à cidade de Campinas, que apresentou desempenho satisfatório. Vários trechos experimentais foram construídos nos anos seguintes, dando preferência à utilização de solo arenoso fino laterítico e a técnica construtiva se popularizou devido ao baixo custo de construção. Desde então vários pesquisadores envidaram seus esforços a fim de aumentar o conhecimento a respeito do novo material, tais como: Nogami e Villibor (1980), Villibor (1981), Franzoi (1990), Fabbri (1994) e Bernucci (1995). Dentre estes destacam-se os nomes de Nogami e Villibor, que apresentaram, em 1982, na 17^a Reunião Anual de Pavimentação, um novo

critério para escolha de solo arenoso fino laterítico para base de pavimentos, com o uso da tecnologia MCT.

Quando as condições de projeto não são satisfeitas pelas características do solo disponível, uma alternativa construtiva deve ser adotada. Cabe então estudar a opção de reforçar ou melhorar o solo. Esta técnica baseia-se em alterar as características do material, dando-lhe resistência e rigidez para viabilizar sua utilização em obras de engenharia. Tais características podem ser alcançadas aumentando-se sua densidade, através da compactação, ou adicionando-se um novo material que estabilize o solo quimicamente ou que o reforce.

Existem vários materiais que podem ser adicionados ao solo para reforçá-lo, dentre estes materiais estão as fibras. As fibras têm uma boa resistência à tração o que faz delas um material interessante para ser utilizado em vários ramos da engenharia. De acordo com Palmeira (1992), existem relatos da utilização de reforço com fibras de épocas remotas como, por exemplo, na construção da pirâmide de Ziggurat e na Torre de Quf, na Mesopotâmia, que utilizaram camadas intercaladas de solo e mantas de raízes. Há, ainda, indícios da utilização desta técnica também em parte da Grande Muralha da China e em estradas feitas pelos incas, no Peru, existentes até hoje, onde se utilizou lã de lhama para reforço.

Com a compactação do solo-fibra gera-se um compósito denominado fibrossolo. Muitos estudos foram feitos para se conhecer o comportamento do solo reforçado com fibras. Gray e Ohashi (1983) reforçaram um solo não coesivo com fibras e concluíram que a inclusão das fibras aumentou significativamente a resistência ao cisalhamento de pico. O ganho na resistência foi maior quanto maior foi a quantidade de fibra adicionada e o aumento chegou a ser de 80% se comparado com o solo não reforçado. Também houve limitação da perda de

resistência de cisalhamento pós-pico dos solos sob carga estática. Em alguns casos a perda de resistência chegou a ser nula enquanto que no solo não reforçado a resistência pós-pico era 63% da resistência de pico. Esta última característica, de tornar o solo mais dúctil, fez com que vários trabalhos fossem feitos adicionando-se fibra em materiais rígidos e de ruptura frágil como o solo-cimento e o solo-cal (MAHER e HO, 1993; CROKFORD et al, 1993; CONSOLI et al, 1998; VENDRUSCOLO, 2003).

A utilização de fibras como material de reforço de materiais da estrutura do pavimento também já foi estudada. Fletcher e Humphries (1991) analisaram a adição de fibras de polipropileno em um solo siltoso utilizando os ensaios de compactação e CBR e afirmam que existe um teor ótimo de fibra que aumenta o valor do CBR. O CBR do solo puro era de 5,4%. Foram estudados três teores de fibras (0,5%, 1,0% e 1,5%) com dois comprimentos diferentes (19 mm e 25 mm). O maior incremento no valor de CBR foi de 133%, obtido adicionando-se 1,0% da maior fibra. Na fibra menor o maior incremento conseguido ficou em 65%, também com o teor de 1,0% de fibra. Com base nos ensaios conclui-se que o resultado é mais evidente para maiores comprimentos de fibras. Specht (2000) estudou um solo-cimento reforçado por duas diferentes fibras de polipropileno visando pavimentação, uma mais extensível e outra menos extensível. Concluiu que a influência da inclusão aleatória de fibras sobre o compósito depende, fundamentalmente, das características da fibra e da matriz. A fibra com caráter mais extensivo é mais efetiva na melhoria das características pós-ruptura, enquanto que a fibra de caráter inextensível é mais efetiva na redução da deformabilidade e no aumento da resistência de pico do compósito.

Não foram encontrados estudos utilizando-se SAFL acrescido de fibras visando sua utilização na estrutura do pavimento. O que torna o assunto tecnicamente interessante é o método construtivo utilizado na construção da base de pavimentos utilizando-se SAFL, que prevê a secagem da camada (DER/PR, 2005), fazendo com que o material adquira alta resistência à compressão e rigidez. A partir deste fato desenvolveu-se um programa de ensaios que visava avaliar o desempenho mecânico do compósito solo-fibra.

1.2. OBJETIVO

A pesquisa apresentada nesta dissertação tem como objetivo avaliar a influência da inclusão de dois tipos de fibras curtas, distribuídas de modo aleatório, no comportamento mecânico de um solo arenoso fino laterítico, visando sua aplicação na construção de bases de pavimentos. Serão utilizadas fibras de polipropileno e de vidro e realizados ensaios de compressão simples, compressão diametral e compressão triaxial com carregamento cíclico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados fundamentos teóricos sobre os materiais utilizados frente aos fatores estudados na presente pesquisa. Relatam-se as experiências de outros autores que também trabalharam com inclusões de fibras para que suas conclusões possam servir de base para várias decisões tomadas no decorrer do estudo.

2.1. SOLOS TROPICAIS LATERÍTICOS

2.1.1. GENERALIDADES

Solos lateríticos são aqueles que passaram por um processo de laterização. Tal processo consiste na lixiviação de sílicas e catiônicos com conseqüente concentração de hidróxidos de ferro e alumínio. O clima tropical favorece este processo no solo devido ao seu intemperismo intenso e rápido. Após sofrer o

processo de laterização o solo se torna menos suscetível à ação da água, sofrendo menos erosão e com finos mais estáveis se comparado aos solos não lateríticos, além de adquirir uma cimentação que lhe dá bom desempenho mecânico para a aplicação em bases de pavimentos.

Um acesso à cidade de Campinas, executado pelo DER-SP no fim da década de 50, foi o primeiro pavimento que utilizou solo arenoso fino laterítico como base. Até então as classificações tradicionais classificavam este solo como inadequado para tal utilização. A partir desta descoberta vários trechos foram construídos com a mesma técnica que, de acordo com Nogami e Villibor (2001), até o início da década, já se somava mais de 7000 km extensão.

Áreas promissoras de ocorrência de tal solo podem ser identificadas através de mapas geológicos e pedológicos. Porém a confirmação da identificação de uma jazida só acontece através de ensaios laboratoriais. Geralmente solos lateríticos são classificados, segundo a Highway Research Board (HRB), como A-2 e A-4, mas também é possível encontrar, com menor frequência, com as classificações A-6 e A-7.

2.1.2. CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS

Os solos lateríticos comumente apresentam uma coloração única e homogênea, geralmente vermelho, amarelo ou marrom.

Uma característica marcante neste tipo de solo é o desenvolvimento de agregação da fração argila, formando torrões distinguíveis. Nas variações arenosas percebe-se freqüentemente vazios intergranulares. Em consequência destas

características os solos lateríticos são considerados porosos, com baixa densidade e alta permeabilidade no estado natural (FRANZOI, 1990).

2.1.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS

2.1.3.1. Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade

O limite de liquidez (LL) e o índice de plasticidade (IP) são usualmente utilizados para saber a classificação geotécnica dos solos. Outra função é a de limitar a variação de volume dos mesmos, através da limitação do LL e IP, já que esta característica não é desejada para solos que irão compor as camadas do pavimento. A maioria das normas limita o LL em 15% e o IP em 6%, porém a experiência de campo já mostrou que solos com LL elevados (acima de 50%) pode não sofrer variações de volumes suficientes para colocar o pavimento em risco (latossolos e podzólicos). Assim como existem solos com LL e IP dentro dos limites que variam seus volumes de certa forma que são inapropriados para a constituição de pavimentos (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

2.1.3.2. Granulometria

De acordo com Franzoi (1990), os solos lateríticos possuem uma variação granulométrica muito ampla, geralmente com predominância de finos passantes integralmente na peneira com 2,00 mm de abertura. A autora salienta que, devido à cimentação presente neste tipo de solo, pode ser difícil obter a granulometria real do material, tendo como consequência porcentagens de silte e areia acima do normal.

2.1.3.3. Características de compactação

É comum a curva de compactação de um solo laterítico ter uma grande inclinação no ramo seco e pico acentuado. Portanto, há um grande acréscimo de densidade conforme se aumenta a umidade de compactação no ramo seco da curva.

Os corpos-de-prova compactados submetidos à imersão em água têm excelentes valores de suporte, com ou sem sobrecarga. Fato este que não ocorre em solos não lateríticos.

2.1.3.4. Expansão e Contração

A expansão e a contração são medidas com solos compactados conforme especifica o método MCT de classificação de solos. Como regra geral os solos lateríticos apresentam pouca expansão, mesmo com limite de liquidez elevado. Já a contração pode ocorrer de forma excessiva. Este fenômeno é freqüente nas regiões de clima quente. A contração pode acarretar em fissuras e conseqüente formação de blocos. Em solos arenosos finos lateríticos as fissuras são mais abertas na parte superficial da camada, diminuindo a abertura com a profundidade. Isto acontece porque a abertura depende do valor da umidade de equilíbrio estabelecido após a secagem. Além disso, a abertura dessas trincas é tão mais acentuada quanto maior for a fração argila do solo laterítico. Porém solos lateríticos que não apresentam fissuração também não apresentam coesão, o que dificulta a compactação do mesmo (BERNUCCI, 1995).

Com relação a expansão e retração os solos podem ser classificados em três grupos: Tipo A ou clássico, Tipo B e Tipo C (BERNUCCI apud NOGAMI, 1995).

Segundo Bernicci (1995) a explicação para os três grupos é a seguinte:

- Tipo A: o total de expansão ou de contração depende da quantidade da fração argila no solo e de sua natureza. Este tipo de solo quando expansivo é contrátil.
- Tipo B: é pouco expansível, porém é contrátil. Típico comportamento de solos coesivos.
- Tipo C: muito expansivo e pouco contrátil. Comportamento típico de alguns solos saprolíticos.

2.1.3.5. Módulo Resiliente

Quando solicitado por uma carga, o pavimento sofre uma certa deformação. Esta deformação é composta por uma parcela elástica e outra plástica. A parcela elástica da deformação de um pavimento submetido a uma carga cíclica é a deformação resiliente. Resiliência pode ser definida como energia armazenada em um corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações.

O módulo de resiliência é utilizado nos métodos de dimensionamentos racionais ou mecanísticos de dimensionamento de pavimentos, que são calcados em modelos matemáticos. Para estes modelos é necessário analisar o comportamento tensão-deformação do sistema de camadas. Tais métodos consideram critérios de ruptura obtidos a partir de propriedades fundamentais dos materiais utilizados (SPECHT, 2000).

Desde 1986 a AASTHO, através do seu guia de dimensionamento de pavimento, passou a recomendar a utilização do módulo de resiliência para a caracterização dos materiais da estrutura do pavimento.

O módulo de resiliência é definido como a relação entre a tensão desvio e a deformação resiliente, como mostra a equação 2.1. Esta relação é obtida com o ensaio triaxial cíclico.

$$Mr = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (2.1)$$

Onde:

σ_d = tensão desvio axial repetida;

ε_r = deformação axial resiliente correspondente a um certo número de aplicações de σ_d .

Vários são os fatores que influenciam no módulo resiliente do solo. Dentre eles pode-se citar a natureza do solo (constituição mineralógica, textura, plasticidade da fração fina), umidade, densidade e estado de tensões, além das características do próprio ensaio (frequência e tempo de carregamento, forma da onda, etc.) (MEDINA e MOTTA, 2005).

Para o solo a relação citada na equação 2.1 não é linear como acontece com materiais elásticos, ou seja, a deformação não varia de forma linear com o aumento de tensão. São então utilizados modelos matemáticos, que ficam em função das tensões aplicadas durante o ensaio (geralmente a tensão desvio e/ou de confinamento), para expressar os valores do módulo de resiliência.

Vários modelos já são conhecidos e a decisão de qual adotar depende de se conhecer o comportamento do módulo de resiliência em função do estado de tensão e o quão bem o modelo o representa. Na Tabela 2.1 estão apresentados vários

modelos e o tipo de solo em que cada um representa melhor, porém nada impede que o modelo seja usado para um solo diferente do indicado.

Tabela 2.1: Modelos matemáticos de módulo de resiliência.

TIPO DE SOLO	EQUAÇÃO
Arenoso	$Mr = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$
Argiloso	$Mr = k_1 \cdot \theta^{k_2}$, para $k_2 > 0$
Areno-argiloso	$Mr = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$, para $k_2 < 0$
Areno-argiloso	$Mr = k_2 + k_3(k_1 - \sigma_d)$, para $\sigma_d < k_1$ $Mr = k_2 + k_4(\sigma_d - k_1)$, para $\sigma_d > k_1$
Genérico	$Mr = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$
Universal	$Mr = k_1 \cdot p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$

Onde:

σ_d = tensão desvio axial repetida;

σ_3 = tensão de confinamento;

θ = primeiro invariante de tensão ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$);

τ_{oct} = tensão cisalhante octaédrica;

p_a = pressão atmosférica

k_1, k_2, k_3 e k_4 = constantes experimentais.

Ênfase deve ser dada ao modelo composto tido como genérico (último modelo da Tabela 2.1). A generalização que este modelo se refere é quanto à granulometria do solo, e devido a este fato tornou-se o mais utilizado.

Takeda (2006) constatou que os módulos de resiliência de solos lateríticos são maiores aos dos solos não lateríticos, quando a comparação ocorria com solos que apresentavam granulometrias semelhantes. O mesmo autor concluiu que o

umedecimento pós-compactação do solo conduz a uma diminuição do módulo de resiliência, sendo esta queda mais pronunciada para os solos não lateríticos, evidenciando o melhor comportamento dos solos lateríticos frente à ação da água.

Gonçalves (1999) estudou a influência da variação da umidade em um solo argiloso laterítico e observou que à medida que a sucção aumenta o módulo de resiliência também aumenta, sendo este crescimento maior quanto maior a tensão desvio.

2.1.4. CARACTERÍSTICAS DE CAMPO

Villibor et. al. (2007) apresentam várias peculiaridades quanto ao comportamento durante a vida de serviço do tipo de solo utilizado nesta pesquisa.

São elas:

- baixíssima incidência de ruptura da base, exceto em locais onde o lençol freático se encontra a menos de 1 metro de profundidade e/ou em pontos de percolação de águas superficiais;
- pequenas deflexões, geralmente entre 20 e 60 (1/100mm);
- pequenas deformações nos trilhos de roda, porém, sem trincamento do revestimento;
- baixa contração por secagem ao ar resultando em placas de dimensões aproximadas de 50 x 50 cm na base, consideradas ideais como padrão de trincamento;
- excelente capacidade de receber compactação, alcançando facilmente o grau de compactação correspondente a 100% da energia intermediária;
- facilidade no acabamento da base;

- satisfatória receptividade à imprimadura, proporcionando boa aderência da camada de rolamento à base;
- superfície e borda pouco susceptíveis ao amolecimento por umedecimento.

Villibor (1981) estudou a variação do teor de umidade em camadas de base de pavimentos constituídas de SAFL no estado de São Paulo. Mediu-se a umidade *in situ* em vários trechos na sua construção e durante a vida de serviço em diferentes épocas do ano, abrangendo períodos de chuva e estiagem. Observou-se que os teores de umidade da camada de base estavam compreendidos entre 55% a 110% da umidade ótima. Portanto, de um modo geral, a umidade de trabalho ficou abaixo da umidade ótima de laboratório mesmo na época de chuvas. Bernucci et. al. (2000) corroboram com a afirmação de que a umidade de equilíbrio dos pavimentos é inferior à umidade de compactação.

2.2. REFORÇO DE SOLOS

2.2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em obras geotécnicas os materiais utilizados são ensaiados para que se conheçam seus limites de aplicação na engenharia. Não são raras as vezes em que os materiais avaliados não são aptos para compor a estrutura a que se destinam, seja por sua natureza ou pelo seu estado, nesses casos deve-se estabilizar o material. Através da estabilização do material muda-se certa característica, tornando-o adequado para a aplicação na obra.

A construção de uma estrada é considerada uma obra geotécnica por utilizar materiais geotécnicos na camada de base, sub-base ou reforço de subleito. Assim como em qualquer obra geotécnica avaliam-se os materiais disponíveis a uma distância economicamente viável para transporte observando-se sua aptidão mecânica para a utilização na estrutura do pavimento, sendo que o conceito de estabilização também se aplica ao material com esse destino.

O processo de estabilização pode ser dividido em três grupos de acordo com Van Impe (1989):

- Estabilização temporária: é aquela que dura um curto espaço de tempo, geralmente acontecendo durante a execução de certa fase da obra como é o caso do congelamento do solo ou rebaixamento do nível do lençol freático por drenos;
- Estabilização permanente: a estabilização dura um longo período, geralmente toda a vida útil da estrutura, sem que se utilize a adição de qualquer material além do solo. A técnica consiste basicamente na compactação, tanto superficial como profunda.
- Estabilização permanente com adição de novos materiais: é aquela que combina compactação com a adição de novos materiais, como por exemplo, cal, cimento, emulsões, colunas de brita ou areia, colunas de drenos verticais, geossintéticos e fibras.

Neste estudo dá-se foco a estabilização permanente com adição de novos materiais. Já que se deseja alcançar a estabilização através da junção de dois materiais distintos: as fibras e o solo.

A estabilização com adição de novos materiais pode acontecer por meio da melhoria ou do reforço do solo. O termo melhoria é associado aos tratamentos químicos, enquanto que reforço está associado à utilização de inclusões que melhoram o solo fisicamente. Portanto neste trabalho o material compósito será chamado de solo reforçado ou fibrossolo.

O reforço do solo pode ser dividido em três tipos:

- Inclusões de natureza unidimensional (direcionais);
- Inclusões de natureza bidimensionais (direcionais);
- Inclusões de natureza tridimensionais (aleatórias);

Nas inclusões de natureza unidimensional é comum que as tensões se transfiram do solo para o reforço por meio do atrito superficial que, por sua vez, é acentuado pela rugosidade superficial (TEODORO, 1999).

Já nas inclusões bidimensionais a interação solo-reforço pode ser desenvolvida similarmente por mecanismos de atrito e de adesão ou atrito, adesão e resistência passiva (TEODORO, 1999).

Com as inclusões de natureza tridimensional a transferência de esforços da matriz com o reforço se dá simplesmente pelo atrito superficial, assim como nas inclusões unidimensionais.

Outra subdivisão comum entre os reforços, que foi proposta por McGown et. al. (1978), é quanto a sua deformabilidade. Os reforços podem ser classificados como extensíveis ou inextensíveis. No primeiro caso os elementos de reforço têm deformação de ruptura maior que a máxima deformação de tração do solo sem reforço. Esta característica confere ganho na ductibilidade do material e aumenta a resistência pós-pico se comparado com o solo somente ou com reforços

inextensíveis. No segundo caso os elementos de reforço tem deformação de ruptura menor que a máxima deformação de tração do solo sem reforço, sob mesma condição de tensão. Porém isto não significa que o material de reforço irá romper, pois a ruptura vai depender da resistência à tração última. Se aplicado, este tipo de reforço pode oferecer ganho de resistência mecânica, principalmente na resistência inicial, mas rupturas frágeis podem continuar ocorrendo.

A Tabela 2.2 é apresentada por McGown et. al. (1978) e lista alguns sistemas de reforço de solos, destacando os tipos de inclusões utilizadas e sua deformabilidade.

Tabela 2.2: Sistemas de reforço de solos (McGOWN et. al., 1978).

SISTEMA DE REFORÇO	TIPOS DE INCLUSÕES		DEFORMABILIDADE	
			INEXTENSÍVEIS	EXTENSÍVEIS
Terra armada Solo pregado	Unidimensional (direcional)	Lâminas metálicas	•	
		Lâminas plásticas		•
		Barras	•	
Geossintéticos	Bidimensional (direcional)	Geogrelhas	•	
		Mantas têxteis		•
Fibras	Tridimensional (aleatório)	Fibras curtas		•
		Fitas		•
		Filamentos (Texsol)		•

2.2.2. EFEITO DA ADIÇÃO DE FIBRAS ALEATÓRIAS NO COMPORTAMENTO DO SOLO

O comportamento dos solos quando reforçados aleatoriamente com fibras apresentam vários aspectos que diferem do solo sem reforço. A seguir os aspectos são apresentados separadamente em itens pertinentes a serem comentados nesta pesquisa.

2.2.2.1. Massa Específica Máxima e Umidade Ótima

Nataraj e McManis (1997) adicionaram fibras de polipropileno com 25 mm de comprimento em dois solos, um argiloso e outro arenoso. Os teores de fibra utilizados foram 0,1%, 0,2% e 0,3% para argila e 0,1%, 0,2%, 0,3% e 0,4% para a areia. Os solos foram submetidos ao ensaio de compactação utilizando-se a energia normal. Os resultados com o solo argiloso mostraram que tanto o solo reforçado como o não reforçado apresentaram comportamento similares, com curvas próximas entre si. Ainda no mesmo solo, a adição de fibras acarretou em uma pequena diminuição da umidade ótima (ω_o) e um leve aumento na massa específica máxima, porém não há uma correlação dessas variações com o teor de fibras. O maior valor de massa específica máxima obtido foi de 16,74 kN/m³ para o teor de 0,2% de fibras, enquanto o solo sem reforço tem uma massa específica máxima de 16,60 kN/m³. Quanto à umidade ótima, valor para o solo sem reforço é de 21,25% e, utilizando 0,2% de fibras, caiu para 18,75%.

Na mesma pesquisa a areia apresentou uma massa específica máxima de 15,2 KN/m³ e umidade ótima de 15,2%. Os resultados, para este material, não apresentaram diferenças significativas comparando-se o solo reforçado com o não reforçado. Utilizando 0,1% de fibras houve um leve aumento na massa específica máxima e no teor de umidade ótimo. Para os teores de 0,2 a 0,4% de fibra houve um leve decréscimo na massa específica máxima assim como um leve aumento na umidade ótima, sendo que os valores foram parecidos para os três teores, variando em torno de 15 kN/m³ e 15,5% respectivamente.

Fletcher e Humphries (1991) relatam sua experiência de reforçar um silte arenoso com fibras de polipropileno com 25 mm de comprimento nos teores de 0,5%, 1,0% e 1,5%. Três ensaios de compactação com a energia normal foram

feitos com cada um desses materiais para se conhecer a umidade ótima e massa específica máxima das misturas. As médias dos resultados obtidos com cada uma das misturas, inclusive com o solo não reforçado, estão mostradas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Massa específica máxima e umidade ótima (FLETCHER e HUMPHRIES, 1991).

MATERIAL	MÉDIA DA MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA (kg/m ³)	MÉDIA DO TEOR DE UMIDADE ÓTIMO (%)
Solo	1505,8	28,0
Solo + 0,5% de fibra	1531,5	26,7
Solo + 1,0% de fibra	1531,5	26,1
Solo + 1,5% de fibra	1541,1	25,5

Pode-se observar nos resultados uma tendência de se diminuir o teor de umidade ótimo e aumentar a massa específica máxima com a inclusão e o aumento do teor de fibras.

Crockford et. al. (1993) reforçaram uma areia e uma argila com fibras de polipropileno e executaram ensaios de compactação com várias energias. A Figura 2.1 apresenta os resultados dos ensaios de compactação executados na energia modificada tanto com a argila como com a areia. O autor afirma que, aparentemente, há uma curva para massa específica análoga à curva de umidade ótima, que podem ser utilizadas na escolha do teor ótimo de fibra, porém a razão para que tal analogia aconteça é incerta.

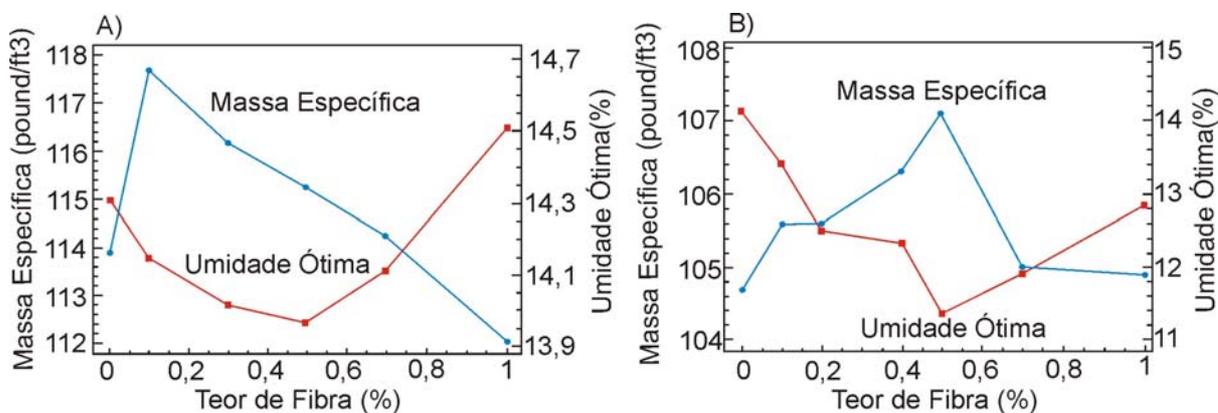


Figura 2.1: Curvas de massa específica e umidade ótima variando com o teor de fibra na argila (gráfico A) e na areia (gráfico B).

2.2.2.2. Resistência Última à Compressão

É comum um solo reforçado com fibras apresentar resistência última à compressão maior do que o solo sem reforço.

Rafalko et. al. (2007) testaram vários tipos de estabilizantes em duas argilas. Os solos foram previamente preparados para terem CBR de 2% no ramo úmido, para que pudessem simular um material com baixa capacidade de suporte. Dentre os estabilizantes utilizados estão a fibra de polipropileno fibrilada (FP), fibra de náilon e uma fibra de álcool polivinílico (PVA). As fibras foram utilizadas como o único estabilizante ou em conjunto com algum estabilizante químico

Foram realizados ensaios de compressão simples para avaliar o efeito da inclusão dos estabilizantes. Quando as fibras são utilizadas como único estabilizante com o teor de 1% a melhora no comportamento mecânico esta mostrada na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Melhora observada no ensaio de compressão simples.

FIBRA	RCS (kPa)	AUMENTO DA RCS
Solo s/ reforço	110	-
PVA	183	66%
FP	232	101%
Náilon	221	111%

Stauffer e Holtz (1995) utilizaram duas areias, uma bem graduada e outra com graduação uniforme, com o mesmo diâmetro médio de grãos, e estudaram seus comportamentos mecânicos quando reforçadas com fibras de polipropileno contínuas e cortadas (aglomeradas). As fibras tinham comprimento de 100 mm e foram adicionadas com um teor de 0,2%. A análise do comportamento mecânico foi feita através do teste de compressão triaxial consolidado-drenado. A Figura 2.2, mostra a curva tensão *versus* deformação obtida no ensaio triaxial com tensão de confinamento de 50 kPa.

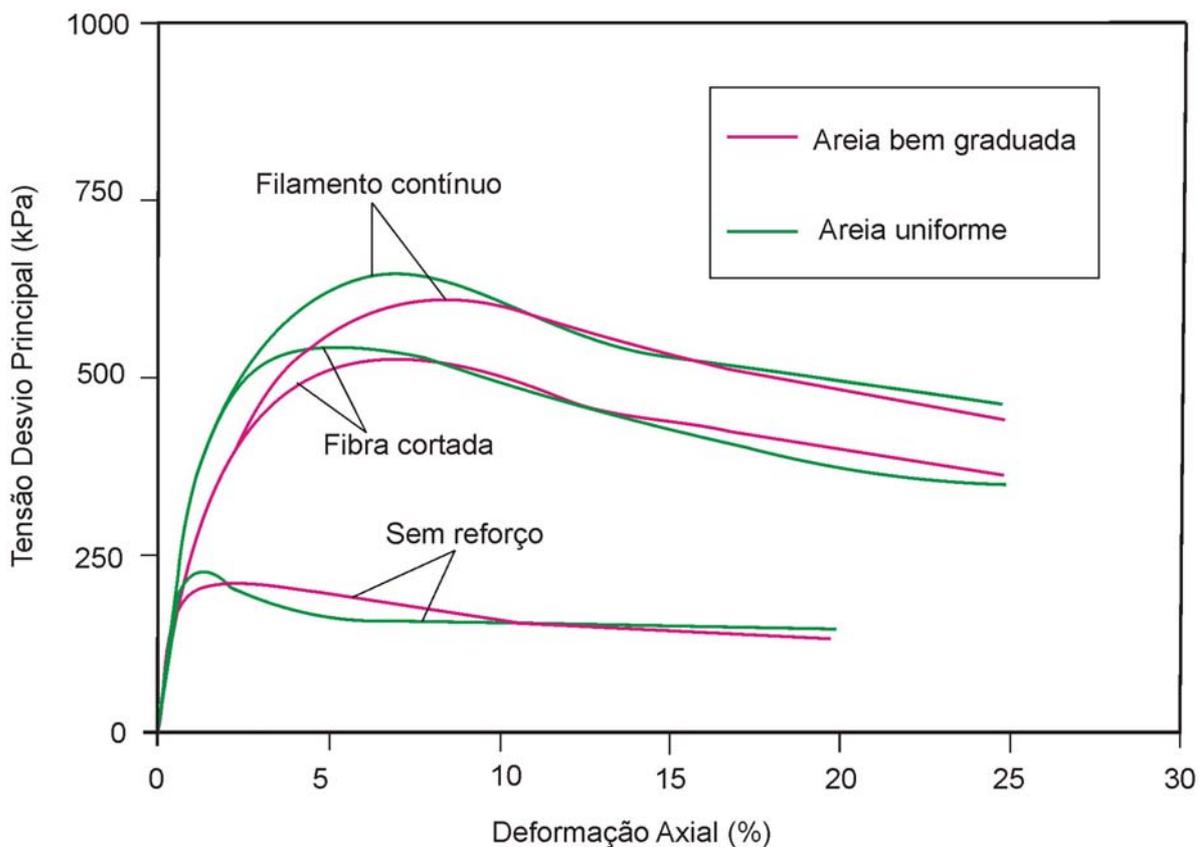


Figura 2.2: Curvas tensão *versus* deformação obtida com tensão de confinamento de 50 kPa (STAUFFER e HOLTZ, 1995).

Observa-se que para ambas as areias a inclusão de fibras aumentou a tensão desvio de pico. O autor afirma que tal comportamento da curva tensão-deformação é característico de solos reforçados com fibras curtas distribuídas aleatoriamente.

2.2.2.3. Resistência Pós-ruptura

A inclusão de fibras faz com que, de maneira geral, a ruptura da matriz torne-se mais dúctil. A curva tensão-deformação resulta em uma curva mais suavizada, com menor inclinação após o pico.

Consoli et. al. (1998), utilizaram fibra de vidro e cimento para estabilizar uma areia siltosa. Obtiveram então a curva tensão-deformação com o ensaio de

compressão triaxial. Como resultado observou-se que a resistência pós-pico é influenciada pela adição de fibra, utilizando-se ou não o cimento. A Figura 2.3 mostra o gráfico tensão *versus* deformação de todas as misturas estudadas com a tensão de confinamento de 20 kN/m².

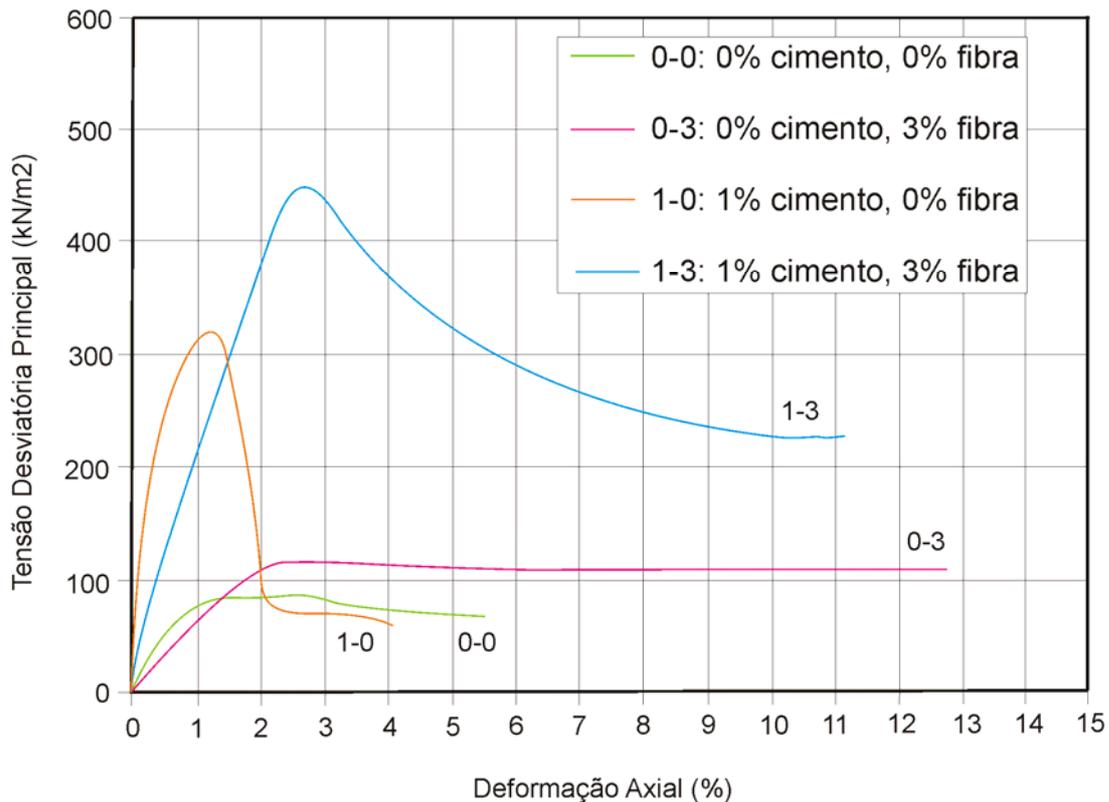


Figura 2.3: Curva tensão *versus* deformação obtida no ensaio triaxial com tensão de confinamento de 20 kN/m² (CONSOLI et. al., 1998).

2.2.2.3. Resistência à Compressão Diametral

É intuitivo pensar que a adição de fibras em um solo melhora seu comportamento no ensaio de compressão diametral devido à alta resistência a tração apresentada pela fibra. Todavia Specht et. al (2002) afirmam que neste ensaio a resistência da fibra pode não ser mobilizada devido ao baixo nível de deformação apresentado. Portanto o ensaio beneficiaria fibras mais rígidas, que mobilizam sua resistência a menores deformações.

2.2.2.4. Módulo de Resiliência

Specht et. al. (2002) estudaram o efeito da adição de duas fibras de polipropileno em um solo residual de arenito artificialmente cimentado. O programa experimental contempla, dentre outros ensaios o ensaio de resiliência. Os autores observaram que o valor do módulo de resiliência diminuiu com o acréscimo de fibras, e atribuem isto ao fato de estarem inserindo um material menos rígido em uma matriz de solo-cimento.

2.2.3. FATORES QUE AFETAM O COMPORTAMENTO DO FIBROSSOLO

É complexo o mecanismo que rege o comportamento de interação entre o solo e o reforço. Isto devido as inúmeras variáveis envolvidas no comportamento e que podem influenciar de forma significativa. Várias combinações de variáveis foram testadas por diferentes autores (TEODORO, 1999; TRINDADE et. al., 2004 e CONSOLI et. al., 2005), sempre comparando o solo reforçado com o não reforçado para que se possam avaliar as mudanças ocorridas com a adição do reforço.

2.2.3.1. Tensão Confinante

Maher e Gray (1990) executaram 180 ensaios triaxiais em diversas areias para avaliar a interação solo-fibra, e dentre as variáveis estava a tensão de confinamento. Os resultados obtidos foram que as curvas entre tensão principal de ruptura e tensão confinante deram uma reta bilinear como mostra a Figura 2.4. A

tensão em que ocorre a mudança de inclinação é denominada tensão crítica de confinamento (σ_{crit}). Quando a tensão confinante é menor que a tensão crítica de confinamento acontece o deslizamento da fibra o que provoca um aumento do ângulo de atrito do solo. Se a tensão confinante for maior do que a tensão crítica de confinamento, as tensões de cisalhamento na interface entre o solo e a fibra ficam igual ou maior a resistência à tração da fibra, e o ângulo de atrito permanece praticamente paralelo ao ângulo de atrito obtido utilizando-se o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Este mesmo fenômeno da tensão crítica de confinamento também é observado por Gray e Ohashi (1983).

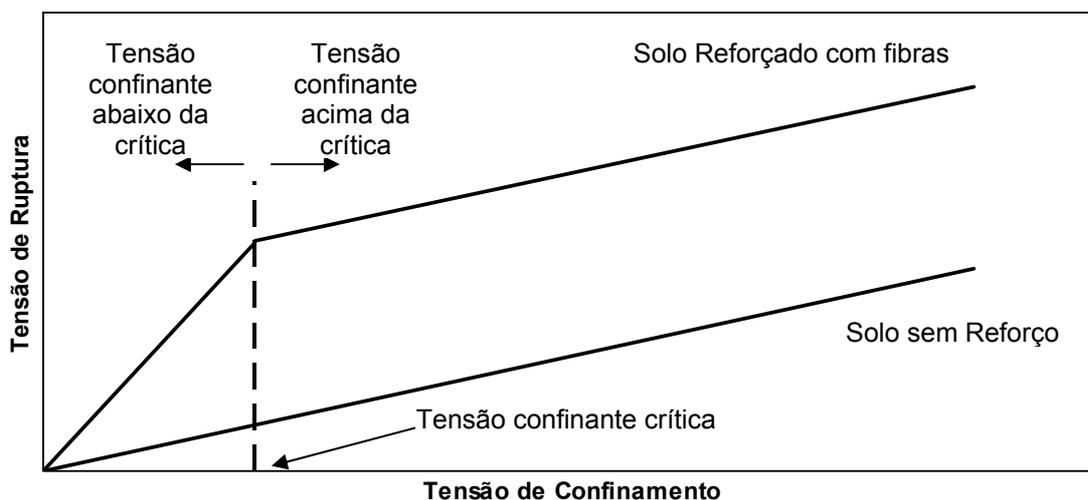


Figura 2.4: Efeito da tensão confinante observado por Maher e Gray (1990).

Maher e Ho (1993) executaram um total de 120 testes triaxiais drenados em uma areia com adição de cimento e fibras de vidro. Houve variação do teor e comprimento da fibra e da tensão de confinamento. Os teores utilizados foram de 0,5%, 1%, 2%, e 3%, já os comprimentos foram de 0,25; 0,50; 0,75 e 1 polegada. As tensões de confinamento utilizadas foram de 0, 100, 200 e 300 kPa. Os resultados dos ensaios indicam um aumento na tensão desvio de pico quando a fibra é adicionada. A magnitude do aumento varia com os diferentes teores, comprimentos

e tensões de confinamento utilizadas. A Figura 2.5 mostra a variação desta magnitude com relação aos diferentes teores de fibra nas várias tensões de confinamento com comprimento constante. Na Figura 2.6 pode-se observar a variação da mesma magnitude com relação às diferentes tensões de confinamento para os diferentes comprimentos com teor constante obtidas pelos autores.

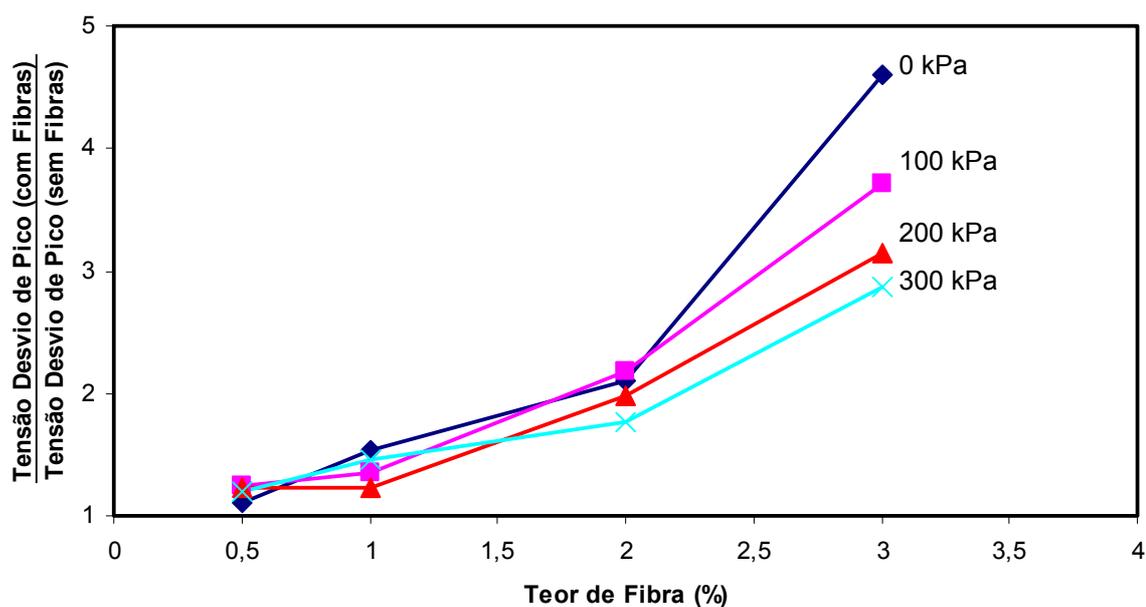


Figura 2.5: Efeito da adição de fibras na tensão desvio de pico (MAHER e HO, 1993).

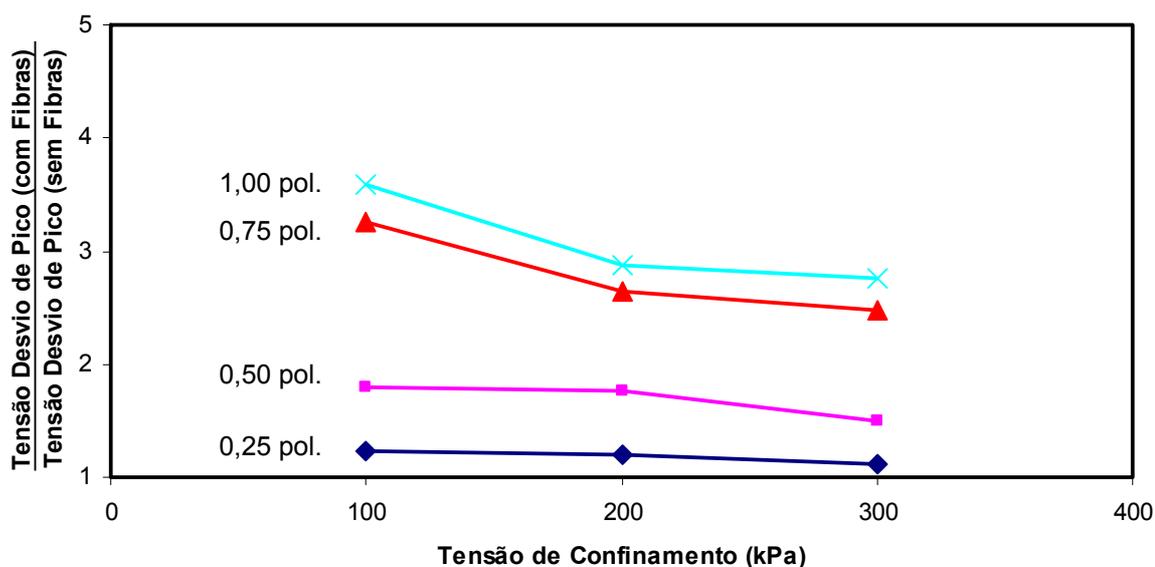


Figura 2.6: Efeito da tensão de confinamento na tensão desvio de pico (MAHER e HO, 1993).

Em ambos os gráficos é possível observar que o efeito da inclusão da fibra é mais pronunciado para tensões de confinamento mais baixas, maiores teores e maiores comprimentos.

2.2.3.2. Teor de Fibra

O teor de fibra é um importante fator a ser considerado quando se estuda o comportamento do fibrossolo. No geral constatou-se, utilizando ensaios triaxiais, que o aumento do teor de fibra faz com que aumente a resistência de pico e diminua a perda de resistência pós-pico, aumentando a ductibilidade do compósito, isto acontece até chegar a um teor tal de fibra que dificulte a homogeneização e/ou compactação da mistura (NATARAJ e McMANIS, 1997; CASAGRANDE e CONSOLI, 2002; TRINDADE et. al., 2006).

Casagrande e Consoli (2002) utilizaram ensaios triaxiais, com 60 kN de tensão confinante, para observar, dentre outros fatores, como o acréscimo de fibras de polipropileno com 24 mm de comprimento poderia influenciar no comportamento de uma areia siltosa. Utilizaram os teores de 0,25%, 0,5% e 0,75% de fibras com relação ao peso de solo seco. Com teores maiores que 0,75% os autores afirmam que houve dificuldade na mistura e compactação do fibrossolo. Com base nos resultados concluiu-se que o acréscimo na presença das fibras aumenta a resposta última do material. A tensão desvio, que no solo sem reforço era de 200 kPa para 20% de deformação axial (critério de parada do ensaio), passou para 800 kPa no teor de 0,75% de fibra. O compósito também apresentou um comportamento marcante de enrijecimento para deformação axial acima de 20%. Também houve influência na variação volumétrica para os dois teores mais altos de fibras, ocasião

em que o material ficou mais compressível. Fenômeno este que não foi observado para o teor de 0,25%.

Rafalko et. al. (2007) utilizaram uma argila preparada para apresentar um CBR de 2% no ramo úmido e acrescentaram reforços de diversos tipos. Uma fibra de polipropileno fibrilada (FP), uma fibra de náilon e uma fibra de álcool polivinílico (PVA) estão entre os reforços estudados. A Tabela 2.5 mostra as características das fibras.

Tabela 2.5: Características das fibras.

FIBRA	COMPR. (mm)	ESP. (mm)	DIÂM. (mm)	DENS.	RESIST À TRAÇÃO (GPa)	MÓD. DE ELAST. (GPa)
FP	19,0	0,025	-	0,91	0,67	4,0
Náilon	19,0	-	0,033	1,16	0,90	5,2
PVA	8,4	-	0,041	1,30	1,40	-

Corpos-de-prova foram moldados com diversos teores de fibra e submetidos ao ensaio de compressão simples. A Figura 2.7 mostra a variação que a resistência à compressão simples sofre conforme aumenta-se o teor de fibra. Nota-se que o aumento da porcentagem de fibra acarreta em um aumento na resistência à compressão simples.

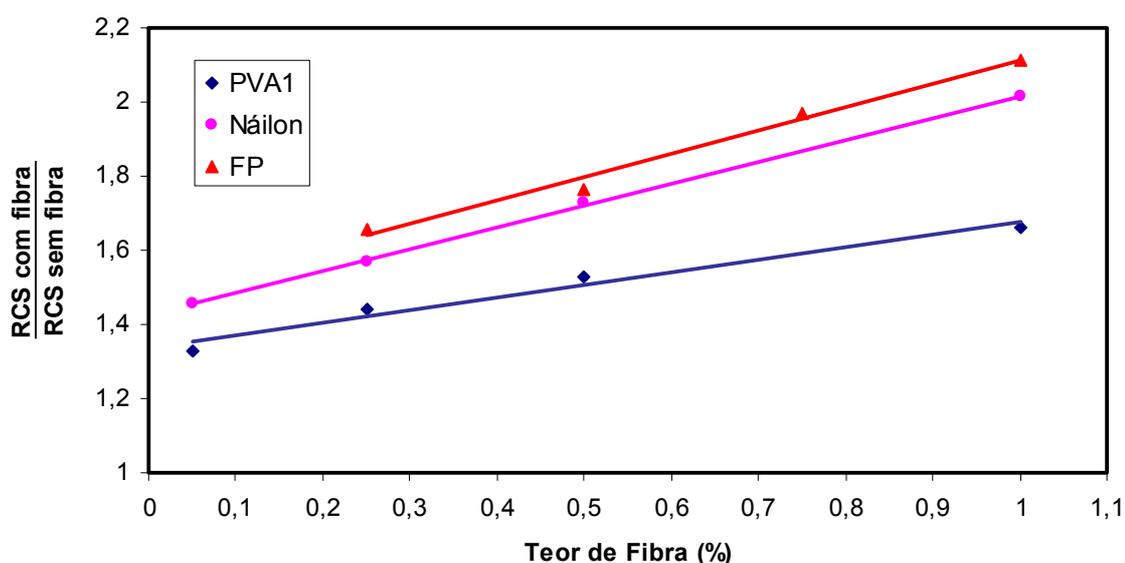


Figura 2.7 – Aumento na resistência à compressão simples com relação ao teor de fibra (RAFALKO et. al., 2007).

2.2.3.3. Geometria da Fibra

As características geométricas da fibra são fatores importantes para entender as mudanças que ocorrem com o solo quando o reforço é adicionado. É normal estudar-se a influência da geometria da fibra através do índice de aspecto, que nada mais é do que a razão entre comprimento da fibra e diâmetro (L/D). Quanto maior o índice de aspecto maior a área superficial da fibra o que possibilita maior interface entre solo e fibra, aumentando-se então o atrito solo-fibra (MAHER e GRAY, 1990).

Maher e Ho (1993) fizeram vários testes dentre compressão triaxial cíclica e estática e compressão diametral com uma areia cimentada com inclusão de fibras de vidro. O cimento foi adicionado no teor de 4%. Os comprimentos das fibras utilizados foram de 0,25; 0,50; 0,75 e 1 polegada. Foi observado nos resultados dos ensaios que o aumento do comprimento da fibra faz com que: o aumento da resistência de pico seja mais pronunciado em baixas tensões de confinamento, aumente a capacidade de absorção de energia do compósito, aumente tanto o intercepto de coesão como o ângulo de atrito e aumente a resistência à tração.

Specht (2000) trabalhou com solo-cimento acrescido de dois tipos de fibras de polipropileno, uma extensível e outra inextensível. As fibras tinham 12 e 36 mm de comprimento. Outra diferença geométrica estava na espessura das fibras, a mais extensível tinha 23 μm enquanto a outra tinha 278 μm . Ele afirma que o reforço mostrou-se mais efetivo na resistência à compressão não confinada quando foram utilizadas fibras mais compridas. A melhoria máxima obtida foi de 40% com relação a matriz cimentada sem reforço. Na compressão diametral o compósito mostrou perda de resistência à tração quando acrescido de fibras. Observou-se ainda nos

resultados do mesmo ensaio que a geometria influencia de modo diferente fibras com diferentes extensibilidades. A fibra mais extensível é mais influenciada pelo comprimento e a fibra mais rígida pelo teor. A diferença de influência também pode ser encontrada na análise do módulo de resiliência obtido no mesmo trabalho, pois o aumento do comprimento aumenta somente o módulo de resiliência da fibra mais rígida.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

3.1.1. SOLO

A escolha do solo a ser coletado foi baseada na pesquisa de doutorado de Takeda (2006). O autor estudou 72 solos que abrangeram todo o interior do Estado de São Paulo. Os solos foram coletados de taludes de rodovias do interior do estado ou de potenciais jazidas localizadas nas proximidades.

Dentre os solos de Takeda (2006), o escolhido para o estudo foi a amostra número 28. A escolha baseou-se nos resultados da caracterização do material que pode ser encontrado na bibliografia já citada, que o qualificou como um SAFL segundo a metodologia MCT (DER/SP – M 196-89). Após a coleta do solo para a presente pesquisa, os ensaios de caracterização foram refeitos e a premissa que o material é um SAFL foi confirmada.

A amostra em questão é proveniente do talude da rodovia SP-300, do trecho entre Pirajuí e Cafelândia na altura do quilômetro 400 com coordenadas S 21° 57'51" e W 49° 27' 39,3".

3.1.1.1. Massa Específica dos Sólidos e Limites de Atterberg

Os procedimentos utilizados no ensaio para a determinação da massa específica dos sólidos estão descritos na norma "Determinação da Massa Específica" – NBR 6508 (1984). Já para a determinação do limite de liquidez, do limite de plasticidade e do limite de contração foram seguidos os procedimentos que estão nas normas "Solo – Determinação do Limite de Liquidez" – NBR 6459 (ABNT, 1984), "Solo – Determinação do Limite de Plasticidade" – NBR 7180 (ABNT, 1984) e DNER – ME 087/94 – "Solo – Determinação dos fatores de contração", respectivamente.

Os resultados obtidos nos ensaios anteriormente citados estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Massa específica e limites de Atterberg.

ρ_s	LL	LP	IP	LC
2,651 g/cm ³	31%	18%	13%	30%

3.1.1.2. Granulometria

A análise granulométrica da amostra foi realizada através do ensaio de granulometria conjunta, peneiramento e sedimentação, segundo a norma NBR 7181 (ABNT, 1984). Na Figura 3.1 está apresentada a curva granulométrica obtida no

ensaio. De acordo com a norma citada o material é constituído de 21% de argila, 14% de silte e 65% de areia.

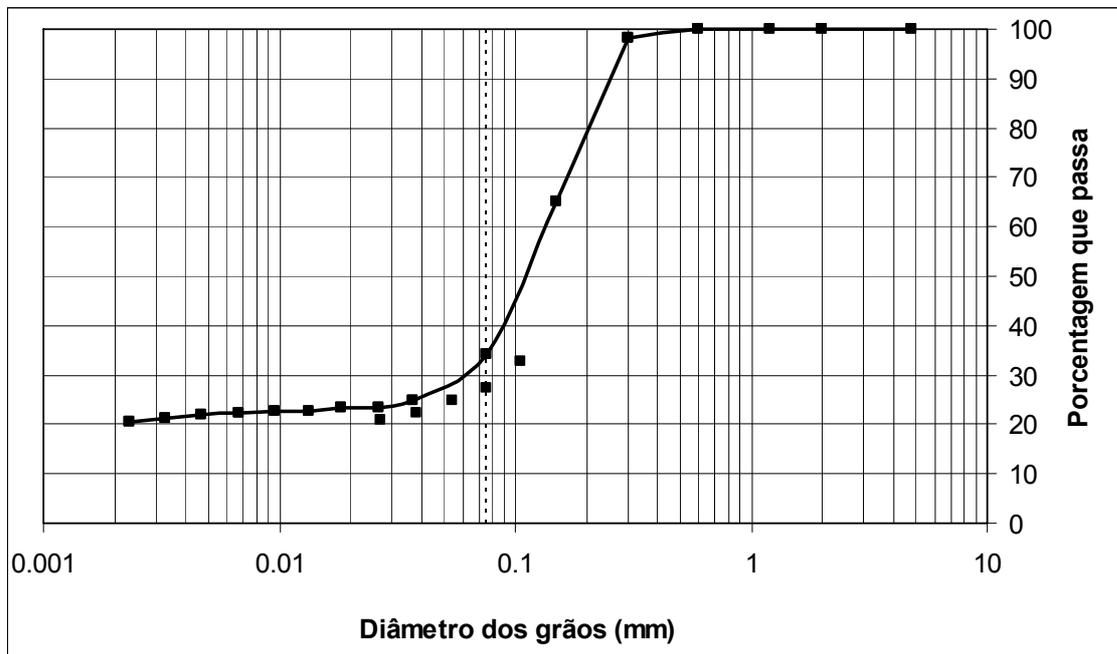


Figura 3.1: Curva granulométrica do solo.

3.1.1.3. Ensaio da Metodologia MCT

Os solos foram submetidos aos ensaios de Mini-MCV, perda de massa por imersão, Mini-CBR e retração. As normas seguidas para execução do ensaio foram a DNER – ME 228/94 – “Solos – Compactação em equipamento miniatura”, DNER – ME 256/94 – “Solos compactados com equipamento miniatura – Determinação da perda de massa por imersão”, DNER – ME 254/97 – “Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão” e DNER – ME 258/94 – “Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV”. Os resultados dos ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão estão apresentados a seguir, na Tabela 3.2. O gráfico da classificação MCT com a localização do solo se encontra na Figura 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros e índices obtidos nos ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão.

c'	d'	Pi	e'
1,22	17,89	0%	1,04

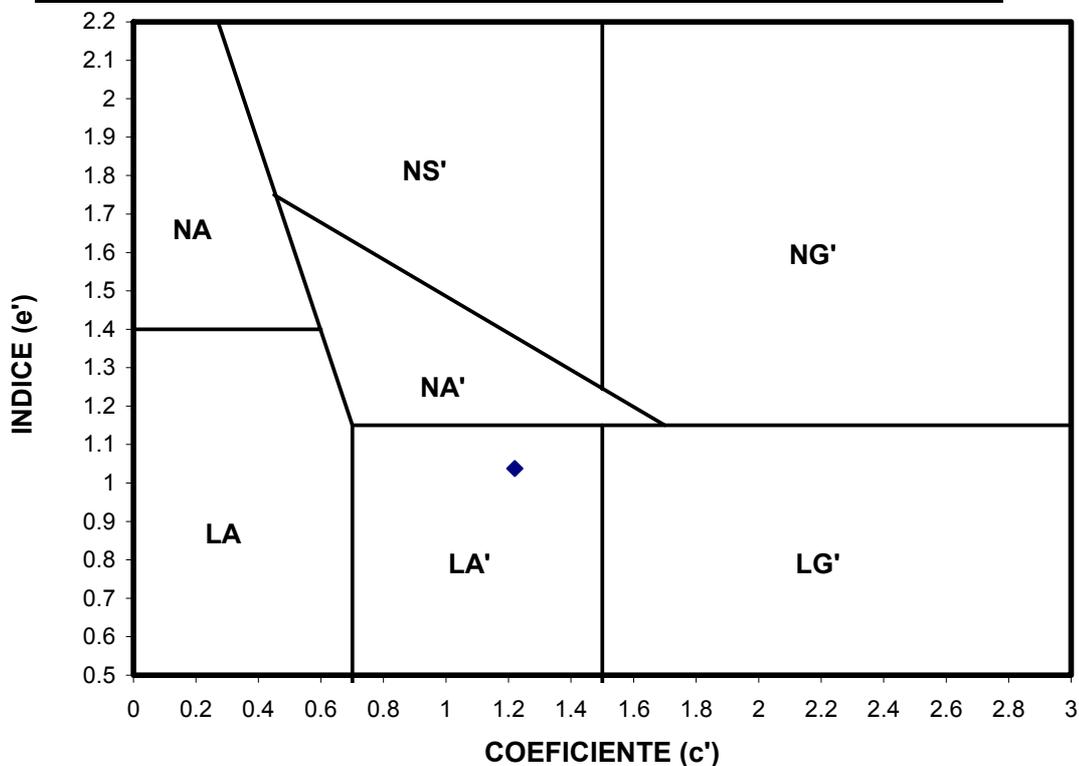


Figura 3.2: Localização do solo no gráfico da classificação MCT.

O “Manual de Normas” do DNER (1991) especifica limites para Mini-CBR sem imersão, perda de suporte, expansão e contração do solo para que este possa ser utilizado como base de solo arenoso fino laterítico para pavimento. Os resultados obtidos com o ensaio de Mini-CBR, assim como as exigências do DNER para a utilização de um solo como base de solo arenoso fino laterítico para pavimento podem ser encontrados na Tabela 3.3. Comparando-se os valores admissíveis do DNER com os resultados obtidos nos ensaios, conclui-se que o solo está apto a ser utilizado como base de solo arenoso fino laterítico para pavimento.

Tabela 3.3: Especificações do DNER para base de solo arenoso fino laterítico (DNER, 1991) e valores correspondentes para o solo pesquisado.

EXIGÊNCIAS MECÂNICAS E HIDRÁULICAS	VALORES ADMISSÍVEIS	RESULTADOS OBTIDOS
Mini-CBR sem imersão	$\geq 40\%$	59%
Perda de suporte no Mini-CBR por imersão em relação ao Mini-CBR sem imersão	$\leq 50\%$	27%
Expansão com sobrecarga padrão	$\leq 0,3\%$	0%
Contração	0,1 a 0,5%	0,2%
Coefficiente de Infiltração	10^{-2} a 10^{-4} cm $\sqrt{\text{minuto}}$	Não determinado

3.1.1.4. Classificação

O solo foi classificado segundo a HRB (Highway Research Board), USCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) e MCT. Para se classificar segundo a HRB e o Sistema Unificado utilizaram-se os resultados dos ensaios de granulometria e limites de consistência. Os resultados dos ensaios próprios para a classificação MCT então apresentados no item 3.1.1.3. A Tabela 3.4 apresenta as classificações do solo que se enquadra como um solo areno siltoso (A-2-6), areno argiloso (SC) e arenoso laterítico (LA') segundo a HRB, USCS e MCT, respectivamente.

Tabela 3.4: Classificação segundo HRB, USCS e MCT.

HRB	USCS	MCT
A-2-6 – Areno Siltoso	SC – Areno Argiloso	LA' – Arenoso Laterítico

3.1.2. FIBRAS

Para este estudo foram utilizadas fibras de vidro e fibras de polipropileno. Os dois tipos de materiais foram escolhidos de maneira a permitir uma comparação entre o desempenho dos mesmos, tendo em vista que possuem comportamentos

mecânicos diferentes. De acordo com os fabricantes a fibra de vidro é menos deformável que a fibra de polipropileno.

Ambas as fibras são quimicamente inertes, imputrescíveis e têm excelente resistência alcalina, sendo, portanto, aplicáveis no solo sem modificações químicas.

3.1.2.1. Fibra de Vidro

A fibra de vidro foi utilizada na pesquisa com os comprimentos de 13 e 24 mm. A primeira foi fornecida pela Owens Corning e a segunda foi fornecida pela Fibertex Louveira Produtos Têxteis Ltda. Em ambos os casos a fibra é comercializada na forma de feixes, conforme ilustra a Figura 3.3. Cada feixe é composto por inúmeros filamentos e suas características podem ser encontradas na Tabela 3.5, cujos dados foram fornecidos pelos respectivos fabricantes.



Figura 3.3 – Fibra de vidro.

Tabela 3.5 – Especificações da fibra de vidro.

DIÂMETRO (μm/filamento)	COMPR. (mm)	FILAMENTOS POR FEIXE	TÍTULO (dtex/feixe)	DEF. NA RUP. (%)	MÓD. DE ELAST. (GPa)
23	24	4.000	23.100	2,2 a 2,5	7,3
13	13	400	4.270	Não fornecido	Não fornecido

* O título é a grandeza que representa a espessura do filamento na indústria têxtil e sua unidade é o dtex (1dtex = 1g/10.000m) ou o denier (1 denier = 1g/9.000m).

3.1.2.2. Fibra de Polipropileno

Dois tipos de fibras de polipropileno foram utilizadas na pesquisa: uma microfibras com a superfície lisa e o diâmetro de 18 μm , e a outra com superfície corrugada e o diâmetro de 100 μm . As fibras foram fornecidas por duas empresas: a Fitesa S.A., que forneceu a microfibras lisa com 12 mm de comprimento e a fibra corrugada, e a Huesker International que forneceu a microfibras lisa com 30 mm e comprimento. A fibra corrugada é comercializada com o comprimento de 50 mm, sendo que para a pesquisa ela foi recortada manualmente no comprimento de 12 mm. As Figuras 3.4 e 3.5 mostram a microfibras lisa e a fibra corrugada já recortada no comprimento que foi utilizada na pesquisa, respectivamente. A Tabela 3.6 mostra as características das fibras com os dados que foram fornecidos pelos respectivos fabricantes.



Figura 3.4 – Microfibras de polipropileno lisas.



Figura 3.5 – Fibras de polipropileno corrugadas.

Tabela 3.6 – Especificações das fibras de polipropileno.

TIPO	DIÂMETRO (µm)	COMPRIMENTO (mm)	TÍTULO (dtex)	DEF. NA RUP. (%)	MÓD. DE ELAST. (GPa)
Lisa	18	30	3,3	80	3
Lisa	18	12	3,3	80	3
Corrugada	100	12**	100,0	25	4

** Originalmente com 50 mm de comprimento

3.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A seguir são apresentados os procedimentos adotados para os ensaios executados para se alcançar o objetivo da pesquisa.

3.2.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Vários autores afirmam que a massa específica máxima e o teor de umidade ótimo para a compactação para o solo reforçado com fibras têm pouca variação se comparado ao solo não reforçado (NATARAJ e McMANIS, 1997; FEUERHAMEL, 2000). Para verificar esta afirmação, o ensaio de compactação foi executado com o solo não reforçado e com o solo reforçado com três teores de fibra de vidro com 24 mm de comprimento e três teores de fibra de polipropileno com 12 mm de comprimento.

Os procedimentos do ensaio estão descritos na norma DNER-ME 129/94. Foi utilizada a energia intermediária para a execução do ensaio, visto que esta representa um tráfego médio e já foi utilizada por outro autor (CROCKFRD et. al., 1994).

3.2.2. COMPOSIÇÃO DA MISTURA

Na pesquisa variou-se o material, o comprimento e o teor de fibra. Quanto ao material foi escolhida uma fibra de vidro e uma de polipropileno. A justificativa para a escolha dos materiais está no item 3.1.2. O teor de fibra a ser utilizado no compósito foi escolhido com base no estudo de outros autores (MAHER e HO, 1993; MONTARDO et. Al., 2001; TRINDADE et. al., 2004). Maher e Ho (1993) constatam

que usando 3% de fibra de vidro obtiveram a maior resistência de pico no ensaio triaxial convencional. Montardo et. al. (2001) utilizaram vários tipos de fibras, dentre elas a fibra de vidro. Constataram que a inclusão de 1% de fibra de vidro aumentou a resistência à ruptura se comparada com o solo não reforçado. Trindade (2004) observa que com teor de 0,25% de fibra de polipropileno foi obtida a máxima resistência à compressão simples.

A escolha do comprimento também baseou-se em relatos de outros trabalhos para se chegar a uma conclusão, dando-se preferência a comprimentos já comercializados sempre que possível. Casagrande e Consoli (2002) utilizaram fibras de polipropileno com os comprimentos de 6, 12 e 24 mm para reforçar uma areia siltosa. Ensaio de compressão triaxial foram executados para se observar a influência do comprimento da fibra. Foi constatado que houve acréscimo da resistência para todos os comprimentos, e que o aumento da resistência com a deformação axial acontece em função do índice aspecto (L/D), ou seja, da razão entre o comprimento de fibra (L) e o seu diâmetro (D). Os resultados indicaram que, quanto maior o índice aspecto, maior a taxa de crescimento da resistência a grandes deformações axiais. Montardo et. al. (2001) utilizaram várias fibras para reforçar uma areia fina com granulometria uniforme, dentre os reforços estava a fibra de vidro. Mantendo-se o teor constante foram utilizadas fibras de dois comprimentos: 6,4 e 25,4 mm. Como resultado obteve-se que a fibra aumentou a tensão desvio de ruptura obtida no ensaio triaxial de forma mais pronunciada para comprimentos de fibras maiores.

Na presente pesquisa escolheu-se utilizar as fibras de vidro com os teores de 0,5%, 1% e 1,5%, nos comprimentos de 13 e 24 mm já para a de polipropileno escolheu-se os teores de 0,20%, 0,40% e 0,60%, com os comprimentos de 12 e 30

mm. Nos dois casos os teores de fibra são medidos com relação ao peso de solo seco.

3.2.3. MOLDAGEM E SECAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA

O solo e as fibras foram pesados com resolução de 0,01 gf, e a água foi medida na precisão de 1 ml. A quantidade de fibra adicionada foi definida em relação ao peso do solo seco. O peso de água foi determinado em relação ao peso da mistura solo-fibra seca. O processo de mistura deu-se reunindo-se preliminarmente o solo e a água acrescentando a fibra após a homogeneização destes e homogeneizando novamente. Esta ordem evitou que os feixes de fibras de vidro se desfiassem e facilitou a homogeneização da distribuição de fibras na mistura.

Para a compactação dos corpos-de-prova a serem utilizados nos ensaios mecânicos as misturas eram previamente acondicionados em sacos plásticos hermeticamente fechados por 24 horas para a homogeneização da umidade. Maiores explicações para o procedimento de secagem pode ser encontrado no item 3.2.5.3 e no Capítulo 4, no item 4.1.2.

A moldagem foi feita de forma estática em 3 e 5 camadas para os corpos que mediam 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura e 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, respectivamente.

Finalizada a moldagem os corpos de prova foram deixados ao ar por 24 horas para secagem e logo após envoltos em papel filme e armazenados em câmara úmida por um período de 48 horas a fim de homogeneizar a umidade.

3.2.4. ENSAIO QUALITATIVO DE RETRAÇÃO

Os ensaios qualitativos de retração foram feitos com a finalidade de avaliar se a inclusão de fibras afetaria na retração do solo. O ensaio consiste em moldar-se uma pastilha de solo com diâmetro conhecido e submetê-la a um processo de secagem observando a ocorrência de fissuras por retração e variação do diâmetro. A amostra usada para o ensaio foi previamente destorroada e passada na peneira nº 200 (# 0,42 mm). A Figura 3.6 mostra os apetrechos usados na execução do ensaio. O solo foi umedecido até umidades entre 27% e 32%, atentando-se a obter boa trabalhabilidade do material, para então crescer-se, aos poucos, a fibra, espatulando-se a mistura em uma cuba de vidro. Depois de homogeneizada a mistura, foram moldadas as pastilhas em moldes de PVC com dimensões de 18,1 cm de diâmetro e 3 cm de altura sobre uma base de vidro liso. A pastilha foi acondicionada em estufa ventilada à 60°C por um período de 12 horas, posteriormente tomaram-se três medidas de diâmetro. O ensaio foi aplicado em todas as misturas de fibrossolo e para o solo sem reforço, com três repetições para cada situação.



Figura 3.6: Apetrechos utilizados no ensaio qualitativo de retração

3.2.4. ENSAIOS MECÂNICOS

3.2.4.1. Ensaio de Compressão Simples

Do ensaio de compressão simples obteve-se a curva tensão-deformação do compósito. Para tanto utilizou-se uma prensa devidamente instrumentada com um LVDT para a aplicação de uma carga axial no corpo-de-prova. A norma seguida foi a NBR 12770 (ABNT, 1992). Os corpos de prova mediam 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, e foram moldados conforme procedimento já descrito no item 3.2.3. Todas as misturas foram submetidas a este ensaio, sendo que para cada situação foram ensaiados, no mínimo, 3 corpos-de-prova. A prensa utilizada foi da marca Wykeham-Ferrance, pertencente ao laboratório de Geotecnia da EESC/USP e a velocidade de deformação foi de 1,27 mm/min.

3.2.4.2. Ensaio de Compressão Diametral

O ensaio de compressão diametral ou tração indireta consiste em ensaiar o corpo-de-prova sem confinamento e com uma carga de compressão ao longo de um plano diametral aplicada através de dois frisos de carga opostos, produzindo então uma tensão de tração ao longo do plano vertical com a finalidade de se obter a resistência última à tração. Neste ensaio utilizaram-se corpos-de-prova semelhantes aos do ensaio de compressão simples, com as mesmas dimensões e procedimentos de moldagem. Também eram idênticos o número de repetições e a velocidade de deformação.

3.2.4.3. Ensaio de Compressão Triaxial Cíclico

Os ensaios de compressão triaxiais cíclicos foram utilizados para se obter o módulo de resiliência dos materiais estudados. Foi moldado um corpo-de-prova para cada situação que media 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, seguindo-se o procedimento descrito no item 3.2.3. O procedimento de ensaio pode ser encontrado na norma “*Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*” (AASHTO Designation: T 307-99).

Para a realização dos ensaios triaxiais cíclicos foi usada uma prensa pneumática pertencente ao Laboratório de Pavimentos da EESC-USP.

O equipamento utilizado, que é mostrado na Figura 3.7, possui um sistema de ar comprimido que permite aplicar as pressões desvio e confinante, tudo controlado pelo computador. Os pares de tensões a serem aplicadas são previamente programados para seguir o esquema descrito na norma já citada. O computador controla as pressões desvio e confinantes através de tensões elétricas que são enviadas para as válvulas proporcionais. A magnitude da tensão dita a magnitude da pressão a ser aplicada. Existem duas válvulas proporcionais, uma para a aplicação da pressão de confinamento e outra para a aplicação de carga axial. Os deslocamentos axiais são medidos por dois LVDT's internos à câmara, dispostos de lados opostos diametralmente do corpo-de-prova. A força aplicada é medida com uma célula de carga também interna a câmara. Todos os dados são armazenados no computador por um programa desenvolvido pelo professor Glauco Túlio Pessa de Fabbri na plataforma do LabView.

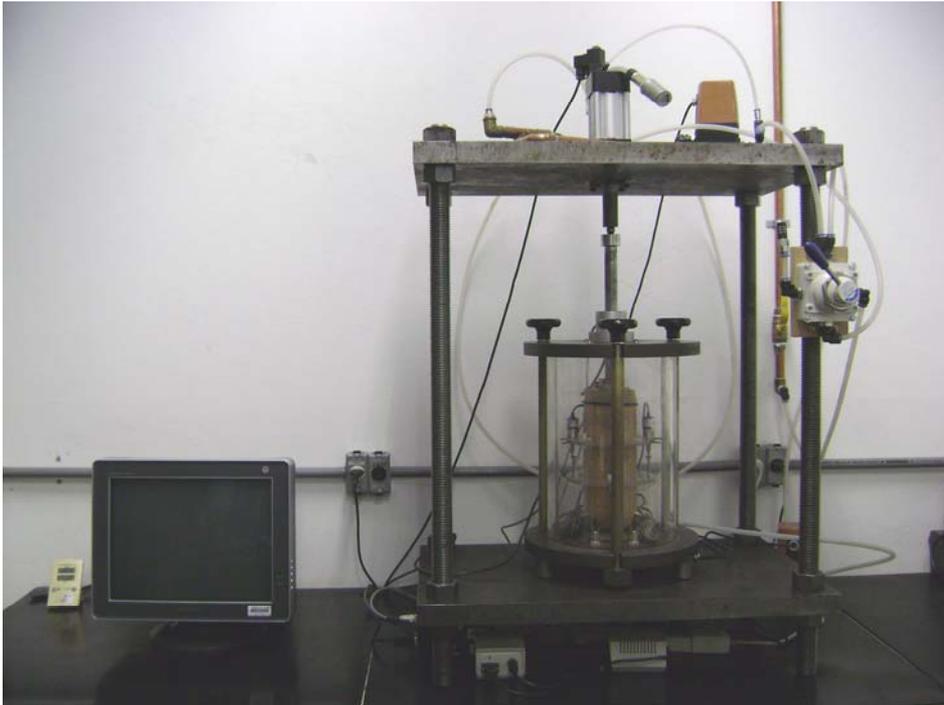


Figura 3.7 – Equipamento utilizado no ensaio de resiliência.

Os ensaios triaxiais cíclicos são realizados em duas etapas de aplicação de carga. A primeira delas é a fase de condicionamento da amostra, cuja finalidade é eliminar as deformações permanentes que ocorrem nas primeiras aplicações de carregamento, como também reduzir o efeito do histórico de tensões no valor do módulo de resiliência. Na segunda etapa são medidos os deslocamentos resilientes, os quais são utilizados na determinação do módulo de resiliência.

A Tabela 3.7 apresenta a seqüência de tensões usada para ensaio de materiais de base com seqüências definidas pela *AASHTO Designation: T 307-99*. A forma de carregamento usada é triangular, com período de carga de 0,1 s, e 0,9 s de repouso, ou seja, uma freqüência de 1 Hz.

Tabela 3.7: Seqüência de ensaios para base/sub-base segundo a AASHTO T307-99.

SEQUANCIA nº	TENSÃO CONF. σ_3 (kPa)	TENSÃO MÁX. σ_a (kPa)	TENSÃO DE CONTATO σ_c (kPa)	TENSAO DESVIO σ_d (kPa)	Nº DE APLICAÇÕES DE CARGA
0	103,4	103,4	10,3	93,1	500-1000
1	20,7	20,7	2,1	18,6	100
2	20,7	41,4	4,1	37,3	100
3	20,7	62,1	6,2	55,9	100
4	34,5	34,5	3,5	31,0	100
5	34,5	68,9	6,9	62,0	100
6	34,5	103,4	10,3	93,0	100
7	68,9	68,9	6,9	62,2	100
8	68,9	137,9	13,8	124,1	100
9	68,9	206,8	20,7	186,1	100
10	103,4	68,9	6,9	62,0	100
11	103,4	103,4	10,3	93,1	100
12	103,4	206,8	20,7	196,1	100
13	137,9	103,4	10,3	93,1	100
14	137,9	137,9	13,8	124,1	100
15	137,9	275,8	27,6	248,2	100

Para cada um dos níveis de tensão da seqüência de ensaio considerada são armazenadas as informações de todos os ciclos de carregamento, entretanto, apenas os últimos cinco ciclos são considerados nos cálculos.

Quatro modelos constitutivos foram calibrados para se avaliar o módulo de resiliência, são eles:

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (3.1)$$

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (3.2)$$

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (3.3)$$

$$M_R = k_1 \cdot p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (3.4)$$

em que M_R : módulo de resiliência;

σ_c : tensão confinante;

σ_d : tensão desvio;

θ : primeiro invariante de tensão;

τ_{oct} : tensão cisalhante octaédrica;

p_a : pressão atmosférica;

k_1 , k_2 e k_3 : constantes.

Porém, com base nos resultados mostrados no Capítulo 4, apenas para o modelo 3.3 será feita uma análise completa dos resultados.

Para facilitar a análise do módulo de resiliência optou-se por simular a aplicação do material na camada de base da estrutura de um pavimento de baixo custo, que está ilustrada na Figura 3.8. Supôs-se o carregamento de um eixo simples de uma roda carregado com uma carga de 8.200 kgf, o que resulta em 4.100 kgf por roda.

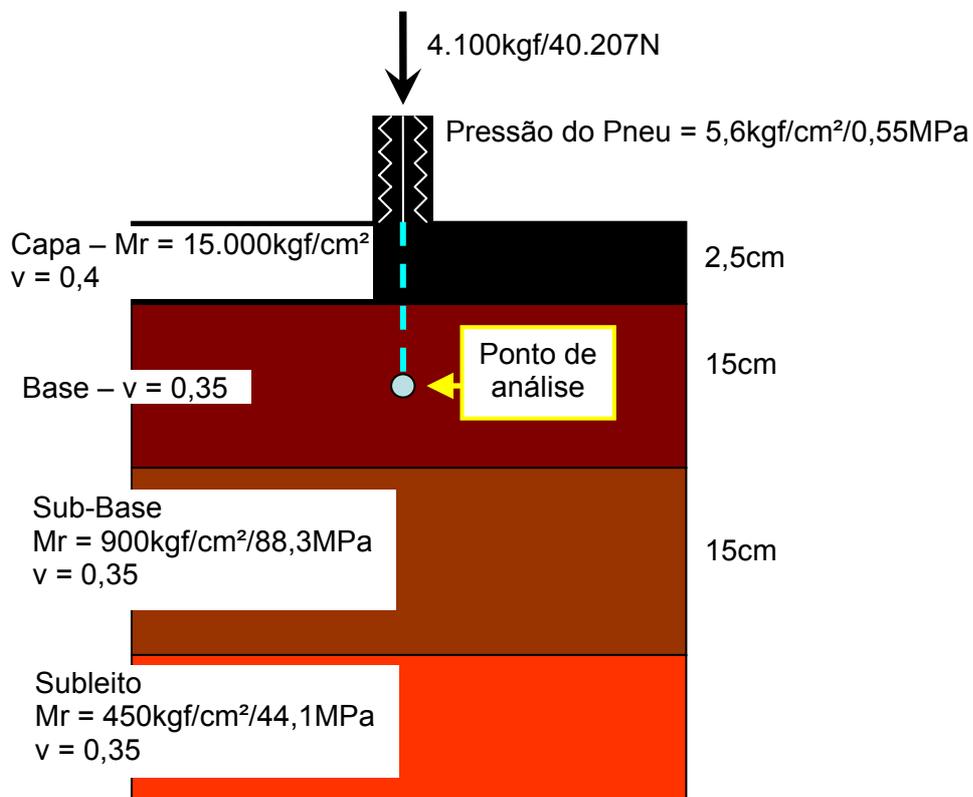


Figura 3.8: Estrutura do pavimento utilizado na simulação do módulo de resiliência.

Utilizou-se o programa Elsym 5 para se conhecer as tensões atuantes no ponto de análise, que se situava na profundidade média da camada de base. Optou-se por um módulo de resiliência qualquer para a primeira análise de tensões, conhecendo-se as tensões calculou-se o módulo de resiliência com o modelo composto e utilizou-se o resultado como nova entrada para o programa Elsym 5, que resultou em novas

tensões. Esta interação foi repetida até convergir para um erro menor que 5% entre o módulo de resiliência de entrada do programa e o obtido com o modelo.

3.2.5. ESTUDOS EXPLORATÓRIOS

Preliminarmente à realização dos ensaios mecânicos apresentados anteriormente foram realizados ensaios exploratórios para se definirem o tipo e as condições em que as fibras seriam incorporadas ao solo e também a influência da variação da umidade pós-compactação na resistência à compressão simples das misturas.

3.2.5.1. Escolha da Condição de Uso da Fibra de Vidro

Este estudo exploratório teve como objetivo definir o modo como a fibra de vidro deveria ser incorporada à mistura: na forma de feixes, como é comercializada, ou desfiada. Para chegar a uma conclusão idealizou-se utilizar o resultado do ensaio de compressão simples, com corpos-de-prova moldados conforme descrito no item 3.2.3, utilizando-se as dimensões de 10 cm de altura por 5 cm de diâmetro, na umidade ótima e massa específica máxima do solo sem reforço, já que a mudança dessas características é mínima com a inclusão da fibra (NATARAJ e McMANIS, 1997; FEUERHAMEL, 2000). Não foi realizado o processo de secagem e homogeneização da umidade para este estudo preliminar, portanto os corpos-de-prova foram rompidos na umidade ótima. Utilizou-se somente a fibra com 24 mm de comprimento no teor de 1%, variando-se somente a forma como a fibra era adicionada (feixe ou desfiada).

Para desfiar os feixes de fibras foi utilizado ar comprimido e um saco plástico com furos pequenos, feito com uma agulha de costura e em número suficiente para permitir a passagem de todo o ar comprimido que entrava no saco. A fibra em feixe era colocada dentro do saco para então a sua boca ser fechada em torno do bico da mangueira de ar comprimido, procedendo com a liberação do ar que fazia com que as fibras se desfiassem. O tempo em que as fibras era submetidos ao ar comprimido não passava de 5 segundos. A Figura 3.9 mostra como ficou a fibra após passar pelo processo descrito (imagem maior).



Figura 3.9: Fibra de vidro desfiada.

O resultado do estudo é discutido no Capítulo 4, Análise dos Resultados, e optou-se por incorporar a fibra de vidro na mistura na forma de feixe.

3.2.5.2. Escolha do Tipo de Fibra de Polipropileno

Como já foi explanado no item 3.1.2.2, Fibra de Polipropileno, dois tipos de fibras foram encontradas no mercado, uma lisa e outra corrugada. Devido ao curto tempo de desenvolvimento da pesquisa foi necessário optar por somente uma das fibras, portanto, este estudo teve como objetivo fornecer dados experimentais para que tal decisão pudesse ser tomada. Novamente o critério de decisão foi baseado nos resultados do ensaio de resistência à compressão simples. As duas fibras foram adicionadas no teor de 0,25% e mediam 12 mm de comprimento.

Seguindo o processo de moldagem descrito no item 3.2.3, os corpos-de-prova de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura foram moldados na umidade ótima e massa específica máxima do solo sem reforço e rompidos sem a realização do processo de secagem e posterior homogeneização da umidade.

Conforme discutido no Capítulo 4, Análise dos Resultados, decidiu-se utilizar a microfibril lisa de polipropileno.

3.2.5.3. Escolha do Processo de Secagem dos Corpos-de-prova

O estudo visou determinar um procedimento para a secagem do corpo-de-prova preliminarmente ao ensaio mecânico, para que este se aproximasse das condições de campo, na qual a norma DER/PR ES-P 08/05 (2005) determina que a base de SAFL, depois de compactada, seja seca ao ar até o desenvolvimento pleno das trincas de contração.

Para se conhecer o tempo de secagem ideal no laboratório, ou seja, o que proporciona maior resistência mecânica, fez-se um estudo variando-se o tempo de secagem. Para esta etapa utilizou-se a fibra de vidro de 24 mm com o teor de 0,5%.

Os corpos-de-prova foram moldados com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura moldados de forma estática, em três camadas, e posteriormente a compactação foram submetidos a secagem ao ar por 0, 1, 2 e 7 dias. Dois corpos-de-prova foram moldados para cada condição, sendo que um deles era rompido no ensaio de compressão simples logo após a secagem, e outro era envolto em papel filme e mantido durante 48 horas em câmara úmida com o propósito de homogeneizar a umidade, para só então ser rompido.

Conforme a análise apresentada no Capítulo 4, item 4.1.3, optou-se por utilizar um processo de secagem ao ar por 24 horas, seguido de 48 horas de homogeneização da umidade com o corpo-de-prova envolto em papel filme e mantido em câmara úmida.

3.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na pesquisa foi analisada a influência do tipo, teor e comprimento da inclusão de fibras no comportamento mecânico do solo. Esta análise se deu por meio de comparação de grandezas mensuráveis que representam o comportamento das misturas e são alcançados com os ensaios já descritos no item 3.2.4, Ensaios Mecânicos. A Tabela 3.8 relaciona as grandezas que foram investigadas com os ensaios em que são obtidas. Também foi avaliado o comportamento da curva de tensão-deformação que foi obtida através dos ensaios de compressão simples. Com isto foi possível expor o modo de ruptura do compósito (frágil ou dúctil).

Tabela 3.8 – Relação de grandezas obtidas com os ensaios mecânicos.

Ensaio	Grandezas
Compressão Simples	Módulo tangente inicial
	Módulo tangente máximo
	Resistência à compressão simples
	Deformação na ruptura
	Resistência pós-pico
Compressão Diametral	Resistência à compressão diametral
Triaxial Cíclico	Módulo de resiliência

3.3.1. ELIMINAÇÃO DE RESULTADOS

A análise estatística foi feita com base nas médias e desvio padrão. Para os ensaios de compressão não confinada, diametral e triaxial cíclico o teste de Grubbs foi aplicado para possibilitar a identificação de *outliers* (GRUBBS, 1969).

O teste de Grubbs só pode ser aplicado após a constatação de que a população pode ser representada por uma distribuição normal. Define-se então duas hipóteses:

- H_0 – Hipótese nula: não existe *outliers* nos resultados dos ensaios;
- H_1 – Hipótese alternativa: existe pelo menos um *outlier* nos resultados dos ensaios.

Testando-se repetidas vezes as hipóteses detecta-se um *outlier* por vez, eliminando-o, até que não haja mais *outliers*. O teste consiste em calcular um valor estatístico G , baseado nos valores máximos e mínimos da população, definido pela equação 3.5.

$$G = \frac{\max |Y_i - \bar{Y}|}{s} \quad (3.5)$$

Onde:

Y_i = valores máximos e mínimos dentro da população;

\bar{Y} = média da população;

s = desvio padrão dos resultados de um mesmo tratamento.

O valor estatístico G é então comparado ao $G_{\text{crítico}}$ obtido pela tabela do Anexo A entrando-se com os valores de número de repetições (n) e grau de confiança (α).

Um *outlier* é detectado quando $G > G_{\text{crítico}}$.

O grau de confiança adotado na pesquisa foi de 95%.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. ESTUDOS EXPLORATÓRIOS

Os estudos exploratórios tiveram a finalidade de elucidar questões no tocante à condição de uso da fibra de vidro, tipo de fibra de polipropileno e o procedimento de secagem dos corpos-de-prova antes dos ensaios mecânicos.

4.1.1. CONDIÇÃO DO USO DA FIBRA DE VIDRO

Como já explanado no item 3.2.5.1, Escolha da Condição de Uso da Fibra de Vidro, este estudo forneceu base para escolher se a fibra de vidro deveria ser incorporada ao solo em forma de feixe ou desfiada.

A Figura 4.1 mostra o aspecto do solo reforçado com 1% de fibra de vidro desfiada. Pode-se notar a formação de grumos e a concentração de fibras em algumas regiões da mistura, evidenciando a dificuldade de se obter uma boa homogeneização. Dificuldade esta que seria ainda maior se utilizado maiores teores.



Figura 4.1: Aspecto do fibrossolo.

Problemas ainda maiores foram encontrados para sacar o corpo-de-prova do molde cilíndrico. Sempre que retirado do confinamento, o corpo-de-prova se rompia. Nos planos de ruptura podiam ser observadas aglomerações de fibra tal como o ilustrado na Figura 4.2.



Figura 4.2: Detalhe da aglomeração de fibra no plano de ruptura.

Em contrapartida, quando foi utilizada fibra de vidro na forma de feixe, com igual teor e comprimento, não foram observadas as dificuldades relatadas anteriormente. Portanto, o uso da fibra de vidro na forma desfiada foi descartado.

4.1.2. ESCOLHA DO TIPO DE FIBRA DE POLIPROPILENO

Como já foi citado no Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, a ancoragem da fibra com a matriz se dá pelo atrito superficial. A fibra lisa tem um menor diâmetro apresentando uma maior superfície específica, já a fibra corrugada tem a vantagem de apresentar uma superfície mais rugosa, apesar de uma menor superfície específica. Portanto as duas fibras apresentam vantagens e desvantagens com relação à ancoragem, surgindo então a necessidade de se obter parâmetros para que possa ser feita a escolha por uma delas.

Utilizando-se o ensaio de compressão simples obteve-se a curva tensão-deformação de corpos de prova moldados com os dois tipos de fibra de polipropileno (lisa e corrugada). A Figura 4.3 mostra curvas 'tensões *versus* deformações' típicas das duas fibra em questão.

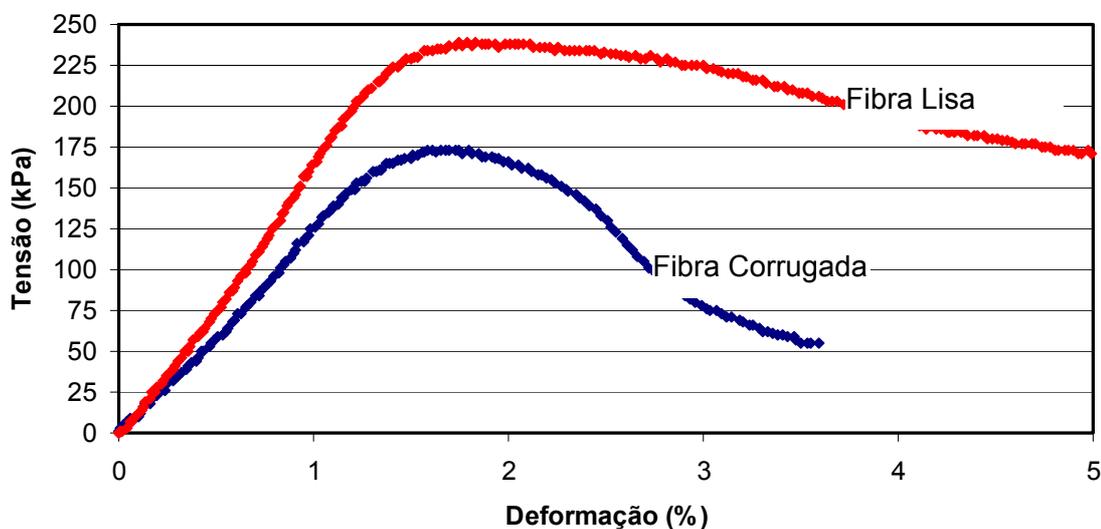


Figura 4.3: Curva típica 'tensão *versus* deformação' do solo reforçado com ambas as fibras de polipropileno.

Analisando-se a rigidez inicial, a tensão de ruptura e a resistência pós-pico fica claro que a fibra lisa leva vantagem em todos os quesitos, sendo, portanto, a escolhida para dar continuidade à pesquisa.

4.1.3. ESCOLHA DO PROCESSO DE SECAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Com a finalidade de se obter uma maior aproximação entre a condição de campo e de laboratório, pesquisou-se um tempo ótimo de secagem dos corpos-de-prova a serem utilizados nos ensaios mecânicos. A metodologia aplicada a este estudo é explicada no item 3.2.5.3, Escolha do Processo de Secagem dos Corpos-de-prova.

A Figura 4.4 mostra a variação da resistência à compressão simples com relação aos diferentes tempos de secagem e ao posterior tempo de homogeneização em câmara úmida por 2 dias. Fica evidente o pico de resistência utilizando-se o período de secagem de um dia. Este pode ser explicado por duas características intrínsecas do SAFL: a de apresentar grande rigidez quando seco e a de desenvolver microfissuras quando seco por longos períodos.

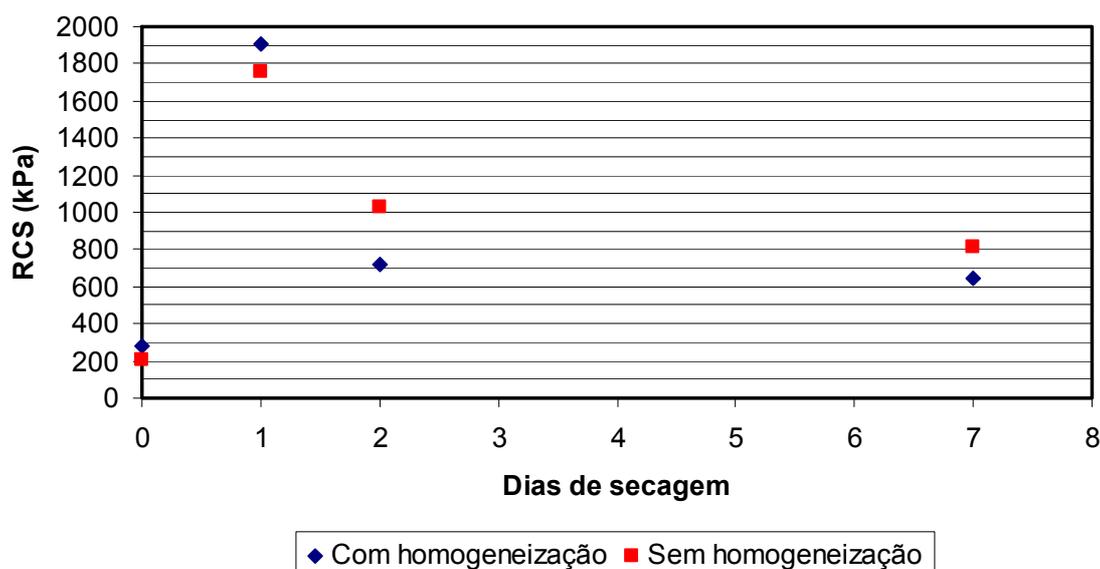


Figura 4.4: Variação da resistência à compressão simples em relação ao dias de secagem.

Também é possível observar que a homogeneização da umidade é benéfica para corpos-de-prova sem secagem e com um dia de secagem, mas pode comprometer a resistência quando o corpo-de-prova está mais seco. Isto pode ser atribuído ao fato de os corpos-de-prova mais secos terem ganho um pouco de umidade quando mantidos em câmara úmida, diminuindo assim a tensão de sucção, conforme mostram as medidas de umidade realizadas.

Com base nos resultados apresentados e discutidos optou-se por utilizar o processo de secagem de 1 dia com homogeneização de 2 dias.

4.2. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de compactação. Observando-se os valores obtidos para umidade ótima nota-se que o solo sem reforço tem os mesmos valores do solo reforçado com fibra de polipropileno e pouca diferença com relação ao solo reforçado com fibra de vidro, que foi levemente menor. O resultado encontrado está de acordo com a bibliografia que diz que não há

grandes diferenças entre a umidade ótima do solo sem reforço comparado com o solo reforçado (NATARAJ e McMANIS, 1997).

Tabela 4.1: Resultados obtidos no ensaio de compactação.

MATERIAL	MISTURA	ω_o (%)	$\rho_{m\acute{a}x}$ (g/cm³)
Solo <i>in natura</i>		11,40	1,995
Fibra de vidro	Solo + 0,5%	11,35	1,950
	Solo + 1,0%	11,35	1,950
	Solo + 1,5%	11,35	1,950
Fibra de polipropileno	Solo + 0,2%	11,40	1,950
	Solo + 0,4%	11,40	1,945
	Solo + 0,6%	11,40	1,935

As massas específicas máximas das misturas utilizando fibras foram bem próximas e abaixo do valor obtido com o solo sem reforço. Observou-se uma leve tendência ao decréscimo da mesma conforme se aumenta o teor de fibra de polipropileno. Apesar de as fontes consultadas apresentarem resultados discrepantes ao desta pesquisa (NATARAJ e McMANIS, 1997; FLETCHER e HUMPHRIES, 1991), o resultado é plausível, pois as fibras apresentam uma massa específica menor do que a do solo, o que conduz a uma diminuição da massa específica do compósito.

4.3. COMPRESSÃO SIMPLES

Os ensaios de compressão simples foram executados em uma prensa instrumentada de maneira a fornecer o desenvolvimento da curva ‘tensão versus deformação’ possibilitando a determinação da tensão de ruptura (RCS), deformação de ruptura (ϵ_{rup}), módulo tangente inicial (E_0) e módulo tangente máximo ($E_{m\acute{a}x}$).

A Figura 4.5 apresenta exemplos de quatro curvas ‘tensão versus deformação’ consideradas típicas. A ilustração corresponde ao ensaio do solo sem

fibras e reforçado com três teores de fibra de polipropileno de 12 mm de comprimento. Analisando-se a figura, nota-se que, no seu trecho inicial, as curvas dos materiais fibrosos mostram uma concavidade para cima indicando um ganho de rigidez com o aumento das deformações, seguindo-se uma inflexão, quando se inicia um novo trecho que se desenvolve até a ruptura, onde a rigidez decai para deformações crescentes. Observa-se ainda que a deformação correspondente ao ponto de inflexão cresce com o aumento do teor de fibras, sendo que para a curva do solo tal inflexão só é perceptível quando se amplia muito o seu trecho inicial. Não foi encontrado nenhum relato de comportamento semelhante na bibliografia consultada. Uma hipótese poderia ser levantada para explicar o fato: a existência de fissuras nos corpos-de-prova com fibras ao final da compactação que se fechariam com o desenvolvimento das deformações no primeiro trecho da curva. Problema semelhante foi relatado por Trindade et. al. (2004).

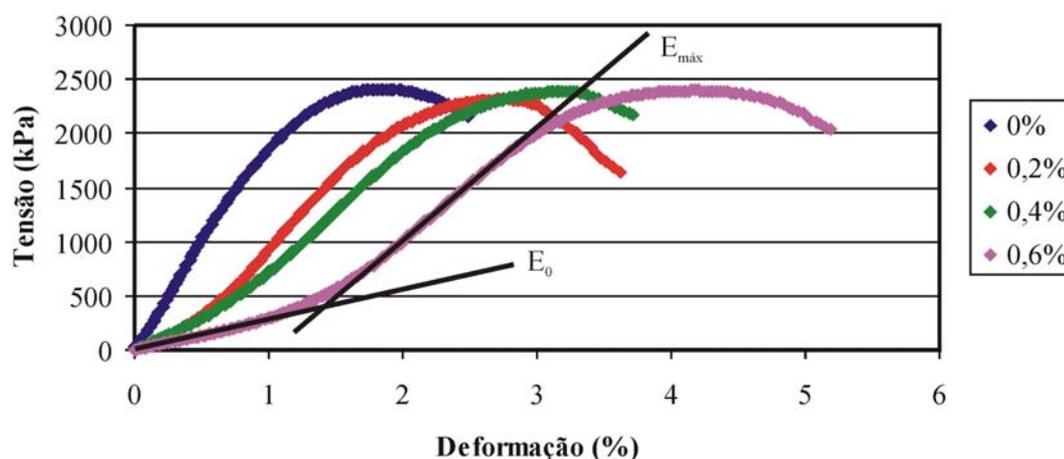


Figura 4.5: Exemplos de curvas 'tensão *versus* deformação' típicas com as indicações de E_0 e $E_{máx}$.

Esta hipótese é decorrente da constatação visual da ocorrência de fissuras ao final da compactação dos corpos-de-prova com inclusão de fibras. A Figura 4.6 apresenta corpos-de-prova correspondentes ao solo sem fibras (a) e reforçado com

três teores de fibra de polipropileno, 0,2% (b), 0,4% (c) e 0,6% (d). Analisando-se a figura, observa-se que o solo sem fibras não mostra fissuras, ao contrário dos demais, onde a severidade das fissuras agrava-se com o aumento do teor fibras, o que explicaria o fato do trecho inicial da curva 'tensão *versus* deformação' alongar-se para teores de fibra crescentes. Supõe-se ainda que a secagem após a compactação possa agravar o problema, pois proporciona o surgimento de novas fissuras à semelhança do que ocorre no campo.

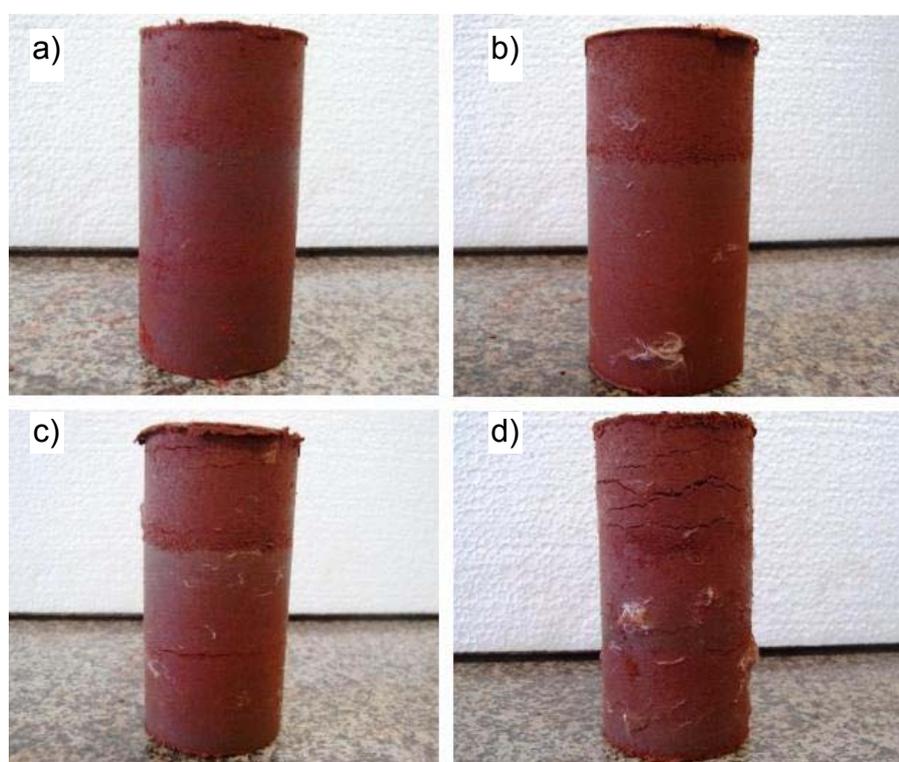


Figura 4.6: Corpos-de-prova com 0% (a), 0,2% (b), 0,4% (c) e 0,6% (d) de fibra de polipropileno de 12 mm de comprimento mostrando os diferentes níveis de fissuras.

Para o estudo da variação da rigidez com o teor de fibras, optou-se por analisar este aspecto através do exame de dois módulos de deformabilidade tangentes, o inicial (E_0), tomado a partir da origem da curva e o máximo ($E_{\text{máx}}$), tomado ao final da inflexão, conforme ilustrado na Figura 4.5 para o teor de 0,6% de fibra.

4.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A Figura 4.7 mostra a variação da RCS com o teor de fibra de polipropileno para os dois comprimentos de fibra. Analisando-a, é possível observar que a RCS não sofre variação significativa com a inclusão da fibra de polipropileno para nenhum dos comprimentos ou teores utilizados. Este resultado diverge da bibliografia consultada, que mostra que a inclusão da fibra de polipropileno concorre para o aumento da tensão de ruptura (Nataraj e McManis, 1997; Satoni et. al., 2001; Trindade et. al., 2004). Duas hipóteses poderiam ser levantadas para explicar este fato: a magnitude elevada da resistência proporcionada pela secagem prévia à realização dos ensaios e as fissuras nos corpos-de-prova com os maiores teores de fibra que ocorrem durante a compactação.

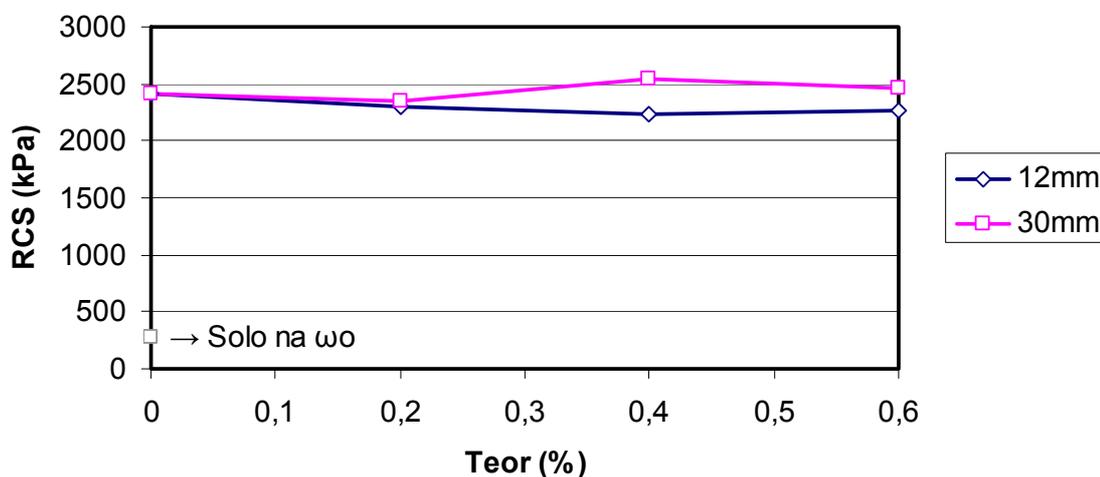


Figura 4.7: Variação da resistência à compressão simples das fibras de polipropileno de 12 e 30 mm de comprimento com relação ao teor de fibra.

Formulou-se a primeira hipótese baseando-se na comparação da RCS correspondente ao solo sem reforço na ω_0 e após a secagem, e no ganho de resistência devido à inclusão da fibra conforme relatado em pesquisa anterior

(Nataraj e McManis, 1997). Estes valores são respectivamente 270 kPa, 2.500 kPa e 250 kPa. Analisando-se os valores, observou-se que a resistência do solo sem reforço na ω_o tem a mesma ordem de grandeza do ganho de resistência devido à inclusão das fibras obtido na bibliografia, ou seja, a relação entre os dois valores é próxima de 1:1. Entretanto, a relação da resistência do solo sem reforço após secagem, condição analisada no presente estudo, com o suposto ganho devido a inclusão de fibras seria de 1:10, ou seja, o eventual ganho de resistência alcançaria cerca de 10% de 2.500 kPa, e assim, poderia confundir-se com o erro inerente ao ensaio e não ser detectado na análise. A fim de se confirmar ou refutar tal hipótese foram realizados alguns ensaios com corpos-de-prova na umidade ótima cujos resultados, assim como os respectivos resultados dos ensaios com secagem, podem ser encontrados na Tabela 4.2. Analisando-se a tabela, nota-se que a RCS na ω_o apresentou um acréscimo de 19% quando foi acrescida fibra de polipropileno, resultado que diverge do resultado obtido com a secagem que apresenta uma redução de 9%, mas corrobora com os resultados das bibliografias consultadas que afirmam que a inclusão da fibra aumenta a resistência última à compressão (RAFALKO et. al., 2007; STAUFFER e HOLTZ, 1995). Em termos absolutos o aumento da RCS na ω_o foi de 64 kPa, valor que equivale a 2,66% da resistência apresentada pelo solo sem reforço com secagem, o que confirma a primeira hipótese levantada.

Tabela 4.2: RCS das misturas na ω_o e as respectivas com secagem.

MISTURA	RCS COM SECAGEM	RCS NA ω_o
Solo <i>in natura</i>	2.410 kPa	333 kPa
Solo + 0,2% de Fibra de Polipropileno	2.302 kPa	397 kPa

A segunda hipótese é decorrente da observação de fissuras logo após a compactação dos corpos-de-prova com inclusão de fibras, como foi ilustrada na Figura 4.6, tem sua severidade acentuada com o aumento do teor de fibra. Esperar-se-ia que a resistência sofresse quedas mais expressivas para as maiores severidades de trincas, ou seja, uma queda de resistência aumentando com o aumento do teor de fibras. Entretanto, a RCS permanece constante para todos os teores de fibra, apontando para suposto um ganho mecânico devido à inclusão de fibras diretamente proporcional ao seu teor.

Analisando-se a tabela, nota-se que a RCS com o material na umidade ótima sofreu uma pequena queda quando acrescido de fibra de vidro, fato semelhante ao ocorrido com a secagem, porém em ambos os casos a queda não passa de 11%, valor que estaria inserido na variabilidade do ensaio.

A Figura 4.8 mostra a variação da RCS com o teor de fibra de vidro para os dois comprimentos utilizados. Analisando-se a figura é possível observar que a inclusão da fibra conduz ao decréscimo da resistência à compressão simples até o teor de 1%, que cresce para o teor de 1,5%, sem no entanto alcançar a RCS do solo sem reforço. Não há relato de comportamento semelhante na bibliografia consultada e as duas hipóteses descritas para a fibra de polipropileno não poderiam explicar o resultado observado, visto que o valor da diminuição da resistência neste caso, que alcança 1.000 kPa, extrapola a ordem de grandeza da variabilidade inerente ao resultado do ensaio, e não foi observado, a olho desarmado, o desenvolvimento de fissuras ao final da compactação dos corpos-de-prova para a fibra de vidro. Formulou-se então a hipótese de que a inclusão da fibra poderia influenciar no mecanismo que atua durante a secagem, aumentando a sucção no material e, conseqüentemente sua resistência. É sabido que para uma mesma variação de

umidade, materiais mais finos apresentam sucções mais elevadas. Neste caso, houve uma suspeita de que a inclusão das fibras, que substituem parte das partículas, poderia interferir no desenvolvimento da sucção, visto que o material teria a sua granulometria alterada, comportando-se como um material “menos fino” e, portanto, a secagem conduziria a valores de resistência menores. O aumento da resistência observado para o teor de 1,5% de fibra seria explicado em função deste maior teor contribuir mais para um aumento da resistência mecânica que o correspondente aos menores teores, compensando assim parcela do efeito negativo na resistência descrito anteriormente. Entretanto, assim como para a fibra de polipropileno, foram realizados ensaios com solos reforçados com 0,5% de fibra de vidro de 24 mm de comprimento em corpos-de-prova não submetidos à secagem. Neste caso também foi observado uma redução da RCS com a introdução de fibra, desqualificando a hipótese levantada anteriormente.

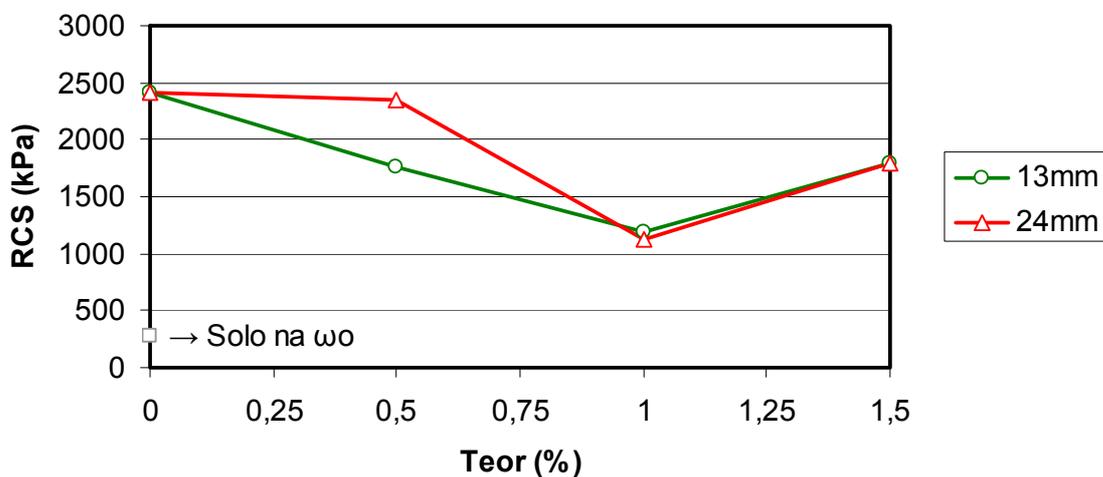


Figura 4.8: Variação da resistência à compressão simples das fibras de vidro de 13 e 24 mm de comprimento com relação ao teor de fibra.

Uma outra hipótese, baseada na ancoragem do reforço com a matriz, poderia corroborar para que a inclusão da fibra de vidro não tivesse o efeito positivo esperado. A ancoragem da fibra com a matriz é feita através do atrito superficial que

se desenvolve quando há alguma solicitação que mobiliza o reforço. Portanto a ancoragem é diretamente proporcional à superfície específica que a fibra apresenta. A rigidez da fibra também influi na ancoragem, visto que uma maior rigidez acarreta em mobilização do reforço com menor deformação da matriz. A fibra de vidro, que é utilizada na forma de feixes, tem baixa superfície específica e grande rigidez se comparada com a fibra de polipropileno, o que facilitaria o arrancamento do reforço, e assim maiores resistências só seriam alcançadas para teores elevados de fibra.

4.3.2. DEFORMAÇÃO DE RUPTURA

A Figura 4.9 apresenta a variação da deformação de ruptura com o teor de fibra de polipropileno para os dois comprimentos de fibra. Analisando-se a figura, nota-se que a adição da fibra conduz a maiores valores de deformação, sendo que o comprimento de 30 mm resulta em maiores deformações que o comprimento de 12 mm em todas as situações. Tomando-se o valor de ϵ_{rup} correspondente ao solo puro, existe um aumento desta variável de 44%, 84% e 144%, respectivamente para os teores de 0,2%, 0,4% e 0,6%, considerando-se a fibra de menor comprimento. Para a fibra mais longa, nas mesmas condições, o aumento é de 69%, 154% e 237%. Nos ensaios na umidade ótima, o solo sem reforço apresentou uma ϵ_{rup} de 2,0% enquanto que o solo reforçado com 0,2% de fibra de polipropileno com 12 mm de comprimento apresentou uma ϵ_{rup} de 2,20%, confirmando a tendência de aumento desta variável quando reforçado. Nataraj e McManis (1997) apresentam a curva tensão-deformação de uma argila que, sem a inclusão do reforço, tem uma deformação na ruptura de 2%, valor próximo do obtido nesta pesquisa, e com a

inclusão de 0,2% de fibras alcança a deformação de 4% corroborando com os resultados obtidos nesta pesquisa.

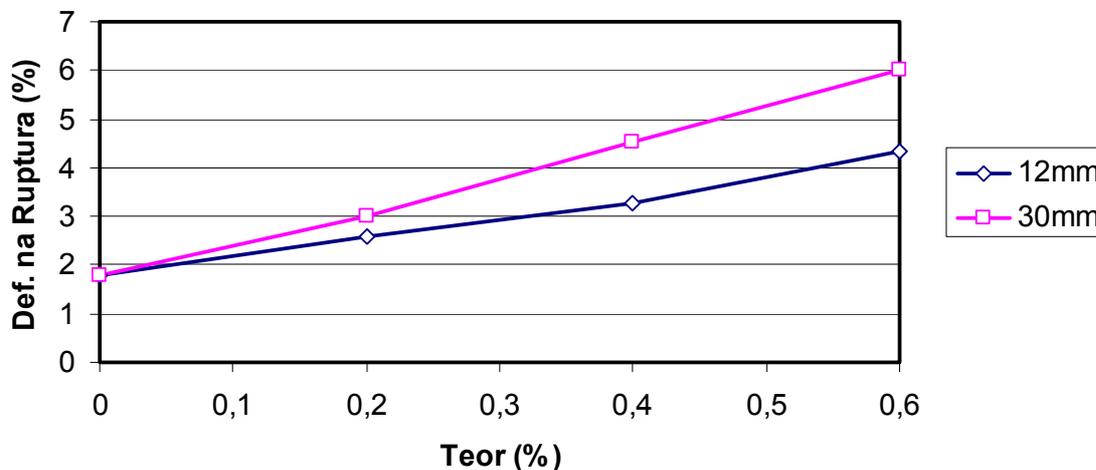


Figura 4.9: Deformação na ruptura das fibras de polipropileno de 12 e 30 mm de comprimento com relação ao teor de fibra.

A Figura 4.10 apresenta a variação da ϵ_{rup} com o teor de fibra de vidro para os comprimentos estudados. Analisando-se a figura, observa-se que para ambos os comprimentos existe um aumento da ϵ_{rup} com o crescimento do teor de fibra, embora, para a fibra de menor comprimento esta variação seja significativamente maior que para a fibra mais longa. Para a fibra de 13 mm, foram alcançados valores 20%, 65% e 140% maiores que o do solo sem reforço. Com a fibra mais longa, de 24 mm, o aumento foi mais tímido, cerca de 20% com a adição de 0,5% de fibra e 30% para os maiores teores. Na umidade ótima o acréscimo de 0,5% de fibra de vidro com 24 mm de comprimento não influenciou na ϵ_{rup} do solo. Não foram encontrados outros autores que executaram o ensaio de compressão simples com acompanhamento da deformação utilizando fibra de vidro como reforço de solos, porém o ensaio triaxial convencional mostra que a deformação de ruptura cresce com a inclusão da fibra, a exemplo de Consoli et. al. (1998) que obteve variações da ordem de 30% utilizando o teor de 3% de fibra de vidro.

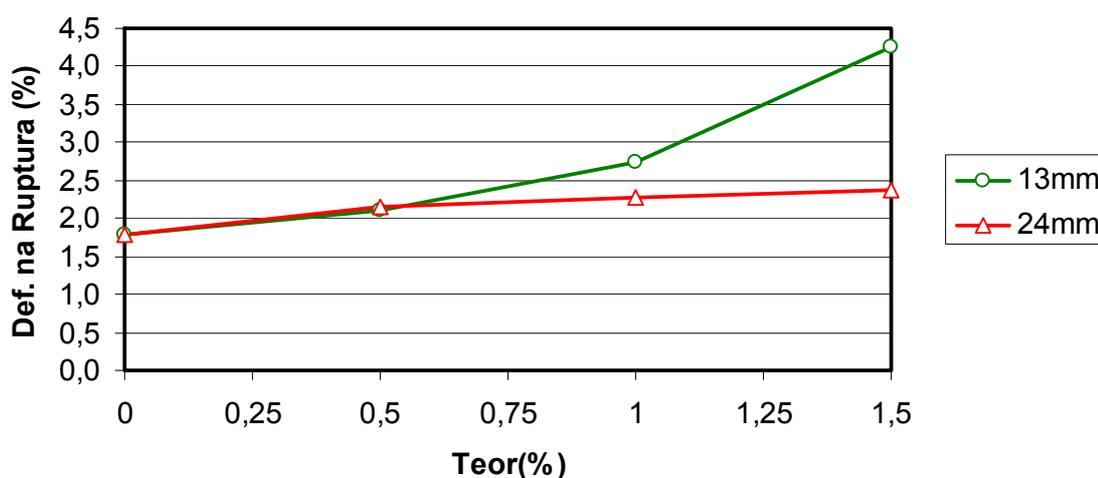


Figura 4.10: Deformação na ruptura das fibras de vidro de 13 e 24 mm de comprimento com relação ao teor fibra.

4.3.3. RIGIDEZ

A Figura 4.11 apresenta a variação do módulo tangente inicial com o teor de fibra de polipropileno. Analisando-a, observa-se que o E_0 diminui com a adição e o aumento do teor de fibra. Este comportamento corrobora a hipótese referente às fissuras destacada anteriormente, visto que a maior rigidez inicial corresponde ao corpo-de-prova sem reforço, que não apresenta fissuras, sendo que para os demais, a rigidez diminui com o aumento do teor de fibras, que coincide com o agravamento das fissuras. Destaca-se que a este efeito poder-se-ia somar o fato da fibra de polipropileno ocupar um grande volume na mistura, induzindo a uma perda da continuidade de eventuais vínculos cimentados, e assim contribuir também para a redução da rigidez inicial conforme relatado Montardo *et al.* (2001) para matrizes cimentadas.

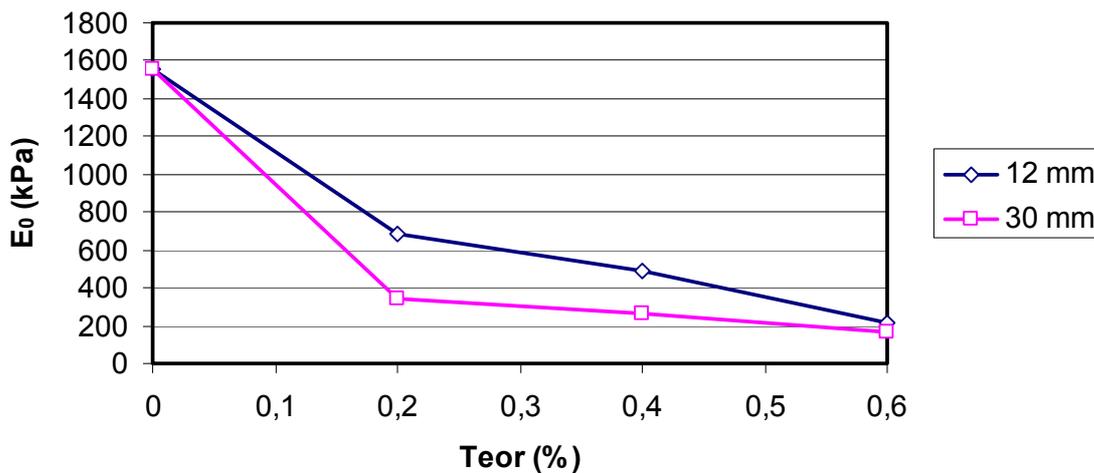


Figura 4.11: Variação do módulo tangente inicial para as misturas com fibras de polipropileno de 12 e 30 mm de comprimento com relação ao teor de fibra.

É importante destacar o valor muito elevado do módulo tangente inicial correspondente ao solo sem a adição de fibras, 1551MPa, decorrente do procedimento de secagem pós-compactação dos corpos-de-prova que procura simular o processo construtivo. Parente *et. al.* (2002) ensaiaram misturas solo-cimento constituídas com um solo laterítico com características semelhantes ao deste estudo e para o teor de 10% de cimento determinou valores de E_0 iguais a 741 e 981MPa, respectivamente para os tempos de cura de 7 e 28 dias em câmara úmida. Portanto, o SAFL após secagem apresenta uma rigidez 1,6 a 2,1 vezes superior à da mistura solo-cimento ensaiada.

A Figura 4.12 apresenta a variação do módulo tangente máximo com o teor de fibra de polipropileno. Analisando-a, observa-se que o comportamento do $E_{máx}$ repete o do E_0 , ou seja, a rigidez máxima diminui com a adição e o aumento do teor de fibra. Entretanto, comparando as variações de E_0 e $E_{máx}$, esta última é menor, fazendo supor que o efeito negativo das fissuras tenha se minimizado ou mesmo sido superado, restando apenas o mecanismo da perda da continuidade de eventuais vínculos cimentados devida ao grande volume ocupado pelas fibras.

Observa-se ainda que o comprimento da fibra não influencia a variação da rigidez máxima, ao contrário da rigidez inicial, cuja redução com o aumento do teor de fibras é maior para a fibra mais longa.

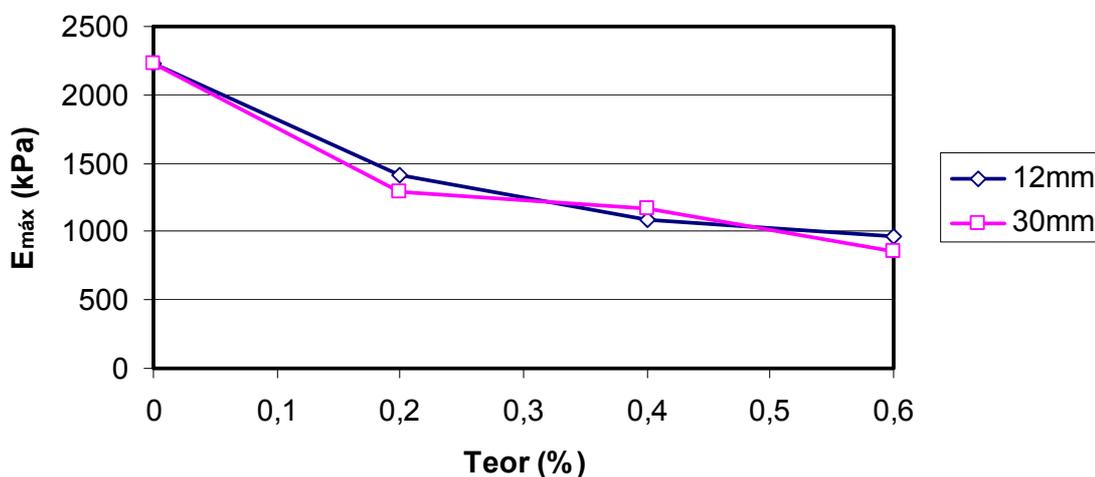


Figura 4.12: Variação do módulo tangente máximo para as misturas com fibras de polipropileno de 12 e 30 mm de comprimento com relação ao teor de fibra.

O comportamento do solo com fibra de vidro repete o comportamento observado anteriormente para a fibra de polipropileno e as explicações já levantadas também são aplicáveis neste caso. Assim, o módulo tangente inicial (E_0), conforme ilustra a Figura 4.13, reduz-se quando se adiciona ou se aumenta o teor de fibra de vidro, com variação coincidente para ambos os comprimentos.

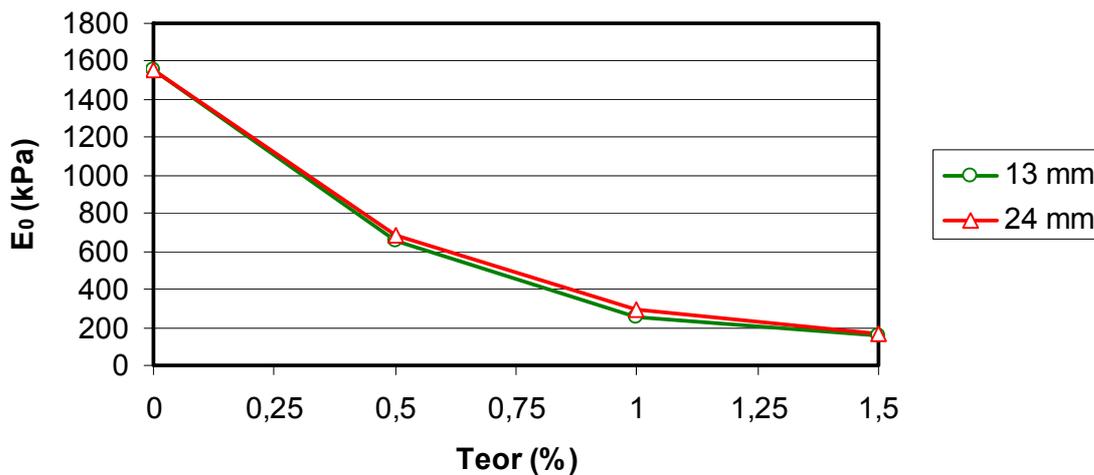


Figura 4.13: Variação do módulo tangente inicial para as misturas com fibras de vidro de 13 e 24 mm de comprimento com relação ao teor de fibra.

Comparando-se o E_0 obtido para as fibras de polipropileno e de vidro, observa-se para o teor máximo utilizado para cada uma delas, que os valores médios calculados a partir dos diferentes comprimentos, são muito próximos, 190 e 160 kPa, para o primeiro e o segundo material respectivamente. Consoli *et. al.* (1998) também constataram um decréscimo dos valores de E_0 com o aumento do teor de fibra de vidro a partir de resultados de ensaios convencionais de compressão triaxial.

A Figura 4.14 apresenta a variação do módulo tangente máximo com o teor de fibra de vidro. Analisando-a, observa-se que, no geral, a adição da fibra provoca uma redução nos valores de $E_{m\acute{a}x}$, assim como observado para E_0 . Entretanto, destaca-se o fato da adição de 0,5% da fibra mais longa não alterar a rigidez original do solo e do aumento do teor de 1% para 1,5% acarretar um pequeno aumento de rigidez, principalmente para a fibra mais longa. Comparando as variações de E_0 e $E_{m\acute{a}x}$ com a adição de fibra, esta última é menor, supõe-se que pelos motivos já levantados anteriormente para a fibra de polipropileno.

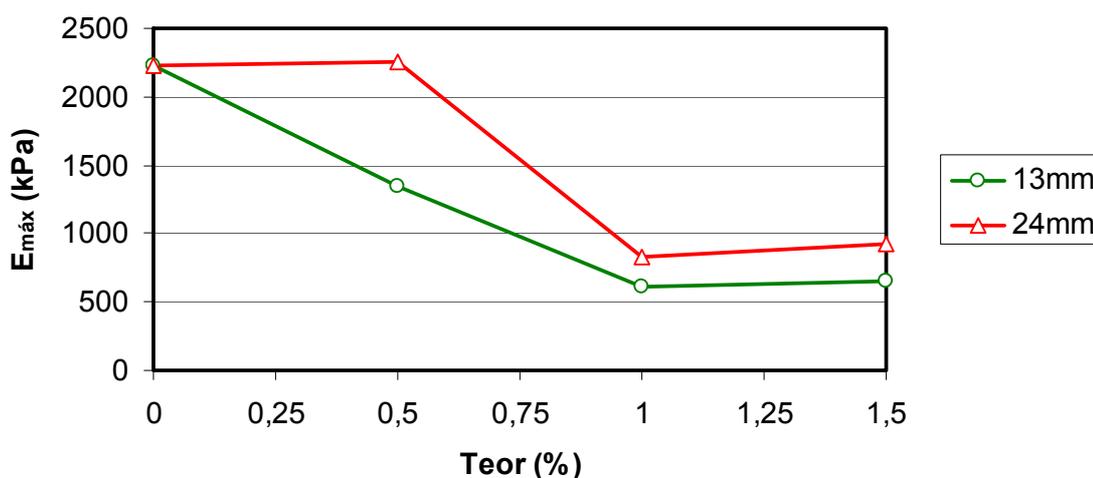


Figura 4.14: Variação do módulo tangente máximo para as misturas com fibras de vidro de 13 e 24 mm de comprimento com relação ao teor fibra.

4.4. ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Figura 4.15 mostra a variação da resistência à compressão diametral (RCD) com o teor de fibra de polipropileno para os comprimentos de 12 e 30 mm. Analisando-se a figura observa-se que as curvas correspondentes a ambos os comprimentos apresentam um comportamento análogo, com leve decréscimo da resistência para o teor de 0,2% de fibra, e aumento para os teores de 0,4% e 0,6%, alcançando valores maiores do que o obtido com o solo sem reforço. Pode-se observar ainda que os resultados da fibra mais longa foram superiores aos da fibra mais curta em todas as situações. Não foi encontrada nenhuma pesquisa que tivesse utilizado solo reforçado com fibra de polipropileno para dar suporte aos resultados encontrados. No entanto, ensaios feitos com solo-cimento-fibra apresentados por Specht et. al. (2002) mostram que se utilizando 7% de cimento e fibras de polipropileno com 12 mm de comprimento nos teores de 0,25%, 0,5% e 0,75%, obteve-se uma diminuição de 25% da RCD se comparado com a mistura sem fibra. Os autores alegam que devido ao baixo nível de deformação apresentado

no ensaio, as fibras não foram mobilizadas e que ao se adicionarem fibras muito extensíveis perdem-se nódulos de cimentação. A discrepância dos resultados desta pesquisa com os resultados dos autores pode estar vinculada às diferentes interações que as fibras têm com as duas diferentes matrizes.

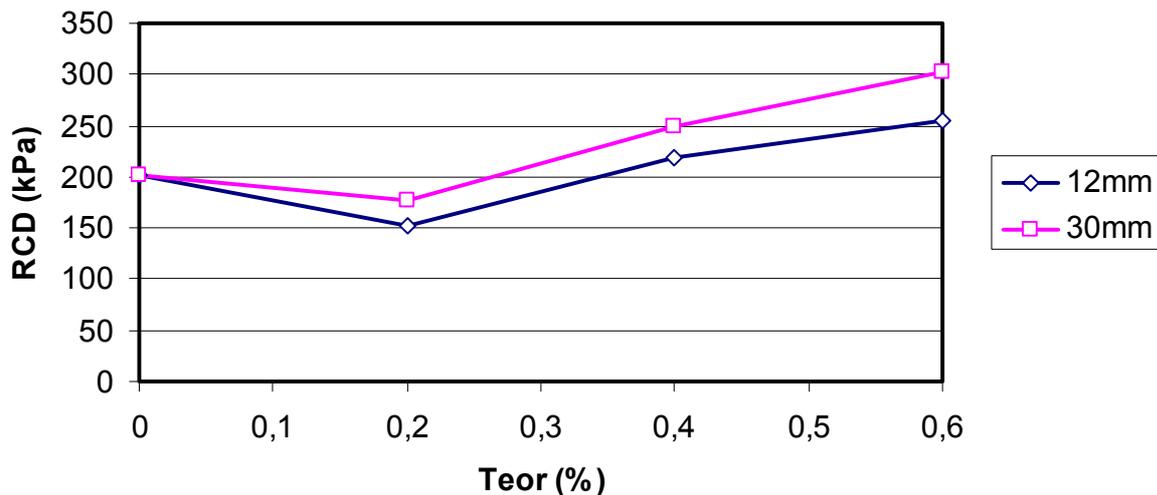


Figura 4.15: Variação da resistência à compressão diametral das fibras de polipropileno de 12 e 30 mm de comprimento com relação ao teor de fibra.

Como os corpos-de-prova para os ensaios de compressão diametral e compressão simples foram moldados seguindo-se o mesmo procedimento, o problema já citado, relativo à apresentação de fissuração nos corpos-de-prova, é comum aos dois ensaios. Porém, para a RCD há um incremento mais expressivo da variável que não aparece na RCS, supõe-se que este fato seja decorrente da elevada resistência à tração da fibra, cuja ação evidencia-se nos resultados dos ensaios de compressão diametral, onde o carregamento implica na extensão dos corpos-de-prova. Portanto, deduz-se que a perda de resistência proveniente da fissuração seja superada pelos benefícios mecânicos adquiridos com a adição de fibras de polipropileno.

A Figura 4.16 apresenta a variação da RCD com o teor de fibra de vidro com 13 e 24 mm de comprimento. Analisando-se a figura observa-se que a fibra de 13

mm de comprimento apresenta uma diminuição na resistência de 2% utilizando-se o menor teor e um aumento de 10% e 4,5% para os teores de 1,0% e 1,5%, respectivamente. Com a fibra de 24 mm de comprimento obteve-se queda na RCD de 4%, 0,6% e 3% para os teores de 0,5%, 1,0% e 1,5%, respectivamente. Portanto a RCD permanece praticamente constante para todos os teores e comprimentos, o que mostra que a melhora mecânica decorrente da inclusão das fibras supera as supostas perdas sofridas devido à perda de nódulos de cimentação no ensaio de RCS. Não foi encontrado nenhum autor que tivesse utilizado o ensaio de tração indireta para avaliar o comportamento mecânico da inclusão de fibras de vidro em um solo. No entanto, o ensaio foi utilizado por Maher e Ho (1993) para avaliar o comportamento de uma mistura de solo, 4% de cimento e fibra de vidro nos teores de 0,5% e 1%, que mostrou acréscimos de resistência de 112% e 175%, respectivamente, com relação ao valor correspondente à mistura sem fibra.

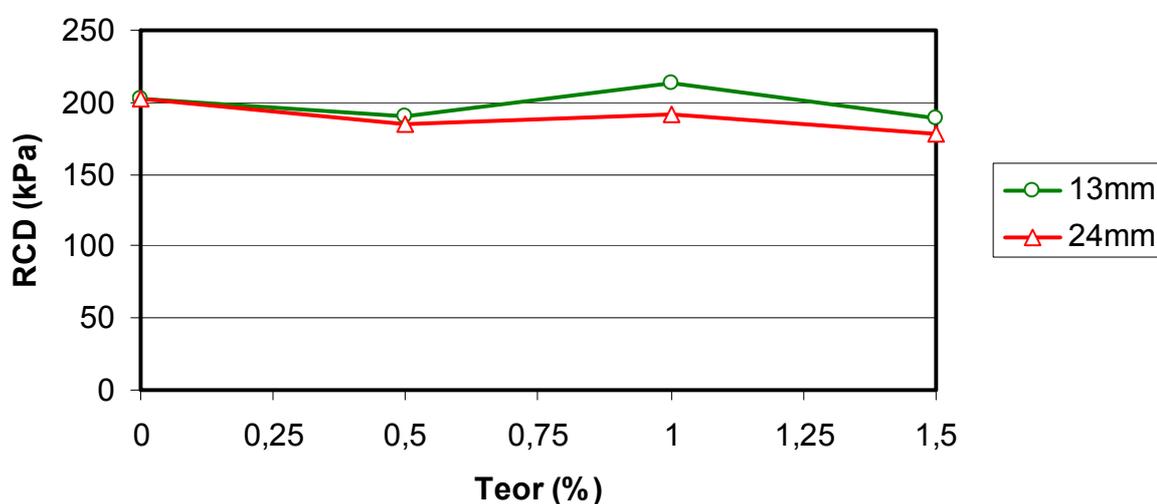


Figura 4.16: Variação da resistência à compressão diametral das fibras de vidro de 13 e 24 mm de comprimento com relação ao teor de fibra.

4.5. COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICO

A execução do ensaio de compressão triaxial cíclico visa saber o módulo de resiliência dos materiais ensaiados. Para tanto quatro modelos foram calibrados com os resultados dos ensaios, conforme as equações apresentadas a seguir:

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (4.1)$$

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (4.2)$$

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (4.3)$$

$$M_R = k_1 \cdot p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (4.4)$$

em que M_R : módulo de resiliência;

σ_3 : tensão confinante;

σ_d : tensão desvio;

θ : primeiro invariante de tensão;

τ_{oct} : tensão cisalhante octaédrica;

p_a : pressão atmosférica;

k_1 , k_2 e k_3 : constantes do modelo.

A Tabela 4.3 apresenta as constantes de calibração para os quatro modelos apresentados nas equações 4.1 a 4.4 com os respectivos coeficientes de determinação R^2 .

Tabela 4.3: Constantes de calibração e R^2 para os quatro modelos utilizados.

VARIÁVEL DO MODELO	MISTURA			CONSTANTES				
	MAT.	COMPR.	TEOR	k_1	k_2	k_3	R^2	
σ_3	<i>Solo in natura</i>			1.458,72	0,030	-	0,11	
	Polip.	12 mm	0,2%	300,099	0,129	-	0,59	
			0,4%	14,164	0,697	-	0,96	
			0,6%	1,857	1,006	-	0,98	
	30 mm	0,2%	18,949	0,645	-	0,95		
		0,4%	5,665	0,833	-	0,98		
		0,6%	2,336	1,017	-	0,99		
	Vidro	13 mm	0,5%	737,589	-0,001	-	0	
			1,0%	49,986	0,444	-	0,97	
			1,5%	12,246	0,687	-	0,99	
		24 mm	0,5%	1.430,59	-0,060	-	0,63	
			1,0%	668,881	-0,005	-	0	
			1,5%	70,247	0,417	-	0,92	
	σ_d	<i>Solo in natura</i>			1.111,71	0,089	-	0,70
		Polip.	12 mm	0,2%	594,313	-0,029	-	0,01
0,4%				88,289	0,269	-	0,13	
0,6%				1,066	1,094	-	0,50	
30 mm		0,2%	47,404	0,415	-	0,38		
		0,4%	16,069	0,574	-	0,43		
		0,6%	12,532	0,600	-	0,35		
Vidro		13 mm	0,5%	1.126,6	-0,097	-	0,40	
			1,0%	120,711	0,232	-	0,21	
			1,5%	33,388	0,412	-	0,36	
		24 mm	0,5%	1.556,93	-0,075	-	0,51	
			1,0%	938,289	-0,082	-	0,47	
			1,5%	1.336,39	-0,024	-	0,24	
σ_3, σ_d		<i>Solo in natura</i>			1.125,72	-0,049	0,131	0,85
		Polip.	12 mm	0,2%	460,723	0,169	-0,132	0,84
	0,4%			14,652	0,701	-0,011	0,96	
	0,6%			1,341	0,927	0,147	1,00	
	30 mm	0,2%	13,817	0,584	0,129	0,98		
		0,4%	8,136	0,639	0,109	0,95		
		0,6%	2,042	0,982	0,063	0,99		
	Vidro	13 mm	0,5%	1.006,13	0,111	-0,175	0,71	
			1,0%	44,129	0,430	0,040	0,97	
			1,5%	13,837	0,698	-0,037	0,99	
		24 mm	0,5%	1.608,42	-0,043	-0,042	0,74	
			1,0%	886,038	0,104	-0,164	0,90	
			1,5%	85,136	0,456	-0,079	0,94	

θ, τ_{oct}	Solo <i>in natura</i>			1.4418,2	-0,054	0,482	0,81
	Polip.	12 mm	0,2%	4.929,67	0,230	-0,579	0,80
0,4%			1.202,92	1,002	-0,841	0,95	
0,6%			406,081	1,289	-0,682	0,99	
30 mm		0,2%	1.344,75	0,803	-0,316	0,97	
		0,4%	748,995	1,072	-0,625	0,98	
		0,6%	558,451	1,332	-0,919	0,98	
Vidro	13 mm	0,5%	8.318,11	0,088	-0,628	0,43	
		1,0%	1.876,06	0,613	-0,371	0,97	
		1,5%	1.054,37	0,994	-0,977	0,99	
	24 mm	0,5%	12.024,2	-0,071	-0,039	0,73	
		1,0%	7.351,06	0,092	-0,602	0,63	
		1,5%	2.802,7	0,633	-0,875	0,91	

Analisando-se a Tabela 4.3, observa-se que, para o modelo da equação 4.1, o solo *in natura* apresentou baixos valores de R^2 , indicando que a variação do módulo de resiliência não pode ser relacionada com a variação da tensão confinante quando tomada isoladamente. Nota-se também que com este modelo obtiveram-se coeficientes de determinação iguais a zero para as duas misturas onde se utilizou fibra de vidro no menor teor, sem que houvesse uma explicação plausível. O modelo apresentado na equação 4.2 demonstrou melhora na representação do comportamento resiliente do solo *in natura* quando comparado ao modelo anterior, todavia, o valor da constante k_2 é baixo, indicando baixa influência da variação da tensão desvio tomada isoladamente no módulo de resiliência. Os coeficientes de determinação obtidos para as misturas foram os menores dentre os quatro modelos, indicando que a variação do MR não pode se relacionar com a variação da tensão desvio tomada isoladamente.

Ainda quanto ao desempenho dos modelos, o modelo composto, equação 4.3, apresentou o maior valor de R^2 para o solo *in natura* dentre todos os calculados. Para k_2 e k_3 , obtiveram-se valores negativo e positivo, respectivamente, que diferem do esperado segundo a bibliografia, já que para materiais geotécnicos espera-se

que o M_R seja diretamente proporcional à tensão confinante e inversamente proporcional à tensão desvio. Destaca-se também o baixo valor de k_2 , indicando que σ_3 tem pouca influência sobre o módulo de resiliência, discordando também do esperado para um solo arenoso. Suspeita-se que a discrepância deva-se ao processo de secagem pelo qual foi submetido o corpo-de-prova. Em relação às misturas, é possível observar que há um consistente aumento de k_2 para o incremento do teor de fibra de polipropileno, evidenciando o aumento da influência da tensão confinante com o aumento da quantidade de fibras. Este fato pode ter sido ocasionado pelas fissuras que foram apresentadas pelos corpos-de-prova que, como foi citado no ensaio de compressão simples, aumentam sua severidade com o aumento do teor de fibras. Com a formação de fissuras, o corpo-de-prova tende a se comportar como blocos sobrepostos, o que acarretaria em maior influência da tensão confinante. O mesmo comportamento pode ser observado para as misturas que utilizam a fibra de vidro, apesar de que neste caso, os corpos-de-prova não apresentarem fissuras perceptíveis à vista desarmada. Os R^2 das misturas podem ser considerados, de maneira geral, satisfatórios, embora para as misturas constituídas de fibra de vidro com 13 e 24 mm de comprimento com o menor teor, tenham sido observados valores relativamente baixo, 0,71 e 0,74, respectivamente.

Para o último modelo calibrado, equação 4.4, nota-se um valor de R^2 para o solo *in natura* menor do que para o modelo composto, mas aceitável. Considerando-se que existe uma correspondência entre σ_d e τ_{oct} , e entre σ_3 e θ nos modelos das equações 4.3 e 4.4, que relacionar-se-iam com as tensões cisalhantes e o confinamento das amostras, respectivamente, observa-se que a constante k_2 apresenta valor negativo e a constante k_3 apresenta valor positivo, que corrobora com o fato já observado no modelo composto. Outro ponto de harmonia entre os

dois modelos está no aumento de k_2 conforme se aumenta o teor de fibra de polipropileno. No tocante ao coeficiente de determinação, as misturas apresentaram, de modo geral, valores aceitáveis, porém menores do que os obtidos com o modelo anterior.

Devido aos resultados atípicos para os coeficientes dos modelos obtidos com os ensaios de resiliência para corpos-de-prova submetidos à secagem, optou-se por realizar ensaios complementares na umidade ótima de compactação, sem secagem prévia. Os valores obtidos para os coeficientes k_1 , k_2 e k_3 , assim como os respectivos R^2 na umidade ótima para os modelos 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 são apresentados na Tabela 4.4. Analisando-se a tabela é possível observar que o solo *in natura* na umidade ótima tem um comportamento dentro do previsto pela bibliografia para todos os modelos, ou seja:

- o modelo que utiliza a tensão confinante isoladamente (equação 4.1) apresenta R^2 elevado quando comparado ao modelo onde se utiliza apenas a tensão desvio (equação 4.2);
- para o modelo composto (equação 4.3), obteve-se o maior coeficiente de correlação dentro todos, e o valor de k_2 é positivo e maior do que k_3 , que é negativo;
- alto R^2 para o modelo universal (equação 4.4), com k_2 positivo e k_3 negativo.

Tabela 4.4: Constantes de calibração e R^2 na umidade ótima para os quatro modelos utilizados.

VARIÁVEIS DO MODELO	MISTURA			CONSTANTES			
	MAT.	COMPR.	TEOR	k_1	k_2	k_3	R^2
σ_3	Solo <i>in natura</i>			66,7	0,32	-	0,84
	Polip.	12 mm	0,2%	7,2	0,76	-	0,98
			0,4%	3,0	0,91	-	0,99
Vidro	24 mm	0,5%	294,6	0,04	-	0,10	
σ_d	Solo <i>in natura</i>			126,4	0,16	-	0,11
	Polip.	12 mm	0,2%	38,6	0,36	-	0,24
			0,4%	32,8	0,35	-	0,13
Vidro	24 mm	0,5%	447,7	-0,06	-	0,18	
σ_3, σ_d	Solo <i>in natura</i>			107,5	0,41	-0,20	0,95
	Polip.	12 mm	0,2%	8,3	0,81	-0,07	0,99
			0,4%	3,3	0,92	-0,02	0,99
Vidro	24 mm	0,5%	197,1	0,16	-0,18	0,96	
θ, τ_{oct}	Solo <i>in natura</i>			2.224,6	0,56	-1,29	0,92
	Polip.	12 mm	0,2%	844,8	1,08	-1,08	0,96
			0,4%	499,8	1,31	-1,15	0,99
Vidro	24 mm	0,5%	3.775,8	0,17	-0,72	0,72	

Ainda na Tabela 4.4 é possível observar que as misturas com a fibra de polipropileno acompanharam o comportamento do solo *in natura* para todos os modelos. Já para a mistura onde se utiliza fibra de vidro, destaca-se o baixo valor de R^2 para os modelos que consideram as tensões confinante e desvio isoladamente, porém foram altos os coeficientes de determinação para os outros dois modelos, sendo que o modelo composto teve o melhor desempenho dentre todos. Nota-se ainda que, para a mesma mistura, o modelo composto apresenta magnitudes equivalentes para k_2 e k_3 , indicando uma equivalência entre a influência de σ_3 e σ_d .

Comparando-se os resultados apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4, destaca-se que a secagem influencia o comportamento do material, contudo, não foi possível identificar o mecanismo através do qual este processo atua para a variação do módulo de resiliência.

Nas análises que se seguem, optou-se por utilizar o modelo composto na representação do comportamento de bases de SAFL e de bases reforçadas com fibras, conforme detalhado no item 3.2.4.3. Esta escolha deve-se ao fato deste modelo ter apresentado elevados valores de R^2 e existir uma tendência para a sua utilização em nosso país. Os valores obtidos para o módulo de resiliência nas condições consideradas são mostrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Estado de tensão e módulo de resiliência obtidos na simulação de um pavimento de SAFL.

MISTURA			ESTADO DE TENSÃO		M_R (MPa)
MAT.	COMPR.	TEOR	σ_d	σ_3	
Solo <i>in natura</i>			386	18	2.132
Polip.	12 mm	0,2%	515	87	430
		0,4%	523	94	330
		0,6%	428	99	231
	30 mm	0,2%	517	88	423
		0,4%	525	97	300
		0,6%	525	97	271
Vidro	13 mm	0,5%	504	80	551
		1,0%	519	90	392
		1,5%	526	98	269
	24 mm	0,5%	459	55	1.047
		1,0%	510	83	505
		1,5%	519	90	404

Para facilitar a observação da influência da inclusão de fibras no módulo de resiliência, optou-se por utilizar gráficos dos valores desta variável *versus* teor de fibra, conforme apresentados nas Figuras 4.17 e 4.18 para as fibras de polipropileno e vidro, respectivamente. Analisando-se a Figura 4.17, observa-se que a variação do módulo de resiliência apresenta um padrão muito semelhante ao padrão de variação de E_0 , existindo uma queda expressiva do valor do M_R já para o menor teor de fibra utilizado, seguindo-se uma queda gradativa e aproximadamente linear, porém

menos acentuada, conforme se aumenta o teor. Nota-se que os dois comprimentos têm comportamento semelhante, observando-se uma queda de 80% no valor do módulo de resiliência do solo *in natura* para a inclusão de 0,2% de fibra, menor teor estudado. Para os teores de 0,4% e 0,6%, esta diminuição é de 85% e 88%, respectivamente, ainda com relação ao solo *in natura*.

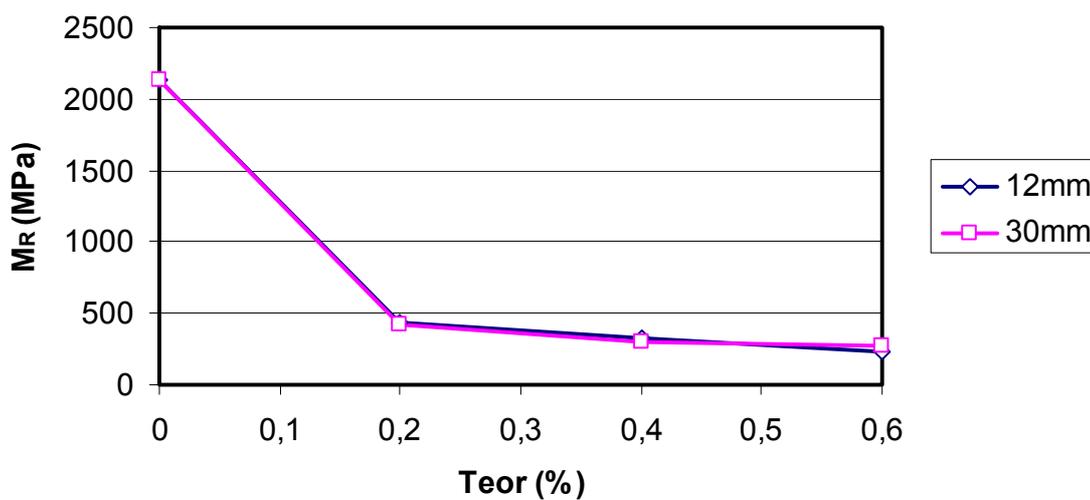


Figura 4.17: Variação do módulo de resiliência das misturas com fibras de polipropileno de 12 e 30 mm de comprimento com relação ao teor fibra.

Analisando-se o comportamento do módulo de resiliência em relação ao teor de fibra de vidro na Figura 4.18, observa-se novamente similaridade com o comportamento do E_0 . Para os dois comprimentos nota-se que a inclusão e o aumento do teor de fibras provocam uma diminuição no módulo de resiliência, repetindo o comportamento da fibra de polipropileno, ou seja, a maior diminuição ocorre para o menor teor de fibra, 74% e 51%, respectivamente para os comprimentos de 13 e 24 mm. Para os teores de 1% e 1,5%, o gradiente de queda é menor e semelhante para os dois comprimentos, na média 79% e 84% com relação ao solo *in natura*, respectivamente. Comparando-se o efeito da adição dos dois tipos de fibras na diminuição do módulo de resiliência do solo *in natura*, observa-se que, a

menos da mistura com fibra de vidro de 24 mm no teor de 0,5%, a variação é equivalente para as demais condições consideradas.

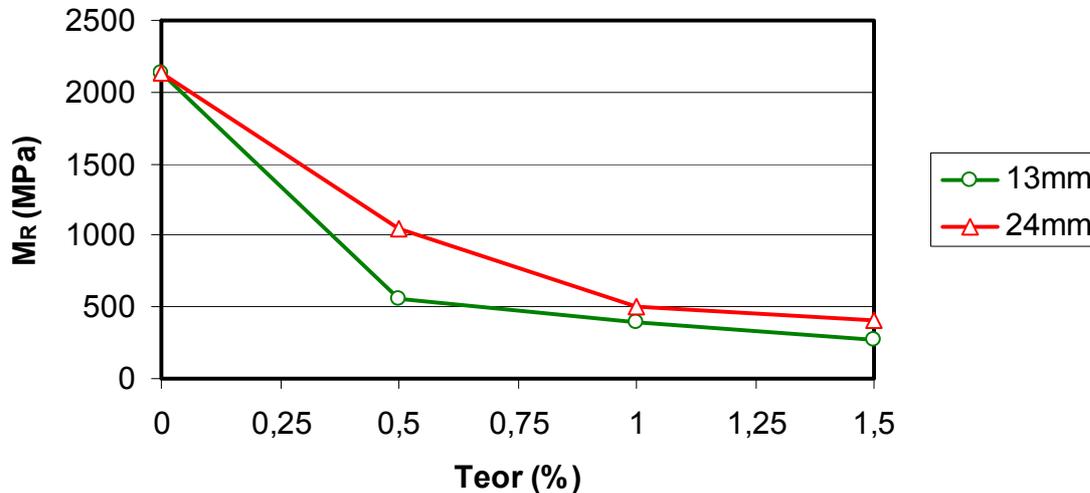


Figura 4.18: Variação do módulo de resiliência das misturas com fibras de vidro de 13 e 24 mm de comprimento com relação ao teor fibra.

Specht (2000) também observou redução do módulo de resiliência de uma mistura de solo-cimento-fibra no ensaio de compressão diametral cíclico. No caso do autor, a mistura solo-cimento resultava em um módulo de resiliência 8.981 MPa que reduziu seu valor com a inclusão de fibra de polipropileno em 15% para o teor de 0,25%. A redução foi ainda maior para o teor de 0,5% de fibra, onde observa-se uma diminuição de 30%. O autor afirma que a redução do módulo de resiliência já era esperada, pois se insere um elemento menos rígido que a própria matriz. Supõe-se que o mesmo pode ter acontecido nesta pesquisa.

Também se simulou a utilização do material na umidade ótima na estrutura do pavimento de SAFL. Os estados de tensão e os respectivos módulos de resiliência obtidos são apresentados na Tabela 4.6. Analisando-se a tabela, nota-se que o solo *in natura* apresenta um módulo de resiliência de 222 MPa, que, comparado com o módulo de resiliência do material seco, é cerca de que 9,5 vezes menor, evidenciando o grande aumento de rigidez proveniente do processo de secagem. No

tocante às misturas, observa-se que a inclusão da fibra de polipropileno não conduz à diminuição do M_R e que a queda para o teor de 0,4% é pouco expressiva, contrariando o comportamento observado para os corpos-de-prova ensaiados após secagem. Supõe-se que neste caso não exista uma diferença relativa de rigidez entre a matriz e o reforço que produziria uma queda no M_R com a inclusão de fibra. Para a fibra de vidro observa-se um decréscimo de 36% no valor do M_R , menor que o valor de 51% observado para igual teor após secagem, porém ainda expressiva. Neste caso, ao contrário da fibra de polipropileno, a inclusão da fibra estaria agindo negativamente no valor da rigidez da mistura, não sendo possível identificar a razão para tal fato. Todavia constata-se que a inclusão da fibra de vidro, já na umidade ótima, resulta em mudança do comportamento do material e que tal mudança é intensificada quando se utiliza o processo de secagem.

Tabela 4.6: Estado de tensão e módulos de resiliência obtidos na umidade ótima.

MISTURA			ESTADO DE TENSÃO		M_R (MPa)
MAT.	COMPR.	TEOR	σ_d	σ_3	
Solo <i>in natura</i>			425	100	221,922
Polip.	12 mm	0,2%	425	100	223,128
		0,4%	420	102	195,358
Vidro	24 mm	0,5%	410	105	142,514

4.6. ENSAIO QUALITATIVO DE RETRAÇÃO

As Figuras 4.19 e 4.20 mostram a variação percentual dos diâmetros decorrente da secagem do solo e das misturas em estufa com relação aos teores de fibras de polipropileno e vidro, respectivamente. Observa-se para os dois materiais, que não ocorreu variação para o menor teor de fibra e que a variação para os teores mais elevados, apesar de crescente, é muito pequena. Uma possível explicação

para este leve aumento da retração seria a dificuldade em se obter uma mistura perfeitamente homogênea para os maiores teores capaz de preencher uniformemente todo o espaço do molde, resultando em pequenas reentrâncias na superfície de contacto com o anel. Com base nos resultados dos ensaios de retração, pode-se concluir que a adição de fibras não interfere na retração do solo.

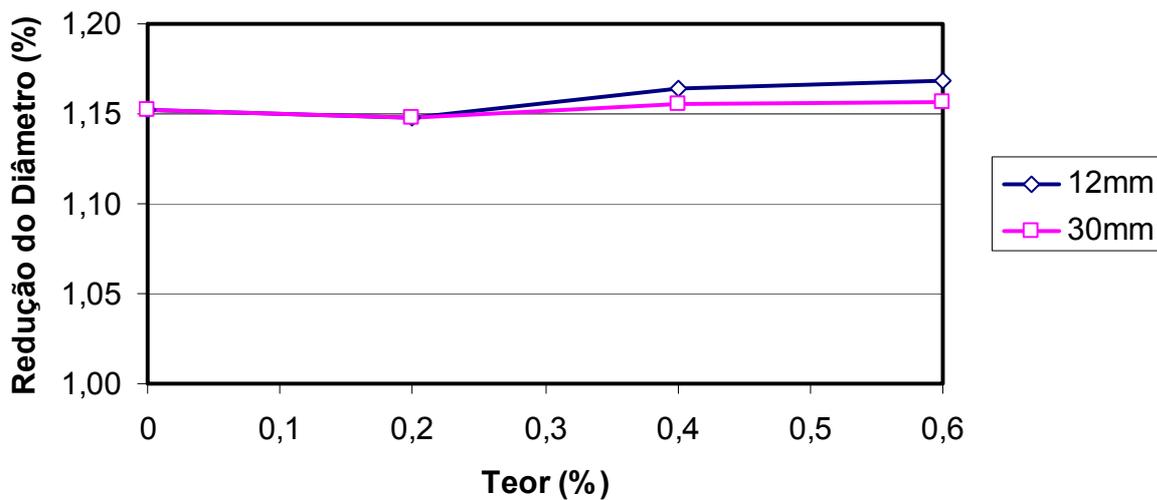


Figura 4.19: Variação da redução do diâmetro da pastilha com relação ao teor de fibra de polipropileno de 12 e 30 mm de comprimento.

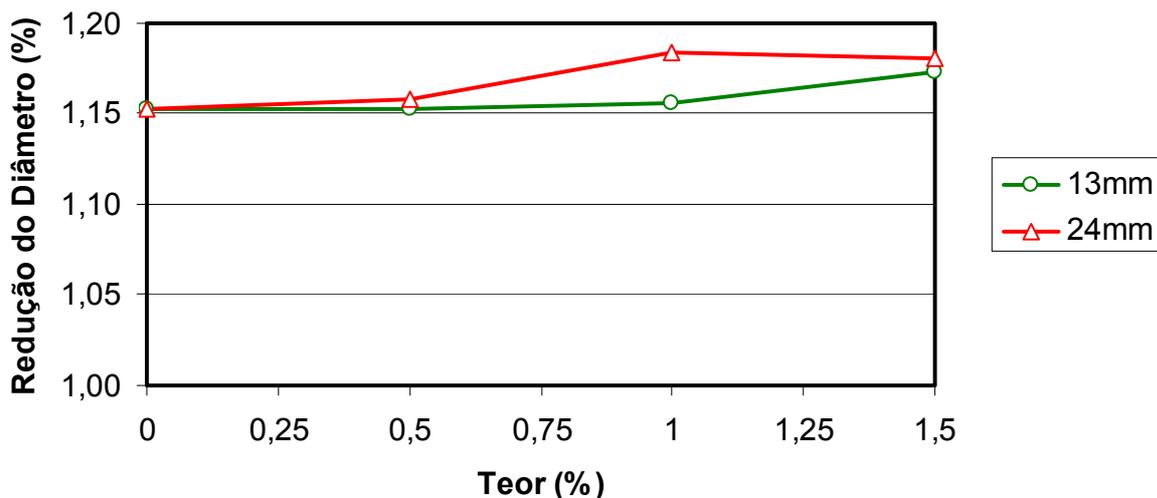


Figura 4.20: Variação da redução do teor da pastilha com relação ao teor de fibra de vidro com 13 e 24 mm de comprimento.

A Figura 4.21 mostra uma pastilha de solo sem reforço antes e depois da secagem. Na figura é possível observar que o material não apresentou fissuras decorrentes do processo de secagem, sendo que a utilização das fibras como reforço não modificou este comportamento.

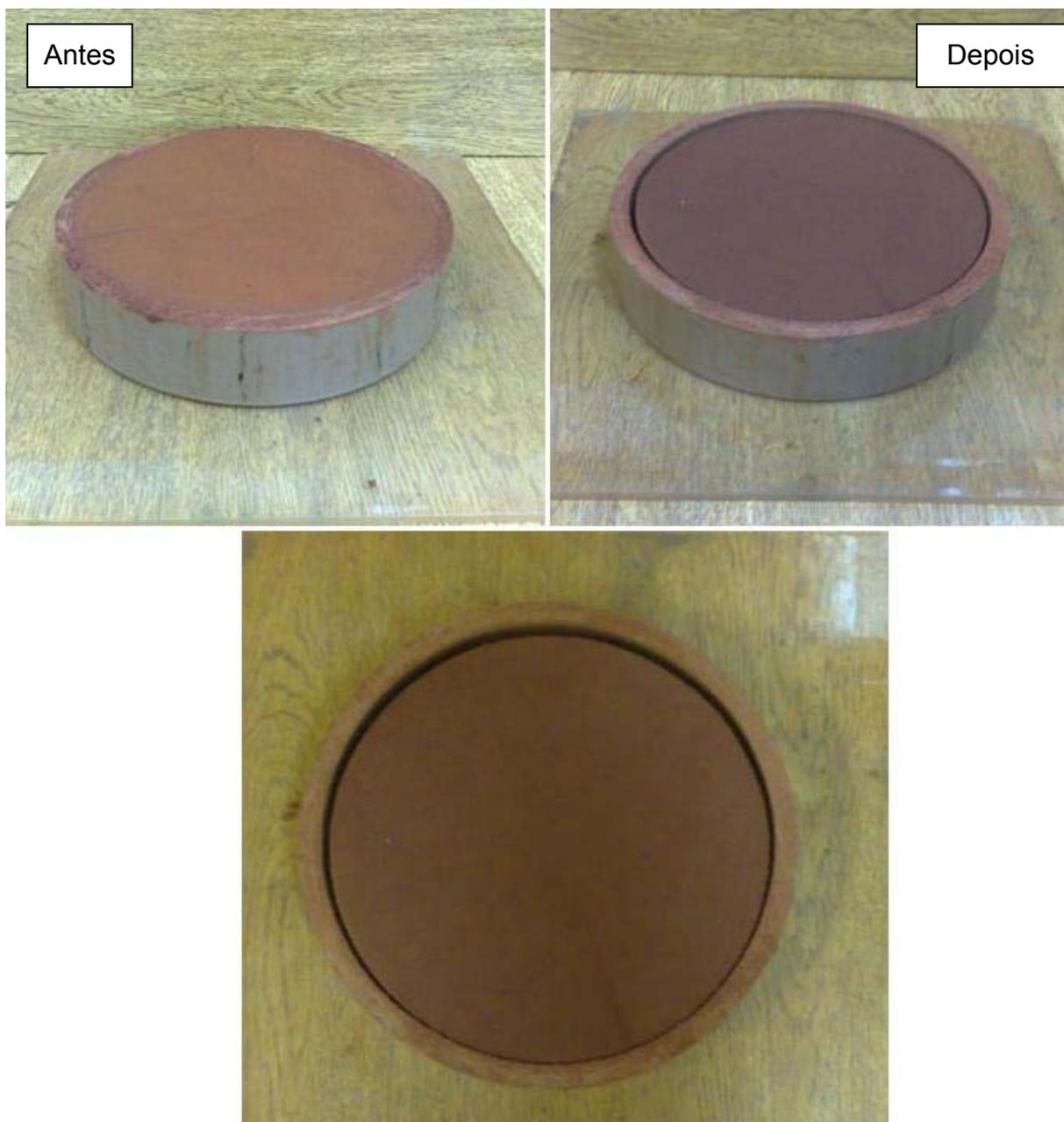


Figura 4.21: Pastilha de solo sem reforço antes e depois da secagem.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar a influência da inclusão de fibras curtas de vidro e de polipropileno, distribuídas aleatoriamente, no comportamento mecânico de um solo arenoso fino laterítico, visando sua aplicação na construção de bases de pavimentos.

Para os materiais e as condições utilizadas nesta pesquisa, as seguintes conclusões podem ser destacadas.

Os estudos preliminares mostram que as fibras de vidro devem ser utilizadas na forma de feixe ao invés de desfiadas, tendo em vista a maior facilidade na homogeneização e compactação da mistura. Com base em ensaios de compressão simples, optou-se pelo uso de fibras de polipropileno lisas às corrugadas, e constatou-se que a secagem dos corpos-de-prova por 1 dia com posterior homogeneização da umidade em câmara úmida envolto por papel filme por 2 dias é a condição que proporciona maiores resistências. Devido ao caráter inusitado deste procedimento para materiais reforçados com fibra houve dificuldade em se encontrar bibliografia que corroborasse os resultados da pesquisa.

Os ensaios de compactação mostraram que a inserção de fibras causa uma diminuição da massa específica máxima que, no caso da fibra de polipropileno, reduz-se conforme se aumenta o seu teor, enquanto que para a fibra de vidro, não existe variação com o aumento do teor. Não houve variação da umidade ótima com a inclusão da fibra de polipropileno, sendo que no caso da fibra de vidro, ocorreu uma pequena redução desta variável, que se manteve constante para teores crescentes.

Ao final da compactação das misturas com fibra de polipropileno para a realização dos ensaios mecânicos, observou-se que os corpos-de-prova apresentavam fissuras, com severidades crescentes com o aumento da quantidade de fibra.

No ensaio de compressão simples, a fibra de polipropileno não influenciou a tensão de ruptura e fez com que a deformação neste ponto aumentasse com o crescimento do teor utilizado, sendo que a variação é mais pronunciada para a fibra mais longa. A inclusão da fibra de vidro conduziu a um decréscimo da tensão e a um aumento da deformação de ruptura, esta última diretamente proporcional ao teor de fibra e mais significativa para as fibras mais curtas. A adição ou o aumento do teor de fibras de polipropileno e vidro levaram a uma redução dos valores de E_0 e $E_{máx}$. Não foi possível estabelecer um padrão único que representasse a influência do comprimento das fibras nestas variáveis e que englobasse os dois materiais estudados.

Os resultados dos ensaios de tração indireta mostram resistências que crescem com o aumento do teor de fibra de polipropileno e permanecem constantes para a fibra de vidro. O efeito da fibra no comportamento do compósito frente à solicitação à tração foi superior ao do determinado na compressão.

A partir dos ensaios triaxiais cíclicos foram calibrados quatro modelos para a representação da variação do módulo de resiliência com o estados de tensão. Os modelos composto e universal apresentaram os melhores desempenhos com base nos valores de R^2 , sendo que com o primeiro observou-se resultados ligeiramente superiores. Assim nas análises que se seguiram privilegiou-se o uso do mesmo.

Analisando-se os valores de k_2 e k_3 do modelo composto, expoentes das tensões confinantes e desvio, respectivamente, observou-se que o primeiro é negativo e o segundo é positivo, indicando variações contrárias às comumente determinadas para materiais geotécnicos, e ainda que o valor de k_2 é menor que o de k_3 , indicando pequena influência de σ_3 no módulo de resiliência. Supõe-se que o comportamento atípico observado decorra do procedimento de secagem dos corpos-de-prova, visto que para as misturas ensaiadas na umidade ótima de compactação tal fato não ocorre.

Os estudos baseados na simulação do comportamento de uma base de SAFL constituinte de uma estrutura de pavimento mostraram que a inclusão de fibra de polipropileno resultou em uma queda de 80% para o menor teor de fibra, sendo que esta variação continua ocorrendo para teores crescentes, embora de maneira mais suave. O comprimento da fibra não influenciou neste comportamento. Para a fibra de vidro, observou-se um comportamento semelhante, diferindo apenas quando utilizada a fibra de 24 mm de comprimento no teor de 0,5%, que apresentou uma diminuição da rigidez menor, de 51%.

Na umidade ótima, o acréscimo de fibras de polipropileno não influenciou o módulo de resiliência do solo *in natura*. Porém a inclusão da fibra de vidro acarretou em diminuição do M_R em 36%, indicando que a adição desta fibra, mesmo sem secagem, piora o comportamento resiliente do solo.

Os ensaios qualitativos de retração mostraram que a inclusão de qualquer tipo de fibra não influencia nesta característica mensurada pelo ensaio. Também foi possível observar que o solo, assim como as misturas reforçadas, não apresentou fissuração devido ao processo de secagem.

Finalmente, com base nos resultados apresentados, conclui-se que o emprego de fibras não seria indicado para o reforço de solos arenosos finos lateríticos utilizados na construção de bases de pavimentos. Entretanto, estudos onde se aprofunde a análise da influência da condição de secagem e do eventual umedecimento dos materiais devem ser realizados para que se estabeleça uma conclusão definitiva.

5.1. SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de se conhecer melhor o comportamento de compósitos formados a partir de misturas de materiais reforçados com fibras curtas distribuídas aleatoriamente para a estrutura de pavimentos, sugere-se que investigue-se os seguintes aspectos:

- influência da secagem e do eventual umedecimento em um SAFL não reforçado e reforçado com fibras;
- efeito da adição de fibras em um solo com pior comportamento mecânico que o SAFL, contemplando outros tipos, teores e comprimentos de fibras
- verificar o comportamento mecânico de fibras inseridas no material de capa, visto a alta solicitação à tração nesta camada e o bom desempenho do reforço nesta condição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO T 309-99 (1999). *Standard method of test for determining the resilient modulus of soils aggregate materials*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 6459: *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.

_____ (1984). NBR 6508: *Grãos de solo que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro.

_____ (1984). NBR 7180: *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

_____ (1984). NBR 7181: *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

_____ (1992). NBR 12770: *Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada*. Rio de Janeiro.

BERNUCCI, L. L. B. (1995). *Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego*. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

BERNUCCI, L. B.; CAMACHO, J.; MARINHO, F. M.; NOGAMI, J. S. (2000). *Efeitos da Temperatura na Movimentação D'água em Pavimentos Construídos com Solos Lateríticos*. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 14. 2000, Gramado. Anais v. 1, p. 539-550.

CASAGRANDE, M. D. T. e CONSOLI, N. C. (2002). *Estudo do comportamento de um solo residual areno-siltoso reforçado com fibras de polipropileno*. Revista Solos e Rochas, vol. 25, nº 3, p. 223-230. São Paulo.

CONSOLI, N. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; COOP, M. R. (2005). *Effect of Fiber Reinforcement on the Isotropic Compression Behavior of a Sand*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 131, nº 11, p. 1434-1436.

CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; ULBRICH, L. A. (1998). *Influence of Fibers and Cement Addition on Behavior of Sand Soil*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 124, nº 12.

CROCKFORD, W. W.; GROGAN, W. P.; CHILL, D. S. (1993). *Strength and Life of Stabilized Pavement Layers Containing Fibrillated Polypropylene*. TRB. Transportation Research Record, nº 1418.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS (1994). DNER – ME 129/94. *Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas*. Rio de Janeiro.

_____ (1994). DNER – ME 228/94. *Solos – Compactação em equipamento miniatura*. Rio de Janeiro.

_____ (1994). DNER – ME 256/94. *Solos compactados com equipamento miniatura – Determinação da perda de massa por imersão*. Rio de Janeiro.

_____ (1994). DNER – ME 258/94. *Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV*. Rio de Janeiro.

_____ (1997). DNER – ME 254/97. *Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão*. Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS DE SÃO PAULO (1991). *Manual de Normas*. São Paulo.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ (2005). DER /PR ES-P 08/05: *Pavimentação: Solo arenoso fino laterítico*. Curitiba.

FABRI, G. T. P. (1994). *Caracterização da Fração Fina de Solos Tropicais Através da Absorção de Azul de Metileno*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

FEUERHAMEL, M. R. (2000). *Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

FLETCHER, C. S. e HUMPHRIES, W. K. (1991). *California Bearing Ratio Improvement of Remolded Soils by the Addition of Polypropylene Fiber Reinforcement*. TRB. Transportation Research Record, nº 1295.

FRANZOI, S. (1990) *Algumas particularidades resilientes de solos lateríticos e saprolíticos*. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

GRAY, D. H. e OHASHI, H. (1983). *Mechanics of fiber reinforcement in sand*. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 109, nº 3, p. 335-353.

GONÇALVES, R. F. (1999). *Estudo da influência da variação do teor de umidade no módulo de resiliência de um solo argiloso encontrado no subleito de rodovias no interior paulista*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

MAHER, M. H. e HO, Y. C. (1993). *Behavior of Fiber-Reinforced Cemented Sand Under Static and Cyclic Loads*. Geotechnical Testing Journal, vol. 16, nº 3, p. 330-338.

MAHER, M. H. e GRAY, D. H. (1990). *Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers*. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 116, nº 11, p. 1661-1677.

McGOWN, A.; ANDRAWES, K. Z.; AL-HASANI, M. M. (1978). *Effect of inclusion properties on the behavior of sand*. Geotechnique, vol. 28, nº 2, p. 327-346.

MEDINA, J. de; MOTTA, L. M. G. da (2005). *Mecânica dos pavimentos*. 2ª Edição. Rio de Janeiro.

MONTARDO, J. P.; CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M. (2001). *Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes*. Revista Solos e Rochas, vol. 24, nº 3, p. 191-209. São Paulo.

NATARAJ, M. S. e McMANIS, K. L. (1997). *Strength and Deformation Properties of Soils Reinforced with Fibrillated Fibers*. Geosynthetics International, vol. 4, nº 1, p. 65-79.

NOGAMI, J. S. e VILLIBOR, D. F. (1980). *Caracterização e Classificação Geral de Solos para Pavimentação: Limitações dos Métodos Tradicionais, Apresentação de uma Nova Sistemática*. 15º Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, MG.

_____ (1995). *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. Editora Villibor, São Paulo.

PALMEIRA, E. M. (1992). Geossintéticos: tipos e evolução nos últimos anos. In: SEMINÁRIO SOBRE APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS EM GEOTECNIA. Geossintéticos 92... Brasília, p.1-20.

RAFALKO, S. D.; BRANDON, T. L.; FILZ, G. M.; MITCHELL, J. K. (2007). *Fiber reinforcement for rapid stabilization of soft clay soils*. TRB, Annual Meeting CD-ROM.

SANTANNA, J. A. (1998). *Estudo do comportamento de solos artificiais em função da variação das características de sua fração grossa*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

SANTOS, E. F. (2006). *Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

SPECHT, L. P. (2000). *Comportamento de Misturas Solo-Cimento-Fibra Submetidas a Carregamentos Estáticos e Dinâmicos Visando a Pavimentação*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

SPECHT, L. P.; HEINECK, K. S.; CERATTI, J. A. P.; CONSOLI, N. C. (2002). *Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e cíclicos*. Revista Solos e Rochas, vol. 25, nº 1, p. 15-34. São Paulo.

STAUFFER, S. D. e HOLTZ, R. D. (1995). *Stress-strain and strength behavior of staple fiber and continuous filament-reinforced sand*. TRB, Transportations Research Record, nº 1474, p. 82-95.

TAKEDA, M. C. (2006). *A Influência da Variação da Umidade Pós-Compactação no Comportamento Mecânico de Solos de Rodovias do Interior Paulista*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

TEODORO, J.M. (1999). *Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibra plástica*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

TRINDADE, T. P. da; IASBIK, I.; LIMA, D. C. de; SILVA, C. H. C.; BARBOSA, P. S. A. (2004). *Latossolo vermelho-amarelo reforçado com fibra de polipropileno de distribuição aleatória: estudo em laboratório*. REM, Revista Escola Minas, vol. 57, nº 1, p. 53-58. Ouro Preto.

VAN IMPE, W. F. V. (1989). *Soil improvements techniques and their evolution*. A. A. Balkema. Rotterdam.

VENDRUSCOLO, M. A. (2003). *Estudo do Comportamento de Materiais Compósitos Fibrosos para Aplicação como Reforço de Base de Fundação Superficial*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

VILLIBOR, D. F. (1981). *Pavimentos Econômicos, Novas Considerações*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S.; CINCERRE, J. R.; SERRA P. R. M.; ZUPPOLINI, A. N. (2007). *Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas*. Arte e Ciência Editora. São Paulo.

ANEXO I

TESTE DE GRUBS PARA IDENTIFICAÇÃO DE OUTLIERS

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Identificação: Fibra de Polipropileno

Variável: RCS

Compr.	Teor	RCS	Média	Desv Pad	G	Outlier
Solo <i>in natura</i>		2423	2410,33	21,94	0,577	não
		2385			1,155	sim
		2423			0,577	não
12mm	0,2	2333	2302,00	71,24	0,435	não
		2292			0,140	não
		2375			1,025	não
		2208			1,319	não
	0,4	2417	2229,25	194,03	0,968	não
		2083			0,754	não
		2042			0,965	não
		2375			0,751	não
	0,6	2458	2270,50	226,86	0,826	não
		2000			1,192	não
		2166			0,461	não
		2458			0,826	não
30mm	0,2	2417	2343,75	193,46	0,379	não
		2208			0,702	não
		2167			0,914	não
		2583			1,237	não
	0,4	2542	2541,75	33,89	0,007	não
		2542			0,007	não
		2500			1,232	não
		2583			1,217	não
	0,6	2458	-	-	-	-
					-	-
					-	-

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Identificação: Fibra de Polipropileno

Variável: ϵ_{rup}

Compr.	Teor	Def	Média	Desv Pad	G	Outlier
Solo <i>in natura</i>		1,708	1,7777	0,09	0,802	não
		1,75			0,318	não
		1,875			1,120	não
12mm	0,2	2,542	2,568	0,11	0,227	não
		2,417			1,318	não
		2,667			0,864	não
		2,646			0,681	não
	0,4	3,188	3,271	0,20	0,420	não
		3,208			0,318	não
		3,125			0,738	não
		3,563			1,476	não
	0,6	4,143	4,342	0,45	0,447	não
		3,837			1,133	não
		4,857			1,156	não
		4,531			0,424	não
30mm	0,2	3,49	3,005	0,38	1,273	não
		2,755			0,656	não
		2,653			0,924	não
		3,122			0,307	não
	0,4	4,857	4,5175	0,76	0,445	não
		3,735			1,026	não
		5,417			1,179	não
		4,061			0,599	não
	0,6	5,354	-	-	-	-
					-	-
					-	-

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Identificação: Fibra de Polipropileno

Variável: E_0

Compr.	Teor	E_0	Média	Desv Pad	G	Outlier
Solo <i>in natura</i>		1423	1551	110,85	1,155	não
		1615			0,577	não
		1615			0,577	não
12mm	0,2	583	685,25	122,99	0,831	não
		600			0,693	não
		850			1,339	não
		708			0,185	não
	0,4	625	489,75	98,29	1,376	não
		500			0,104	não
		417			0,740	não
		417			0,740	não
	0,6	292	218,5	63,00	1,167	não
		250			0,500	não
		166			0,833	não
		166			0,833	não
30mm	0,2	250	343,75	137,84	0,680	não
		417			0,531	não
		208			0,985	não
		500			1,134	não
	0,4	167	260,5	92,38	1,012	não
		375			1,239	não
		208			0,568	não
		292			0,341	não
	0,6	200	162,33	40,20	0,937	não
		167			0,116	não
		120			1,053	não

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Identificação: Fibra de Polipropileno

Variável: E_{\max}

Compr.	Teor	E_{\max}	Média	Desv Pad	G	Outlier
Solo <i>in natura</i>		2420	2229,333	166,21	1,147	não
		2153			0,459	não
		2115			0,688	não
12mm	0,2	1500	1413,5	85,01	1,018	não
		1461			0,559	não
		1385			0,335	não
		1308			1,241	não
	0,4	1192	1086,5	79,15	1,333	não
		1000			1,093	não
		1077			0,120	não
		1077			0,120	não
	0,6	1038	968	60,90	1,149	não
		917			0,837	não
		917			0,837	não
		1000			0,525	não
30mm	0,2	1083	1291,5	233,19	0,894	não
		1375			0,358	não
		1125			0,714	não
		1583			1,250	não
	0,4	1167	1166,75	179,76	0,001	não
		1250			0,463	não
		917			1,389	não
		1333			0,925	não
	0,6	917	857,00	77,87	0,770	não
		885			0,360	não
		769			1,130	não

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Identificação: Fibra de Vidro

Variável: RCS

Compr.	Teor	RCS	média	Desv Pad	G	Outlier
Solo <i>in natura</i>		2423	2410,33	21,94	0,577	não
		2385			1,155	não
		2423			0,577	não
13mm	0,5	1833	1763,33	86,87	0,802	não
		1666			1,120	não
		1791			0,318	não
		-			-	-
	1	1125	1197,75	268,63	0,271	não
		958			0,892	não
		1125			0,271	não
		1583			1,434	não
	1,5	1333	1291,5	163,19	0,254	não
		1208			0,512	não
		1125			1,020	não
		1500			1,278	não
24mm	0,5	2333	2347,33	63,72	0,225	não
		2292			0,868	não
		-			-	-
		2417			1,093	não
	1	1166	1124,75	173,18	0,238	não
		917			1,200	não
		1083			0,241	não
		1333			1,203	não
	1,5	1846	1797,75	36,82	1,310	não
		1807			0,251	não
		1769			0,781	não
		1769			0,781	não

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Identificação: Fibra de Vidro

Variável: ϵ_{rup}

Compr.	Teor	Def	Media	Desv Pad	G	Outlier
Solo <i>in natura</i>		1,708	1,778	0,09	0,802	não
		1,75			0,318	não
		1,875			1,120	não
13mm	0,5	2,143	2,092	0,05	0,993	não
		2,102			0,199	não
		2,102			0,199	não
		2,02			1,391	não
	1	2,735	2,735	0,38	0,000	não
		2,735			0,000	não
		2,735			0,000	não
		3,49			2,000	sim
	1,5	3,265	3,546	0,20	1,383	não
		3,714			0,829	não
		3,531			0,073	não
		3,673			0,627	não
24mm	0,5	1,877	2,143	0,23	1,171	não
		2,102			0,179	não
		2,429			1,261	não
		2,163			0,089	não
	1	2,286	2,266	0,02	0,866	não
		2,245			0,866	não
		2,245			0,866	não
		2,286			0,866	não
	1,5	2,041	2,368	0,38	0,864	não
		2,082			0,755	não
		2,51			0,377	não
		2,837			1,242	não

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Identificação: Fibra de Vidro

Variável: E_0

Compr.	Teor	E_0	Média	Desv Pad	G	Outlier	
Solo <i>in natura</i>		1423	1551	110,85	1,155	sim	
		1615			0,577	não	
		1615			0,577	não	
13mm	0,5	667	656,75	33,70	0,304	não	
		630			0,794	não	
		630			0,794	não	
		700			1,283	não	
	1		208	250	34,29	1,225	não
			292			1,225	não
			250			0,000	não
			250			0,000	não
	1,5		166	166,67	20,84	0,032	não
			125			1,999	sim
			167			0,016	não
			167			0,016	não
24mm	0,5	950	688,25	274,19	0,955	não	
		850			0,590	não	
		333			1,296	não	
		620			0,249	não	
	1		375	291,75	58,93	1,413	não
			250			0,709	não
			292			0,004	não
			250			0,709	não
	1,5		168	167,25	0,50	1,500	sim
			167			0,500	não
			167			0,500	não
			167			0,500	não

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Identificação: Fibra de Vidro

Variável: $E_{m\acute{a}x}$

Compr.	Teor	$E_{m\acute{a}x}$	Média	Desv Pad	G	Outlier
Solo <i>in natura</i>		2420	2229,3	166,21	1,147	não
		2153			0,459	não
		2115			0,688	não
13mm	0,5	1231	1349,5	188,35	0,629	não
		1167			0,969	não
		1417			0,358	não
		1583			1,240	não
	1	654	611,25	90,12	0,474	não
		500			1,235	não
		583			0,313	não
		708			1,074	não
	1,5	667	656,25	52,52	0,205	não
		667			0,205	não
		583			1,395	não
		708			0,985	não
24mm	0,5	2250	2250	208,00	0,000	não
		2042			1,000	não
		-			-	-
		2458			1,000	não
	1	875	833,5	140,11	0,296	não
		667			1,188	não
		792			0,296	não
		1000			1,188	não
	1,5	1417	930,67	243,93	1,994	sim
		917			0,056	não
		958			0,112	não
		917			0,056	não

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES NA UMIDADE ÓTIMA

Variável: RCS

Material	Compr.	Teor	RCS	Média	Desv Pad	G	Outlier
<i>Solo in natura</i>			338,89	333,195	6,89	0,827	não
			330			0,464	não
			325			1,190	não
			338,89			0,827	não
Poli	12mm	0,2	383,33	397,395	9,83	1,431	não
			400			0,265	não
			406,25			0,901	não
			400			0,265	não
Vidro	24mm	0,5	300	296,25	18,87	0,199	não
			320			1,258	não
			275			1,126	não
			290			0,331	não

Variável: ϵ_{RUP}

Material	Compr.	Teor	Def	Média	Desv Pad	G	Outlier
<i>Solo in natura</i>			1,80	1,97	0,22	0,739	não
			1,93			0,157	não
			1,84			0,560	não
			2,29			1,455	não
Poli	12mm	0,2	2,04	2,20	0,15	1,084	não
			2,11			0,617	não
			2,33			0,850	não
			2,33			0,850	não
Vidro	24mm	0,5	1,84	1,87	0,18	0,136	não
			1,71			0,840	não
			1,78			0,461	não
			2,13			1,436	não

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES NA UMIDADE ÓTIMA

Variável: E_0

Material	Compr.	Teor	E_0	Média	Desv Pad	G	Outlier
<i>Solo in natura</i>			460	356,53	81,36	1,272	não
			350			0,080	não
			355			0,019	não
			261,11			1,173	não
Poli	12mm	0,2	227,78	222,57	42,63	0,122	não
			262,5			0,937	não
			162,5			1,409	não
			237,5			0,350	não
Vidro	24mm	0,5	200	266,82	54,59	1,224	não
			250			0,308	não
			327,27			1,107	não
			290			0,425	não

Variável: $E_{máx}$

Material	Compr.	Teor	$E_{máx}$	Média	Desv Pad	G	Outlier
<i>Solo in natura</i>			460	356,53	81,36	1,272	não
			350			0,080	não
			355			0,019	não
			261,11			1,173	não
Poli	12mm	0,2	311,11	274,65	36,33	1,003	não
			300			0,698	não
			250			0,679	não
			237,5			1,023	não
Vidro	24mm	0,5	260	281,82	34,74	0,628	não
			250			0,916	não
			327,27			1,308	não
			290			0,236	não

ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

Aplicando Grubbs para identificação de outliers com grau de confiança de 95%.

n	4	3
G _{crítico}	1,481	1,154

Identificação: Fibra de Vidro Data: 18/02/2008

Identificação	Vidro - 13mm - 0,5%				Vidro - 13mm - 1,0%				Vidro - 13mm - 1,5%			
CP	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Leitura	6,8	6,9	6,4	6,1	7,9	7,9	7,1	6,6	6,5	6,9	7,5	5,2
CTE	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180
Carga (kgf)	157,62	159,94	148,35	141,40	183,12	183,12	164,58	152,99	150,67	159,94	173,85	120,54
Média (kgf)	151,83				170,95				151,25			
Desv. Pad.	8,57				14,83				22,58			
G	0,676	0,947	0,406	1,217	0,821	0,821	0,430	1,212	0,026	0,385	1,001	1,360
Outlier	não	não	não	não	não	não	não	não	não	não	não	não
RCD (kPa)	189,58				213,46				188,86			

Identificação: Fibra de Vidro Data: 18/02/2008

Identificação	Vidro - 24mm - 0,5%				Vidro - 24mm - 1,0%				Vidro - 24mm - 1,5%			
CP	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Leitura	6,3	6,6	6,2	-	6,1	7,4	8	5	6,5	6,4	5,6	-
CTE	23,180	23,180	23,180	-	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	-
Carga (kgf)	146,03	152,99	143,72	-	141,40	171,53	185,44	115,90	150,67	148,35	129,81	-
Média (kgf)	147,58				153,57				142,94			
Desv. Pad.	4,83				31,12				11,43			
G	0,320	1,121	0,801	-	0,391	0,577	1,024	1,210	0,676	0,473	1,149	-
Outlier	não	não	não	-	não	não	não	não	não	não	não	-
RCD (kPa)	184,28				191,75				178,49			

ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

n	4	3
G _{crítico}	1,481	1,154

Aplicando Grubbs para identificação de outliers com grau de confiança de 95%.

Identificação: Fibra de Polipropileno		Data: 28/03/2008										
Identificação	Polipropileno - 12mm - 0,2%				Polipropileno - 12mm - 0,4%				Polipropileno - 12mm - 0,6%			
CP	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Leitura	6,8	5,4	5,2	5,1	6,4	8,4	6,7	8,8	8,5	9,4	8,5	8,9
CTE	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180
Carga (kgf)	157,62	125,17	120,54	118,22	148,35	194,71	155,31	203,98	197,03	217,89	197,03	206,30
Média (kgf)	121,31				175,59				204,56			
Desv. Pad.	3,54				27,84				9,90			
G	10,256	1,091	0,218	0,873	0,978	0,687	0,729	1,020	0,761	1,346	0,761	0,176
Outlier	sim	não	não	não	não	não	não	não	não	não	não	não
RCD (kPa)	151,47				219,25				255,43			

Identificação: Fibra de Polipropileno		Data: 28/03/2008										
Identificação	Polipropileno - 30mm - 0,2%				Polipropileno - 30mm - 0,4%				Polipropileno - 30mm - 0,6%			
CP	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Leitura	5,6	5,9	5,6	7,4	9,3	8,6	7,2	9,3	8,8	7	12,3	13,2
CTE	22,180	23,180	23,180	24,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	23,180	24,180
Carga (kgf)	124,21	136,76	129,81	178,93	215,57	199,35	166,90	215,57	203,98	162,26	285,11	319,18
Média (kgf)	142,43				199,35				242,63			
Desv. Pad.	24,87				22,95				72,15			
G	0,733	0,228	0,507	1,468	0,707	0,000	1,414	0,707	0,536	1,114	0,589	1,061
Outlier	não	não	não	não	não	não	não	não	não	não	não	não
RCD (kPa)	177,84				248,92				302,97			

ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL NA UMIDADE ÓTIMA

Aplicando Grubbs para identificação de outliers com grau de confiança de 95%.

Identificação: Sem Secagem

Data: 13/09/2008

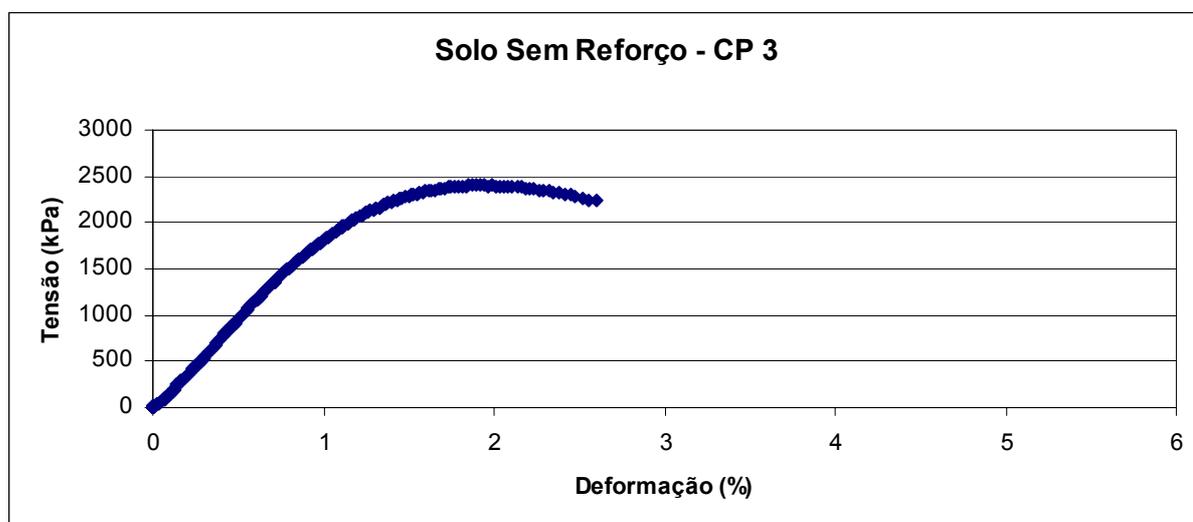
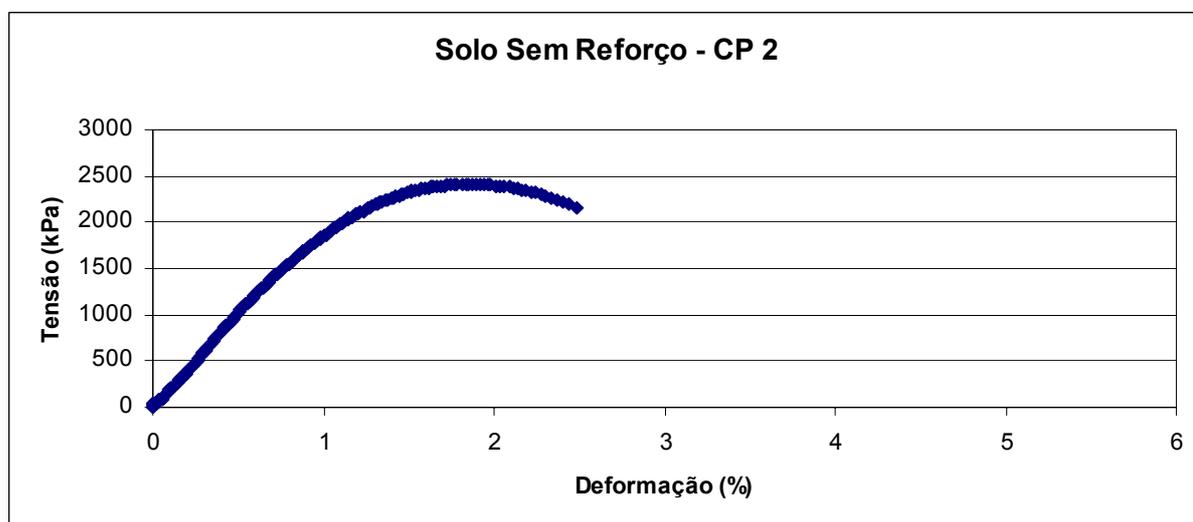
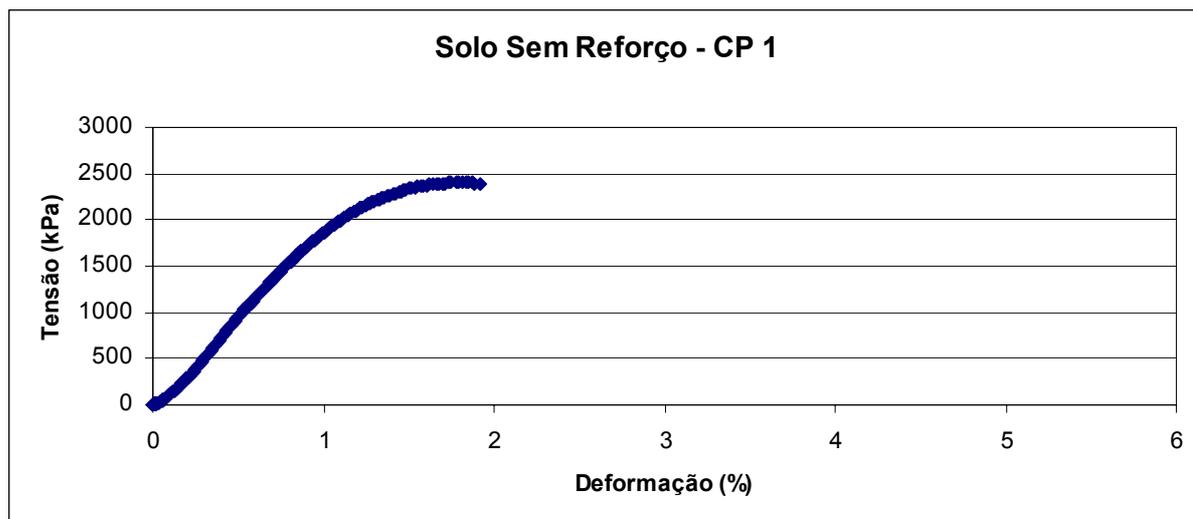
n	4
G _{crítico}	1.481

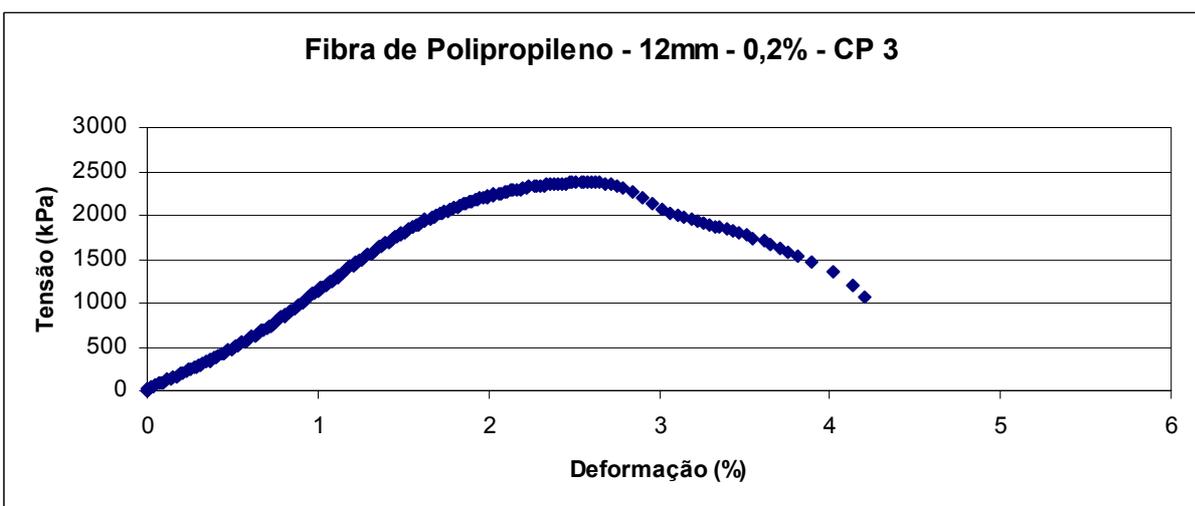
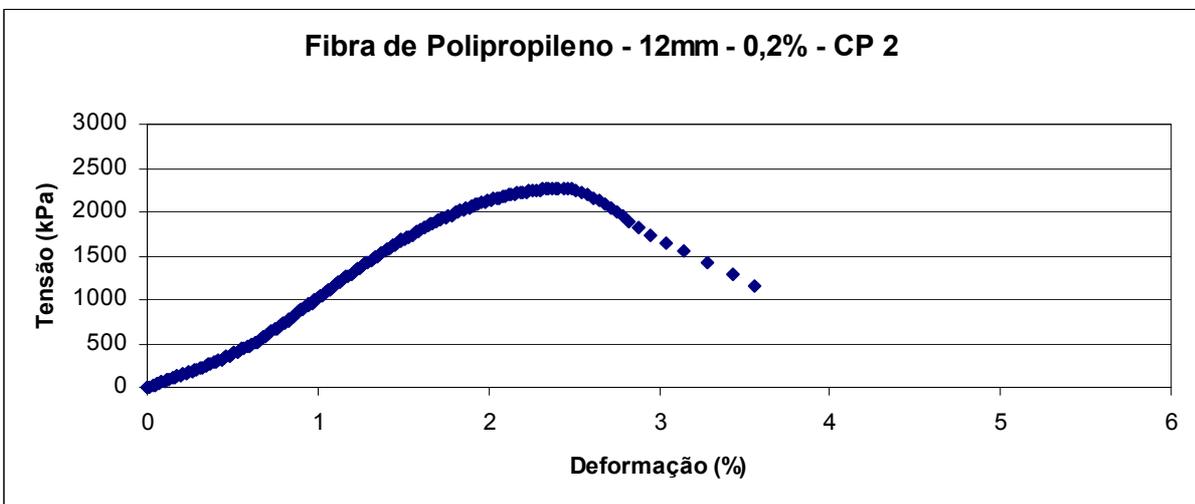
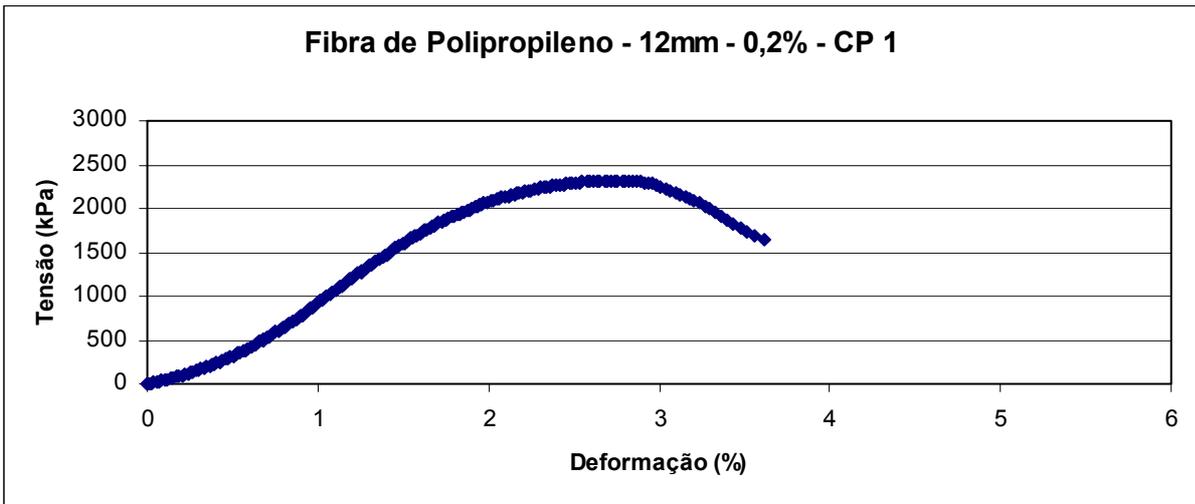
Identificação	Sem Reforço - Wot				Vidro - 24mm - 0,5% - Wot			
	1	2	3	4	1	2	3	4
CP	1	2	3	4	1	2	3	4
Leitura	1.4	1.5	1.5	1.5	1.3	1.3	1.3	1.2
CTE	23.180	23.180	23.180	23.180	23.180	23.180	23.180	23.180
Carga	32.45	34.77	34.77	34.77	30.13	30.13	30.13	27.82
Média	34.19				29.55			
Desv. Pad.	1.16				1.16			
G	1.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	1.500
Outlier	sim	não	não	não	não	não	não	sim
RCD (kPa)	42.69				36.90			

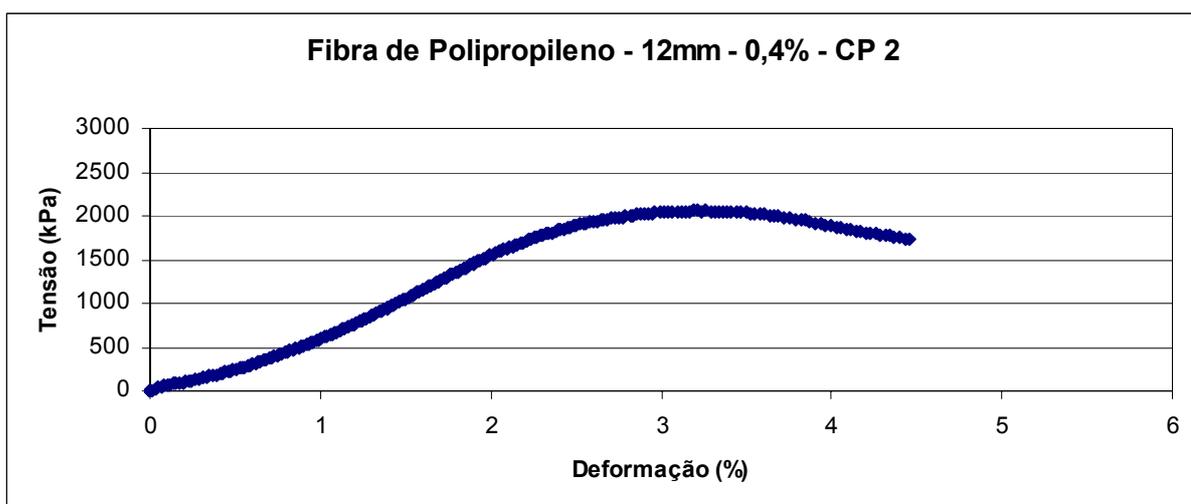
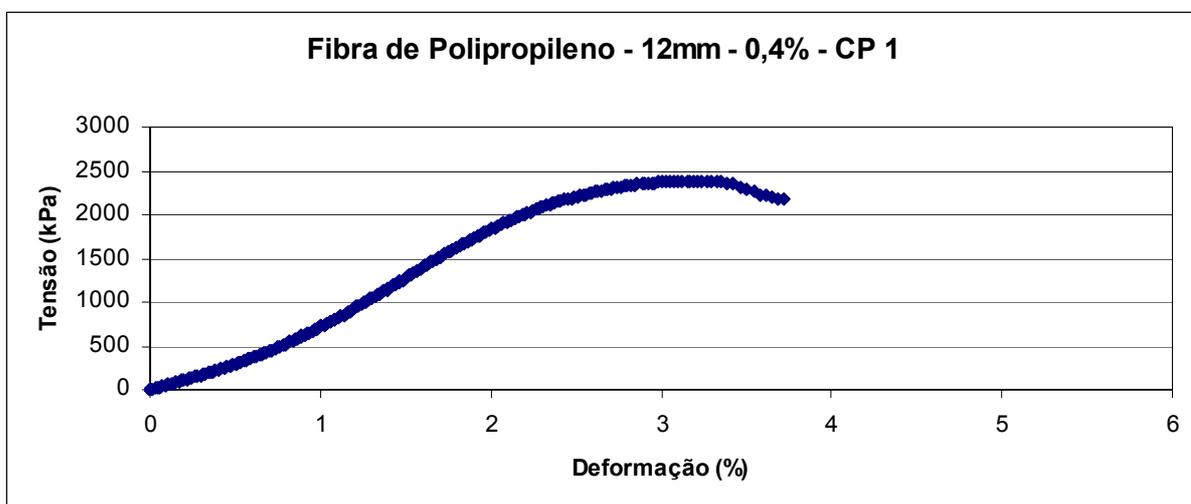
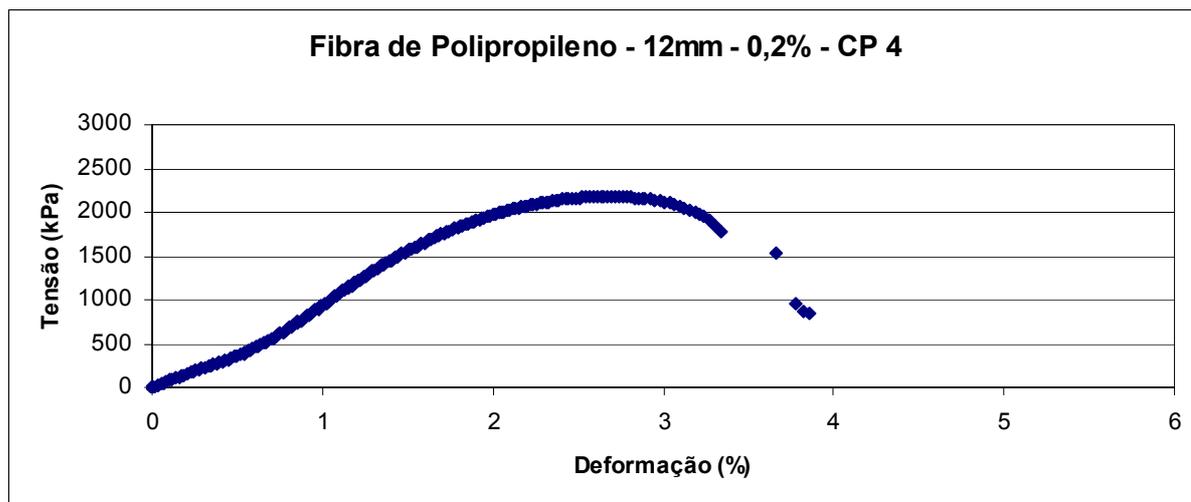
Identificação	Polipropileno - 12mm - 0,2% - Wot				Polipropileno - 12mm - 0,4% - Wot			
	1	2	3	4	1	2	3	4
CP	1	2	3	4	1	2	3	4
Leitura	2.4	2	2	2.1	1.5	1.6	1.7	1.6
CTE	23.180	23.180	23.180	23.180	23.180	23.180	23.180	23.180
Carga	55.63	46.36	46.36	48.68	34.77	37.09	39.41	37.09
Média	49.26				37.09			
Desv. Pad.	4.39				1.89			
G	1.453	0.660	0.660	0.132	1.225	0.000	1.225	0.000
Outlier	não	não	não	não	não	não	não	não
RCD (kPa)	61.51				46.31			

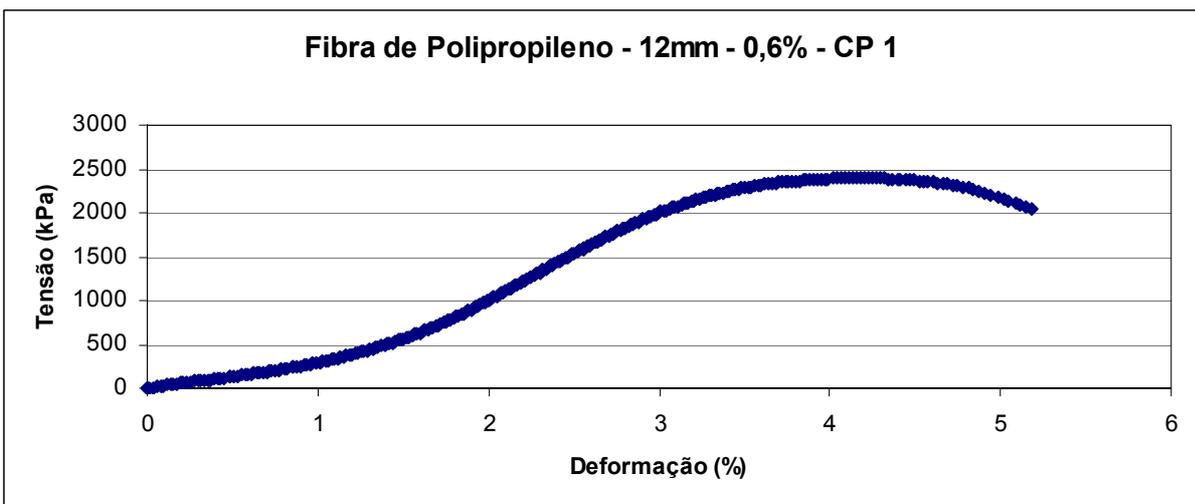
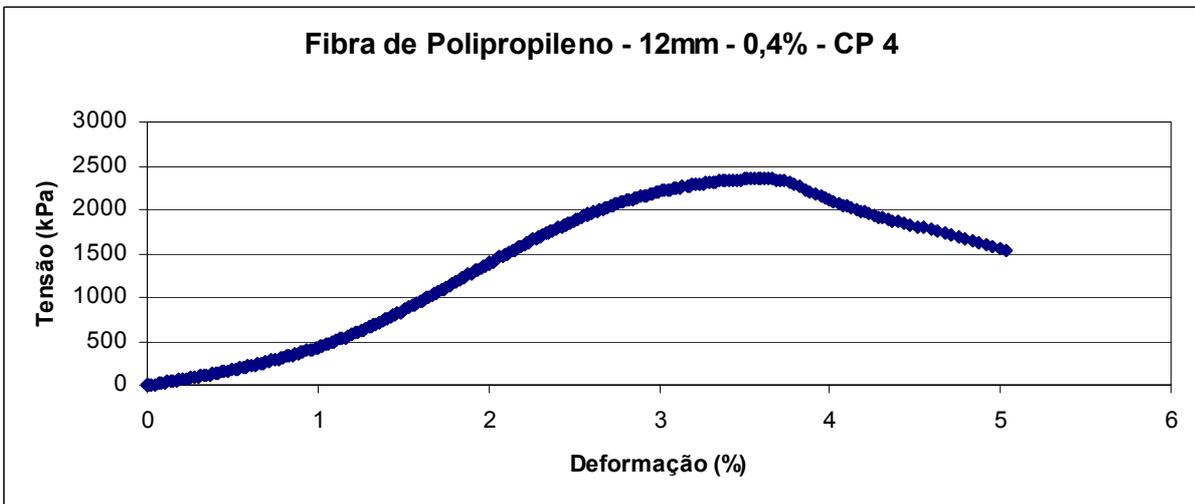
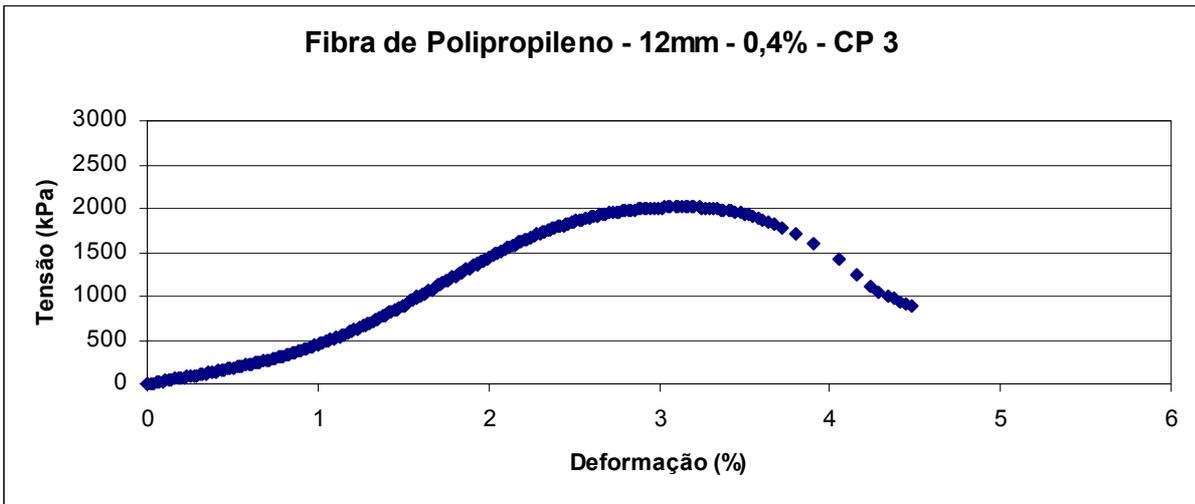
ANEXO II

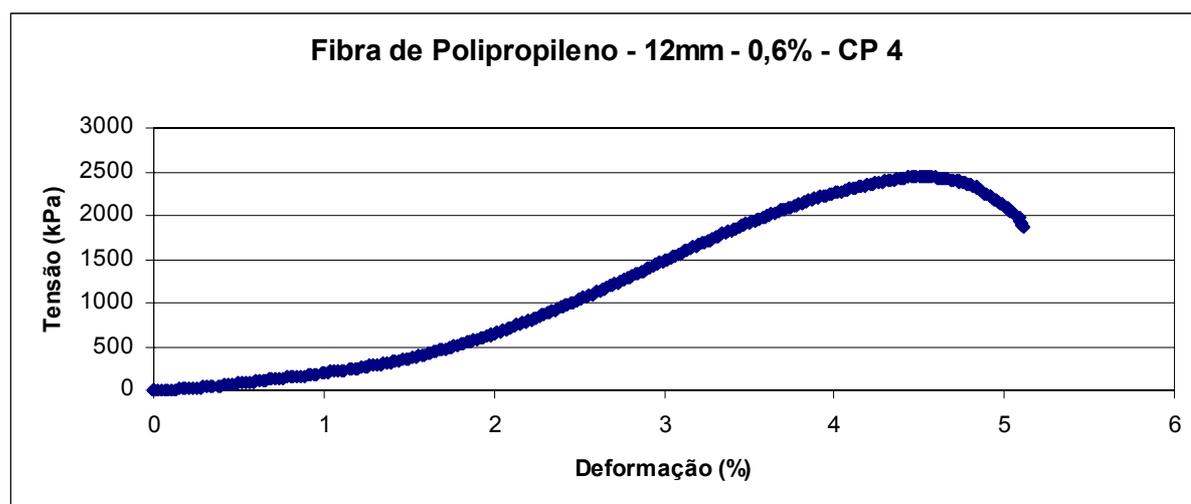
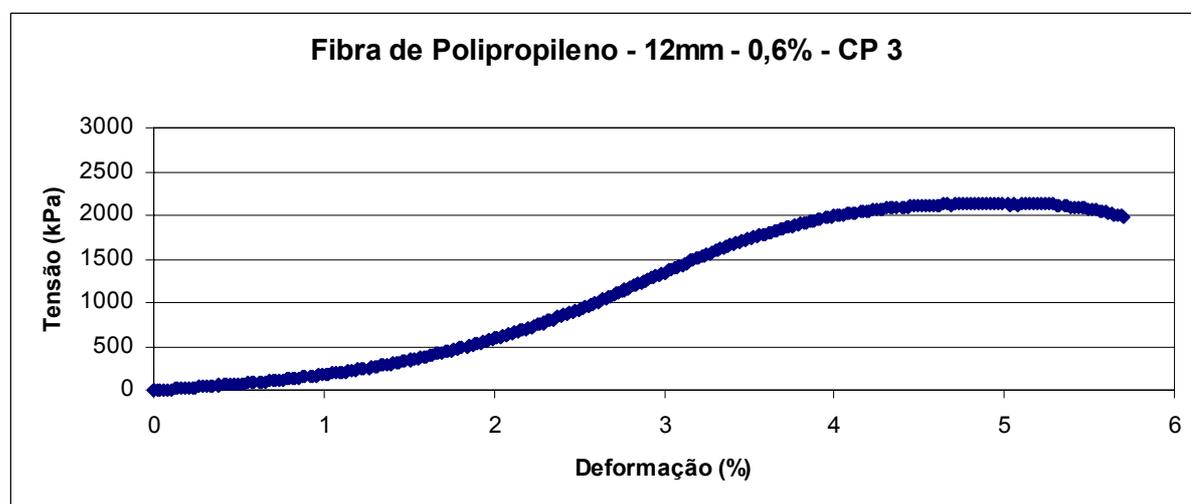
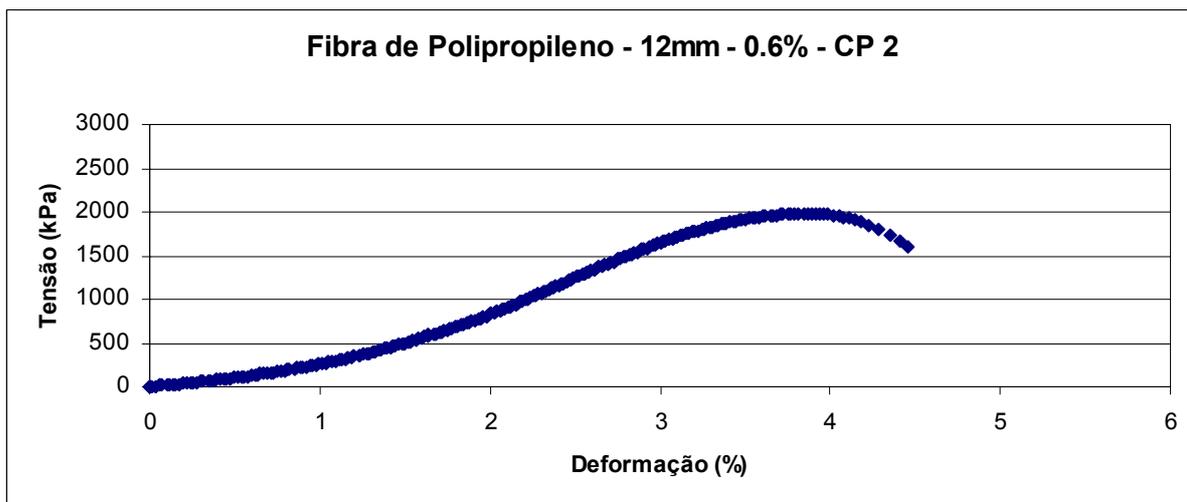
CURVAS TENSÃO DEFORMAÇÃO OBTIDAS NOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO
SIMPLES

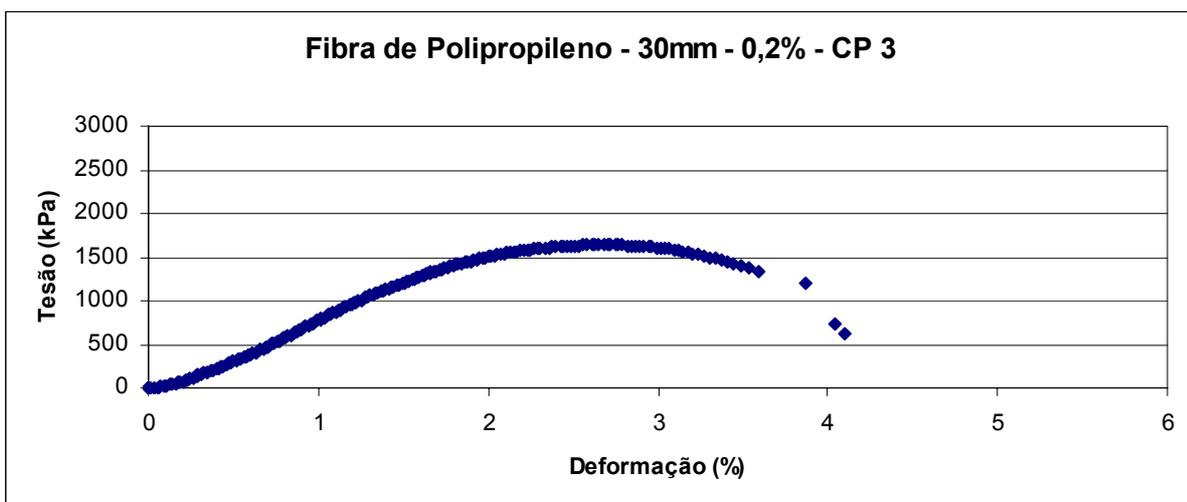
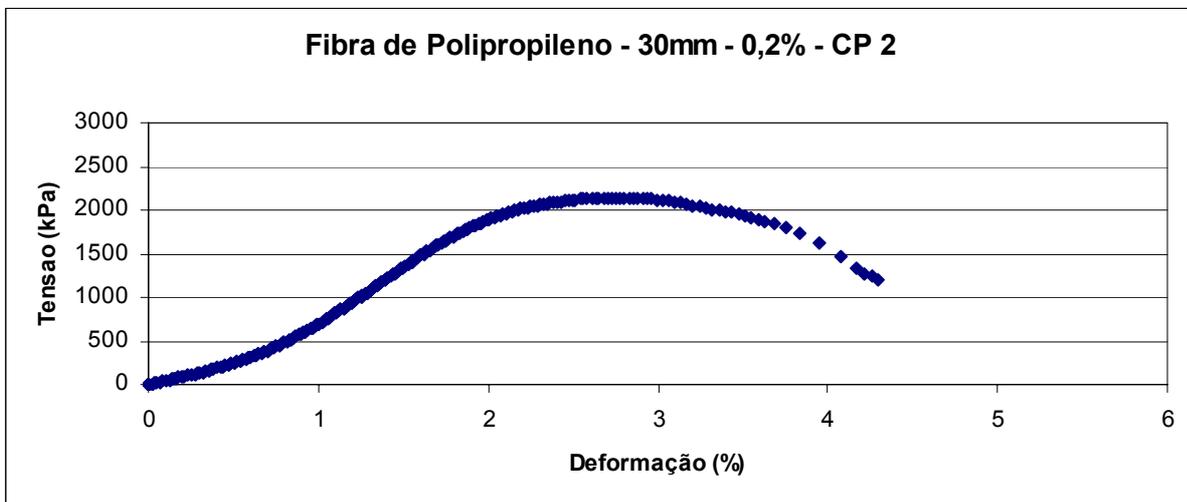
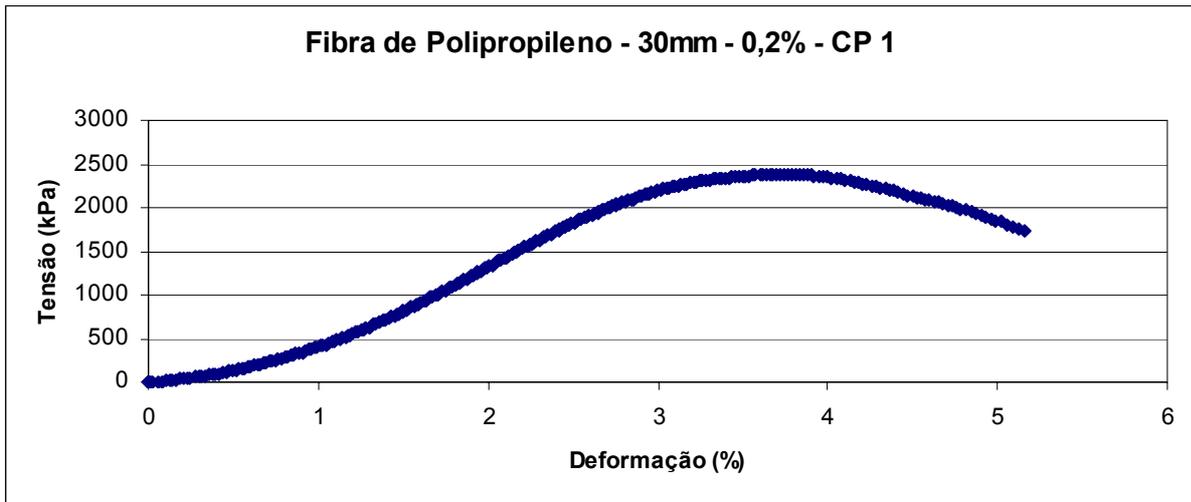


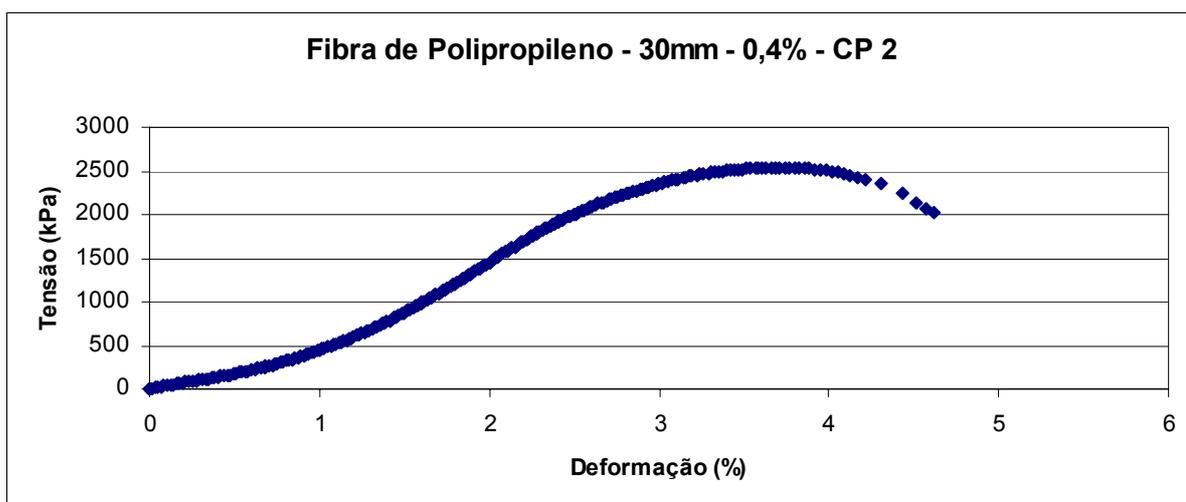
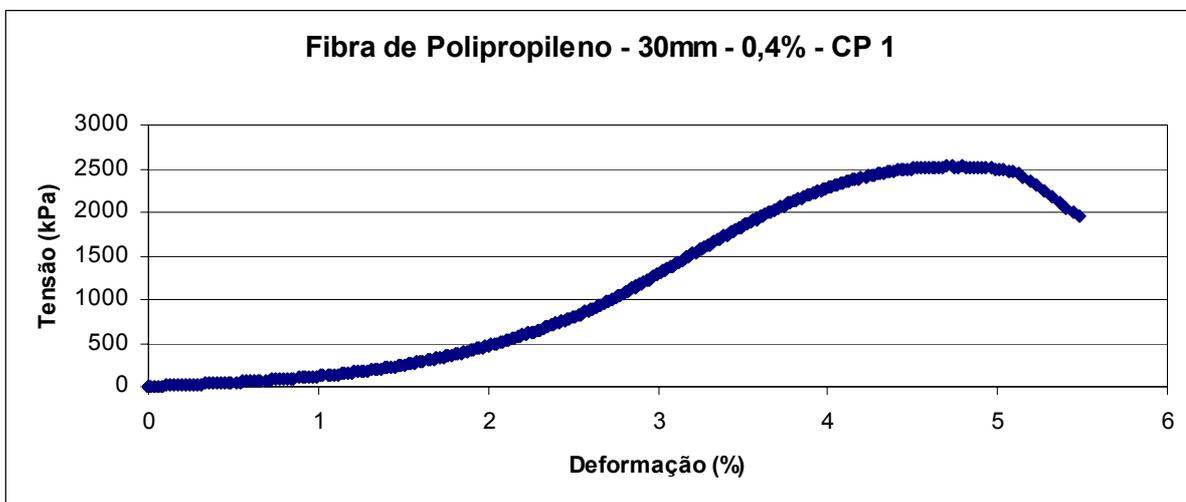
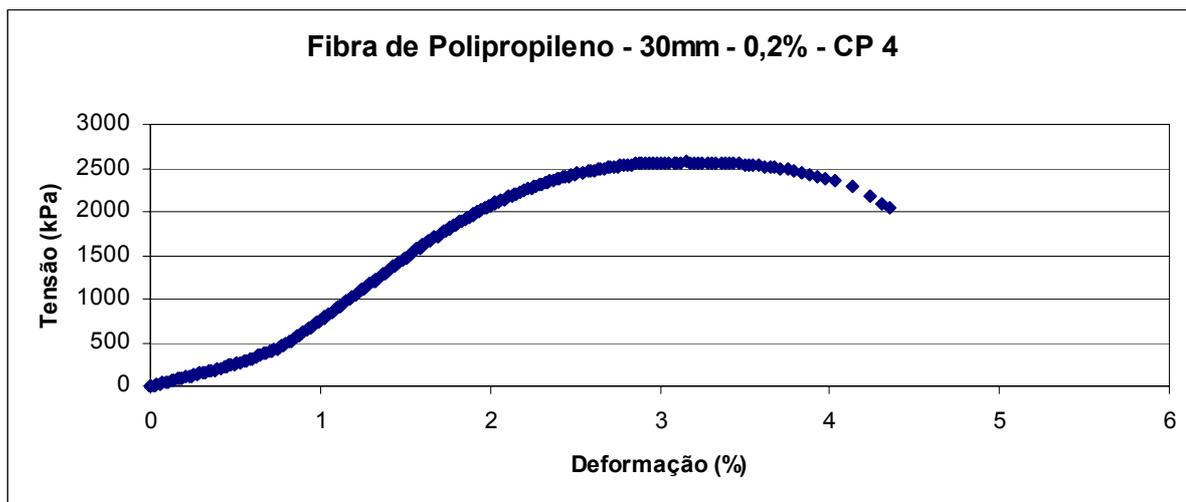


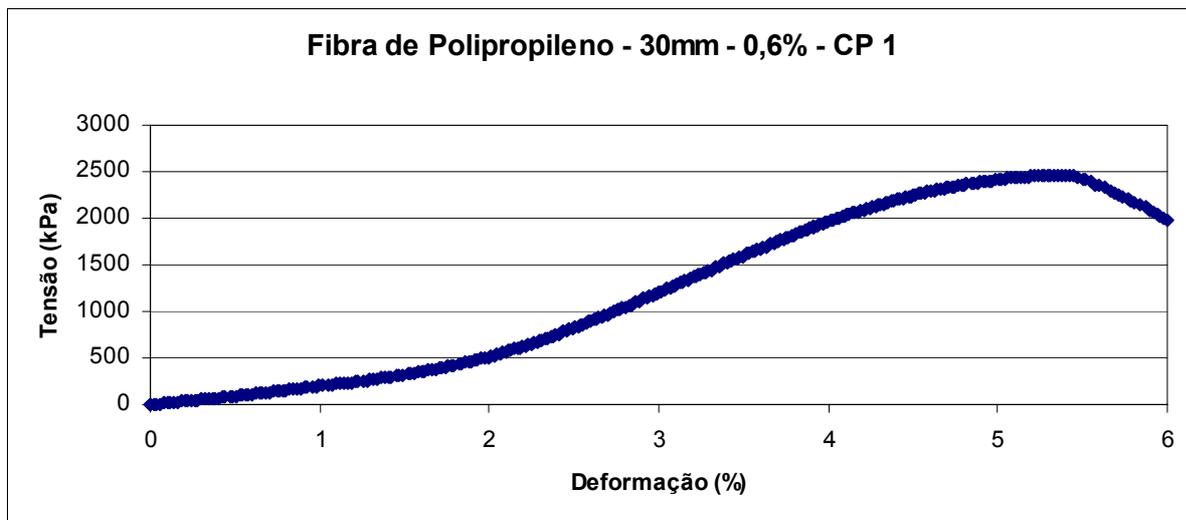
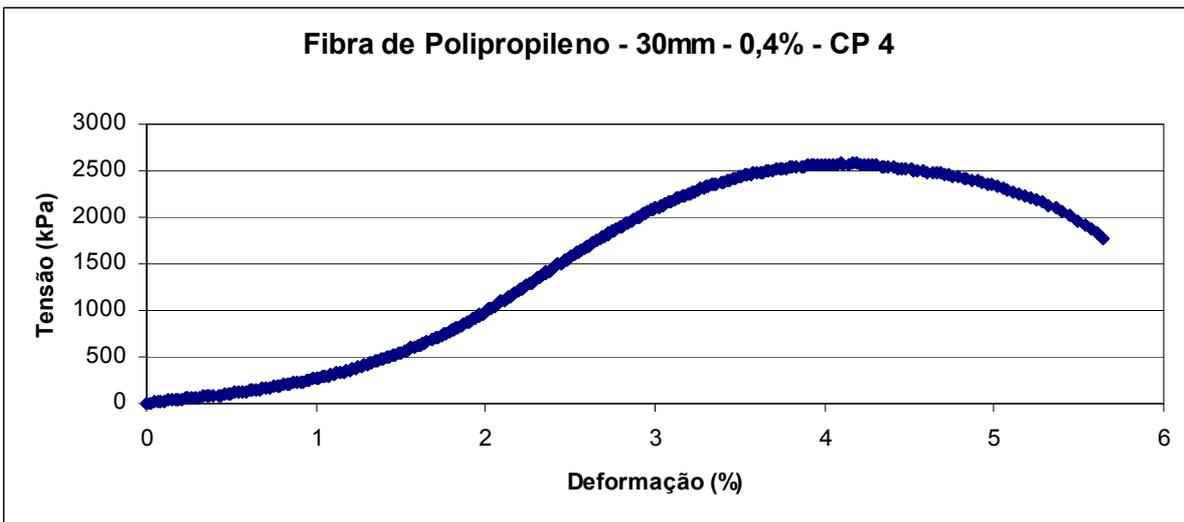
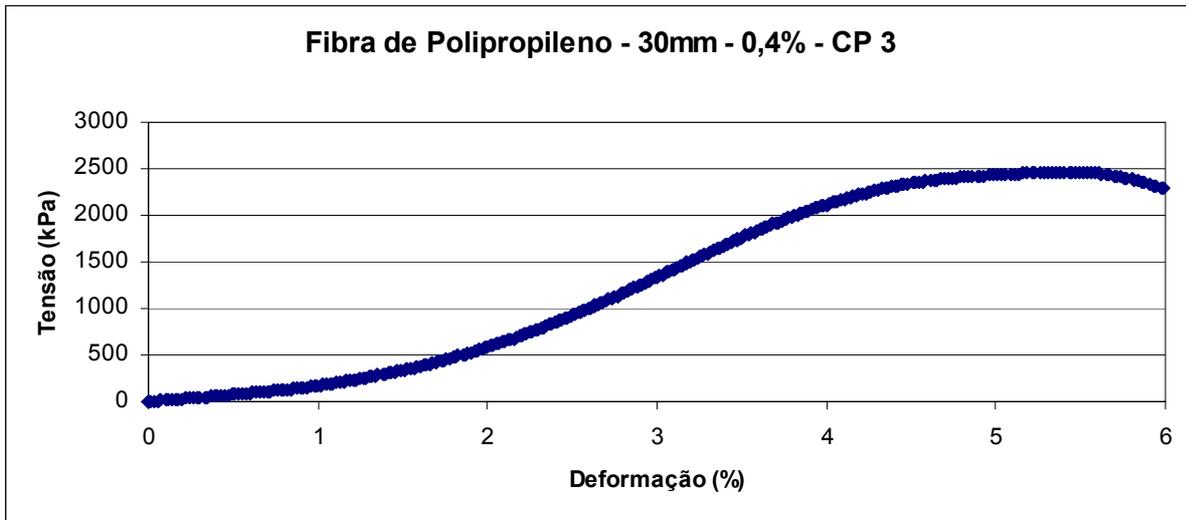


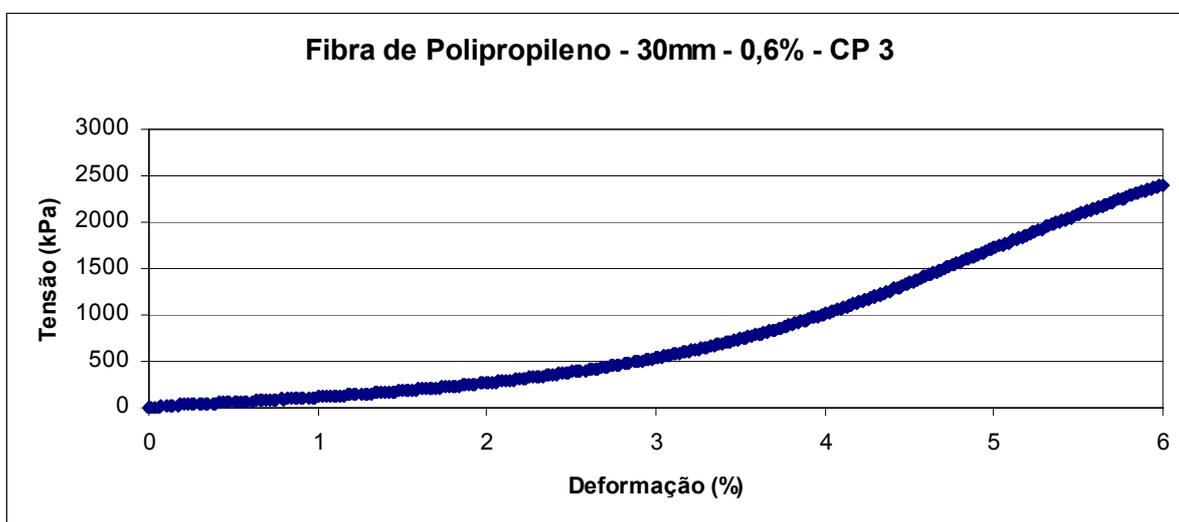
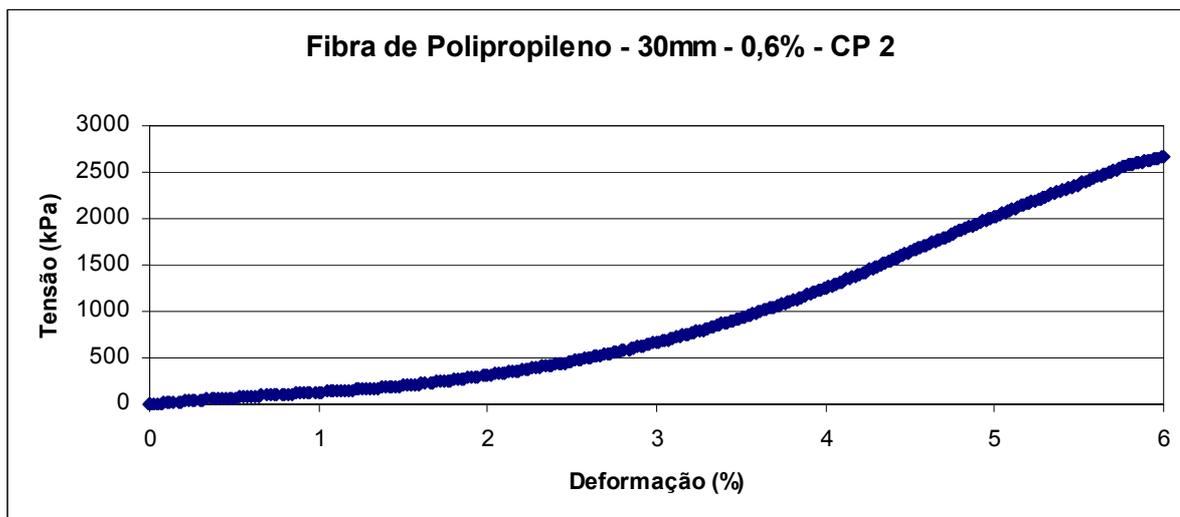


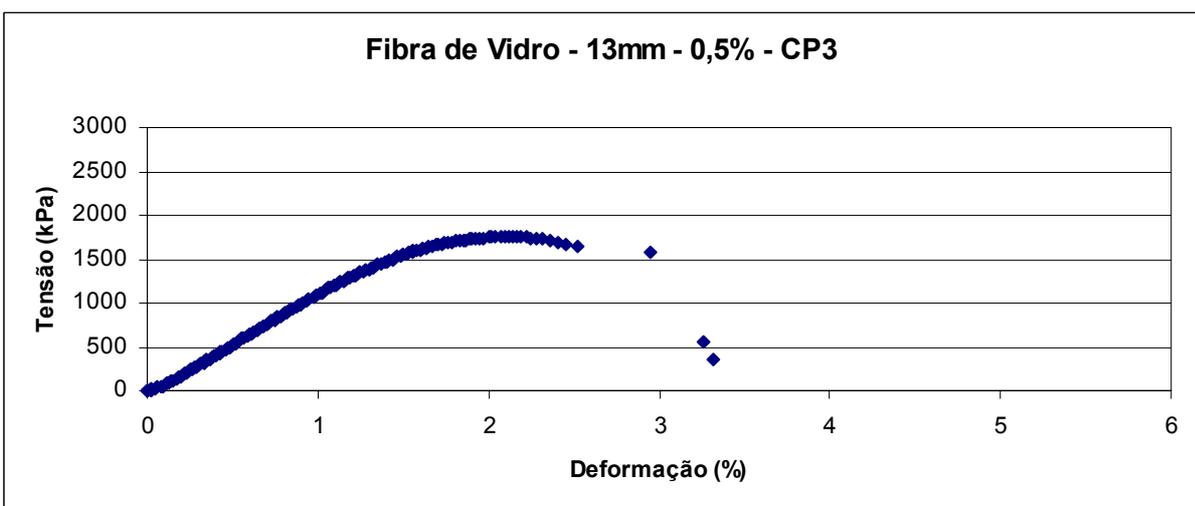
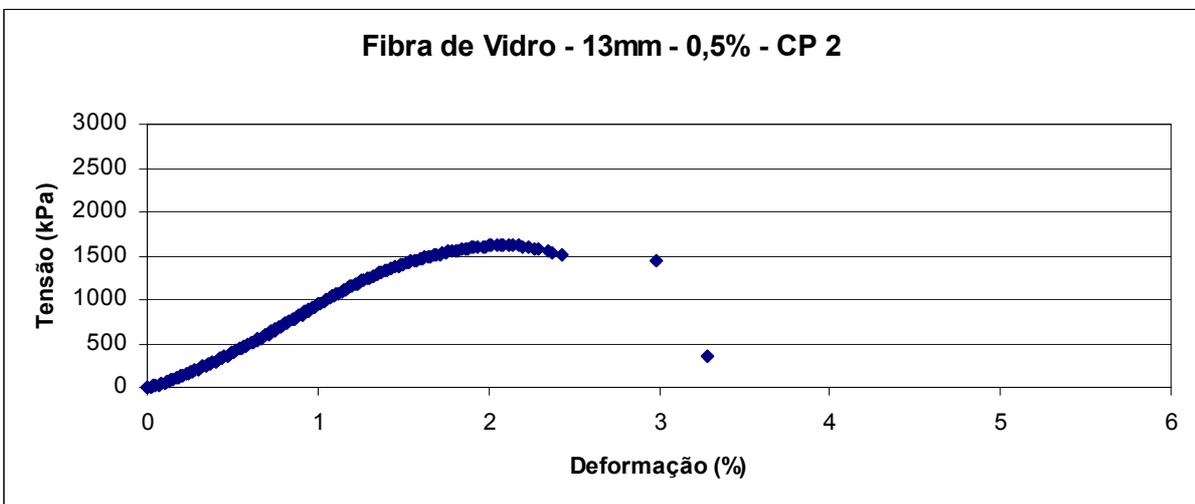
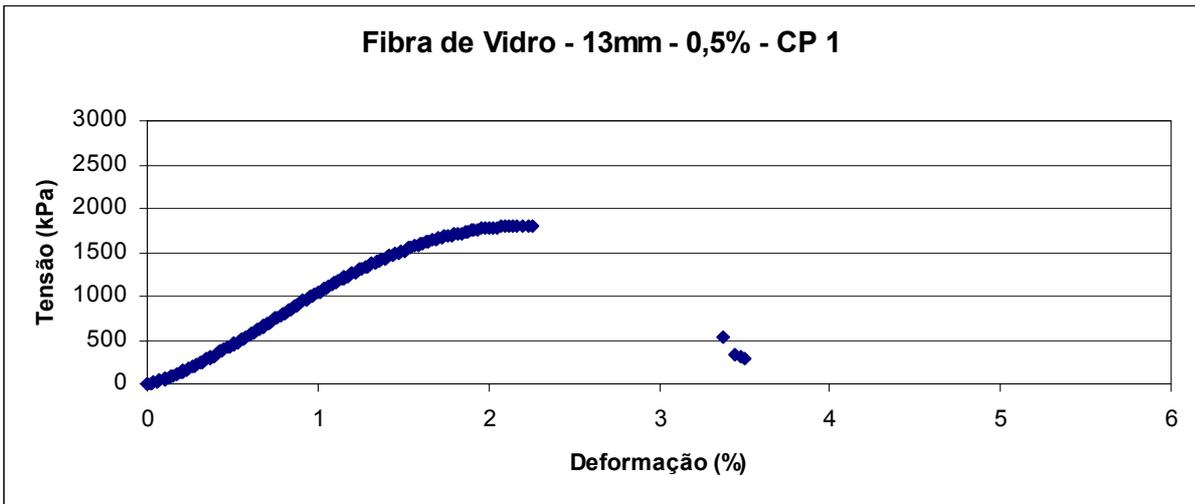


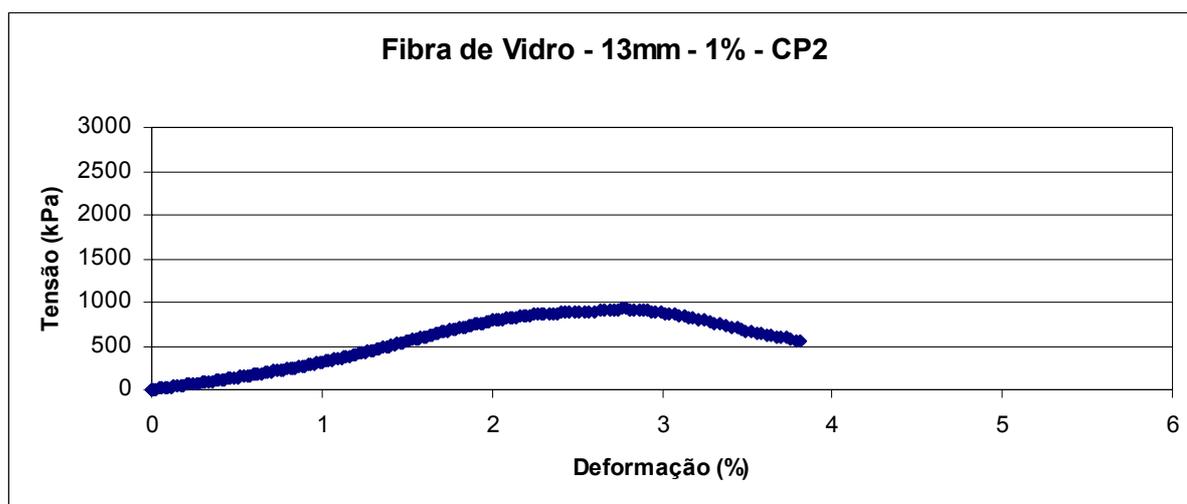
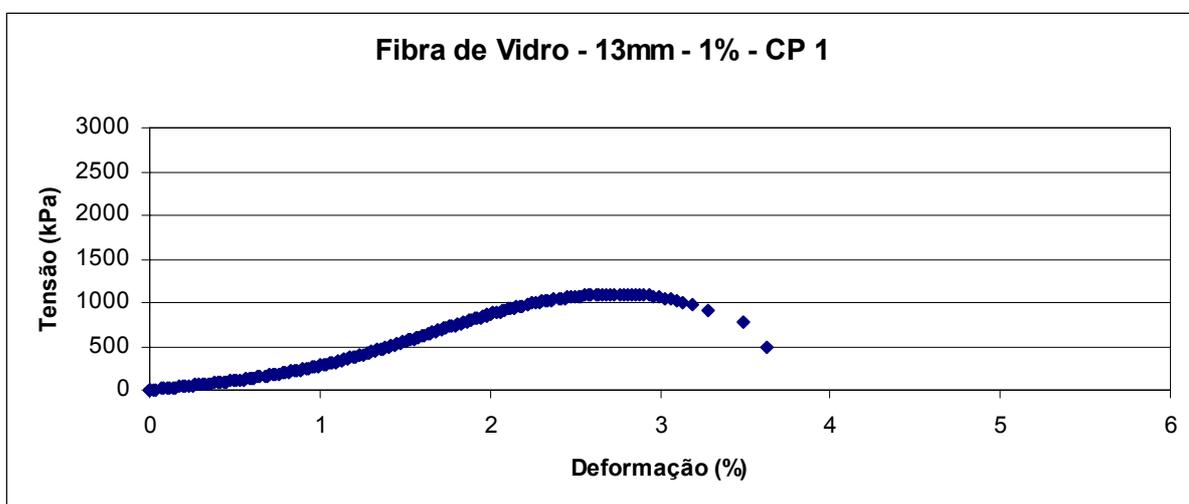
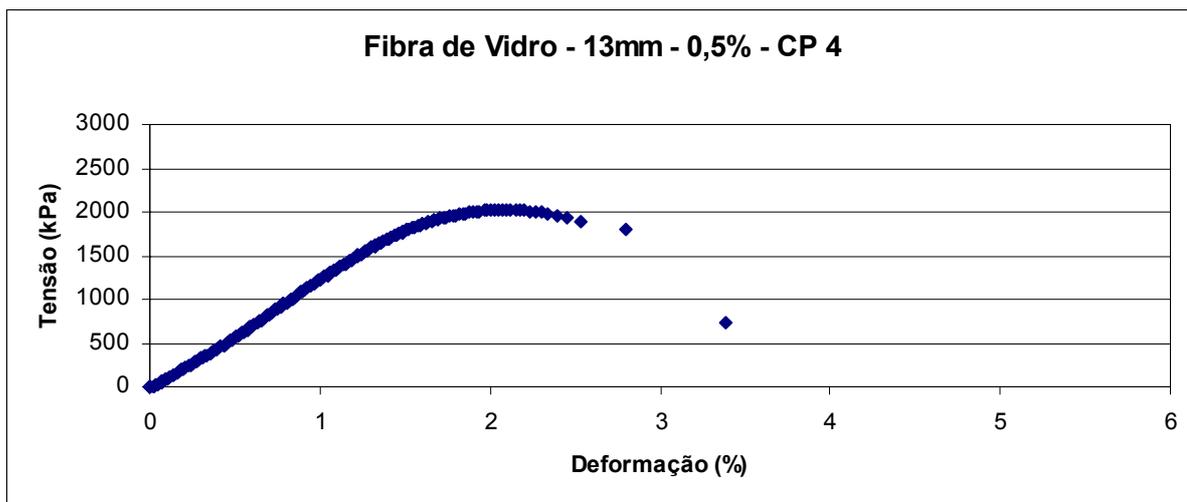


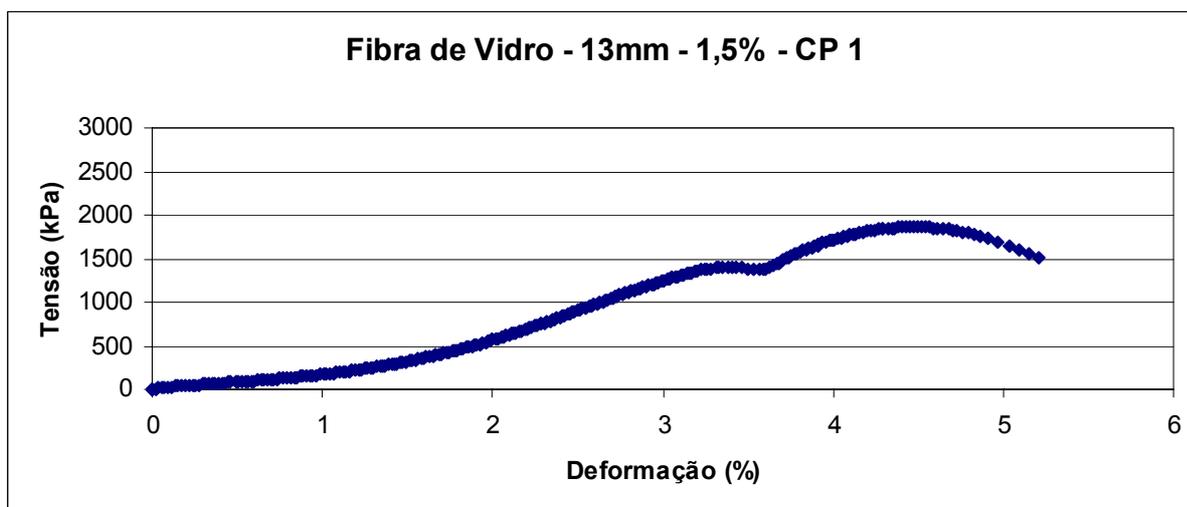
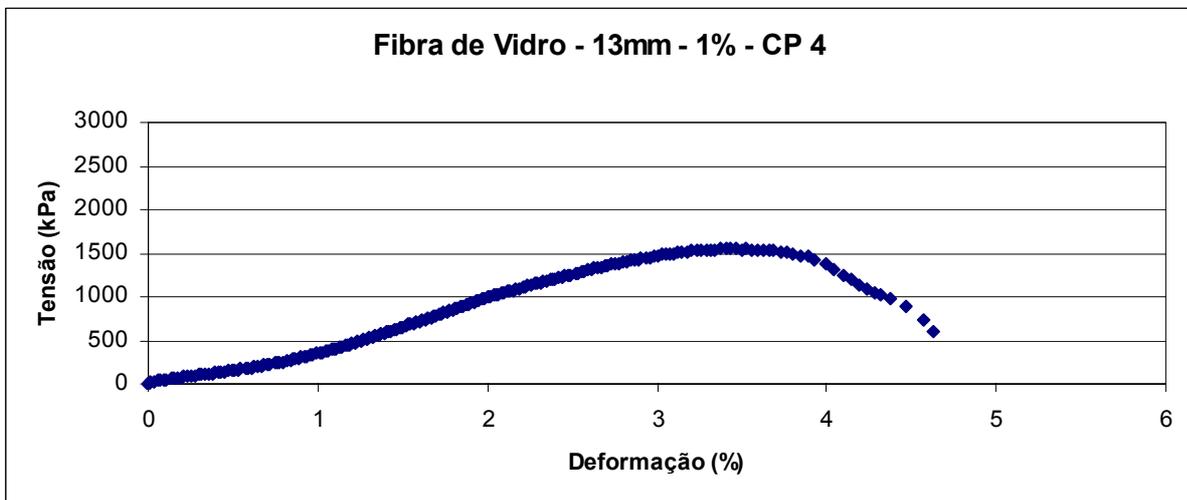
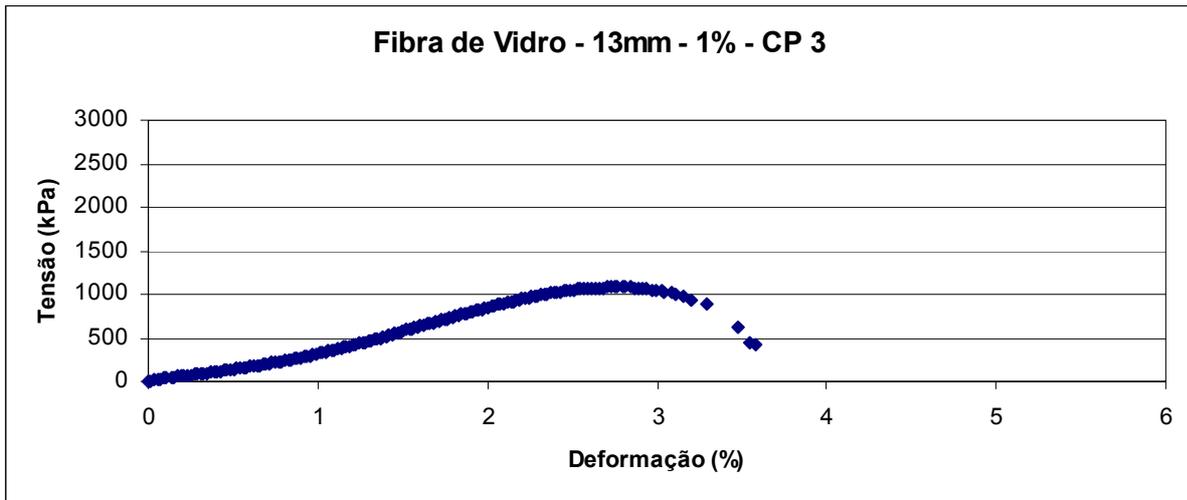


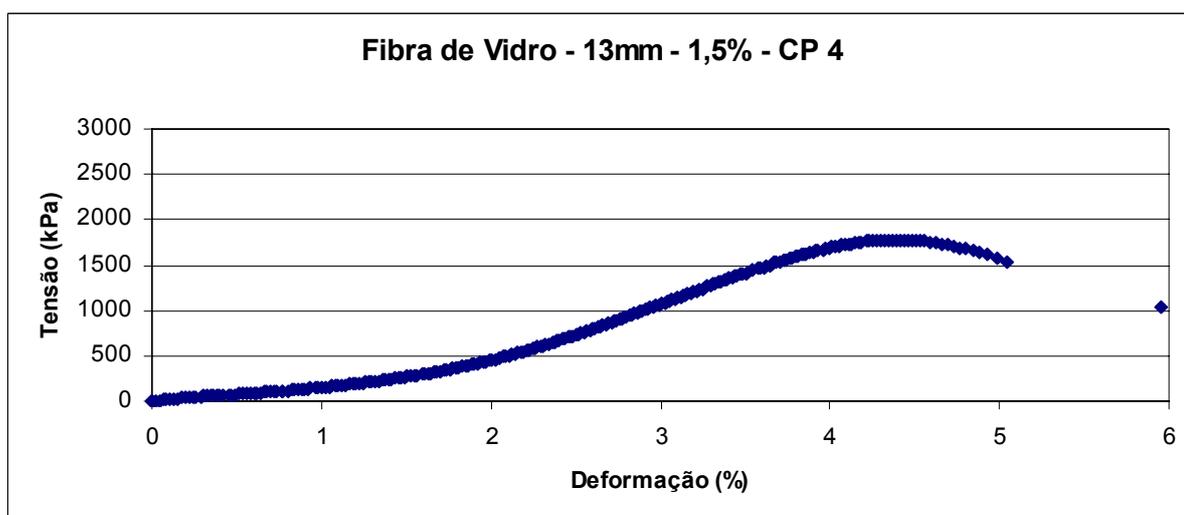
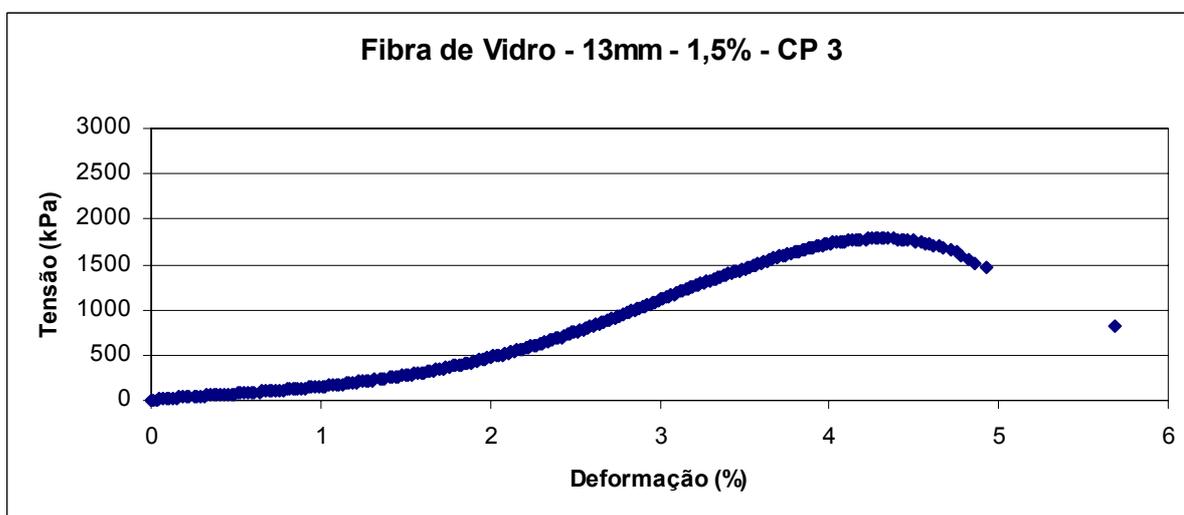
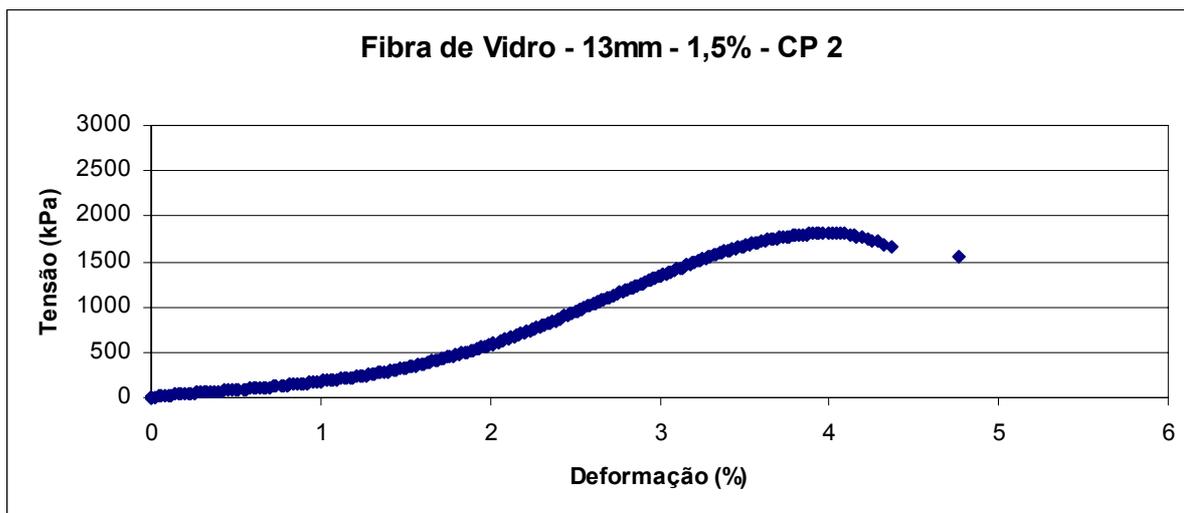


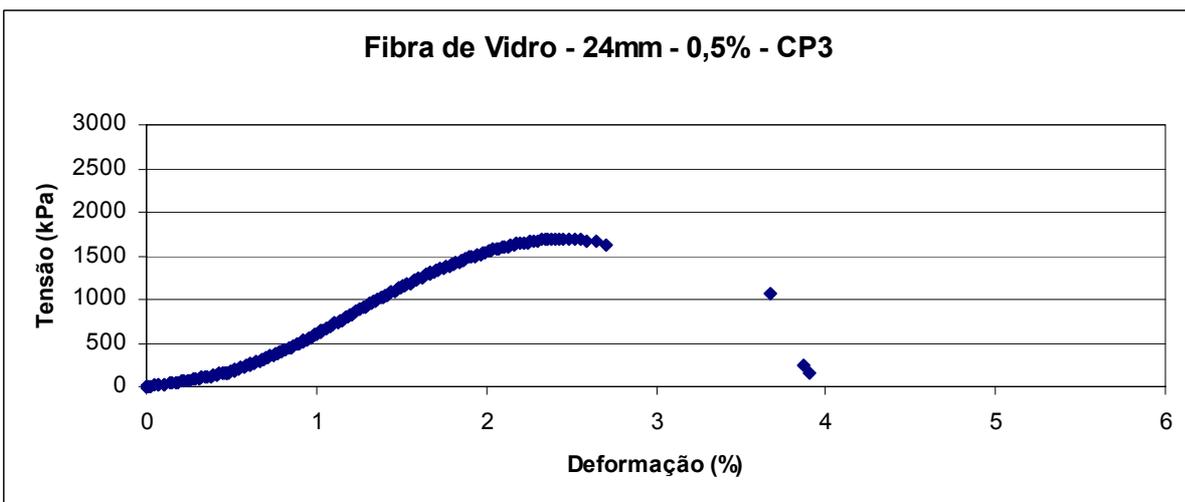
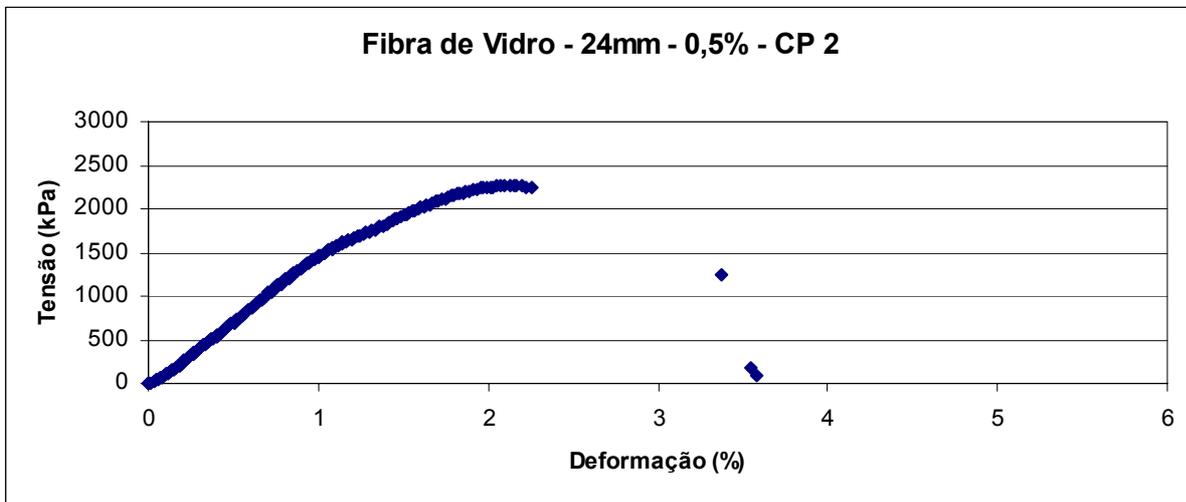
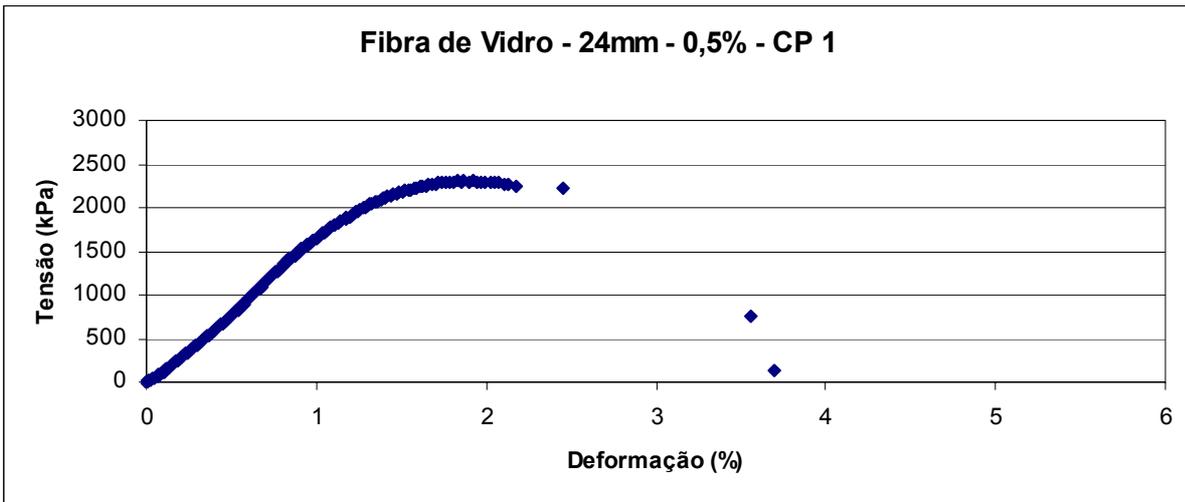


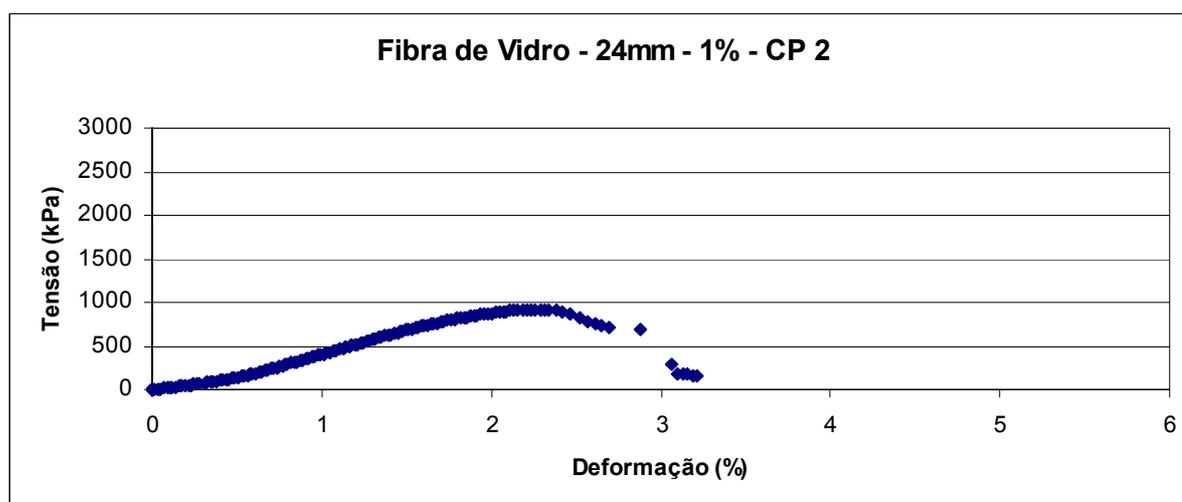
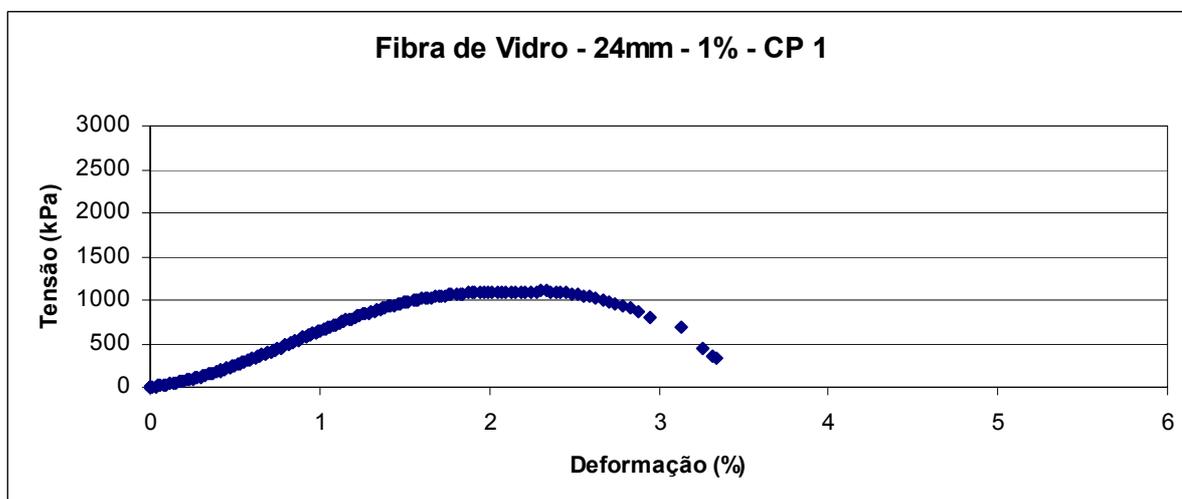
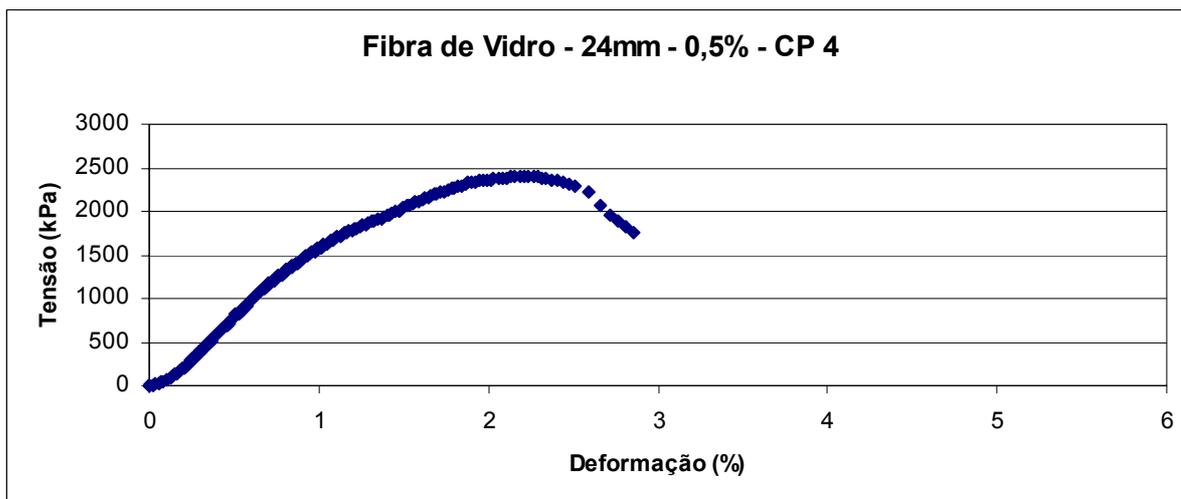


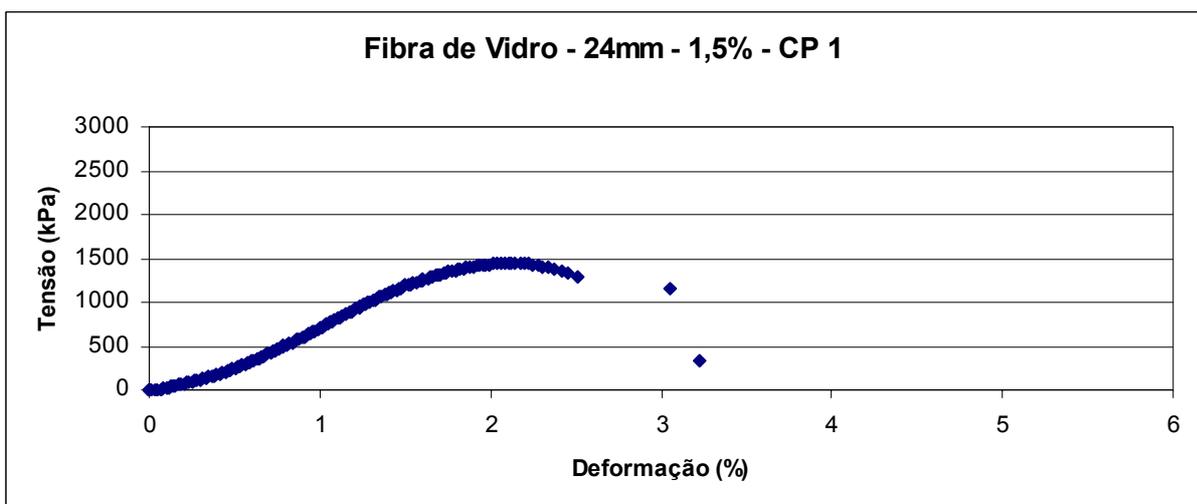
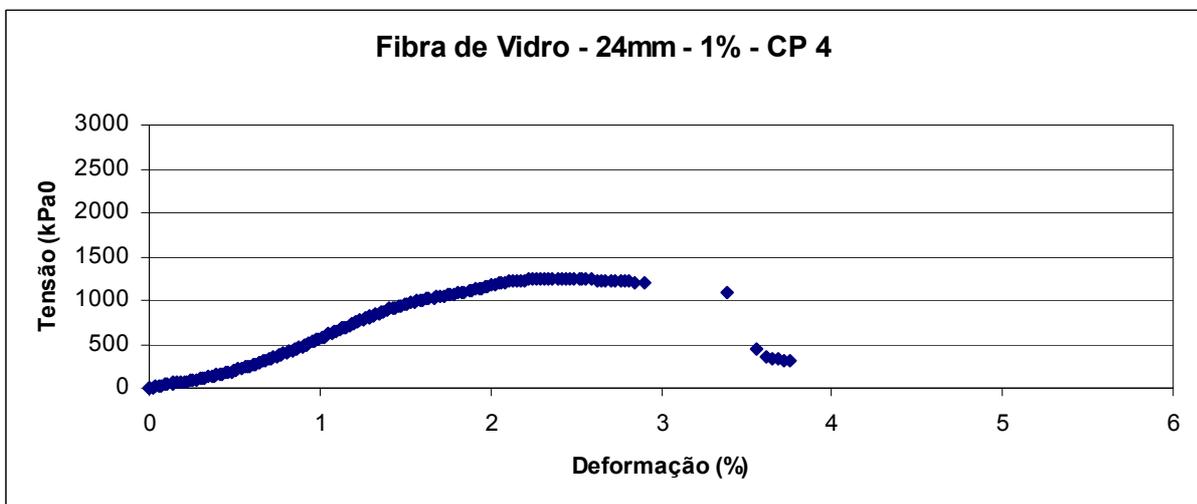
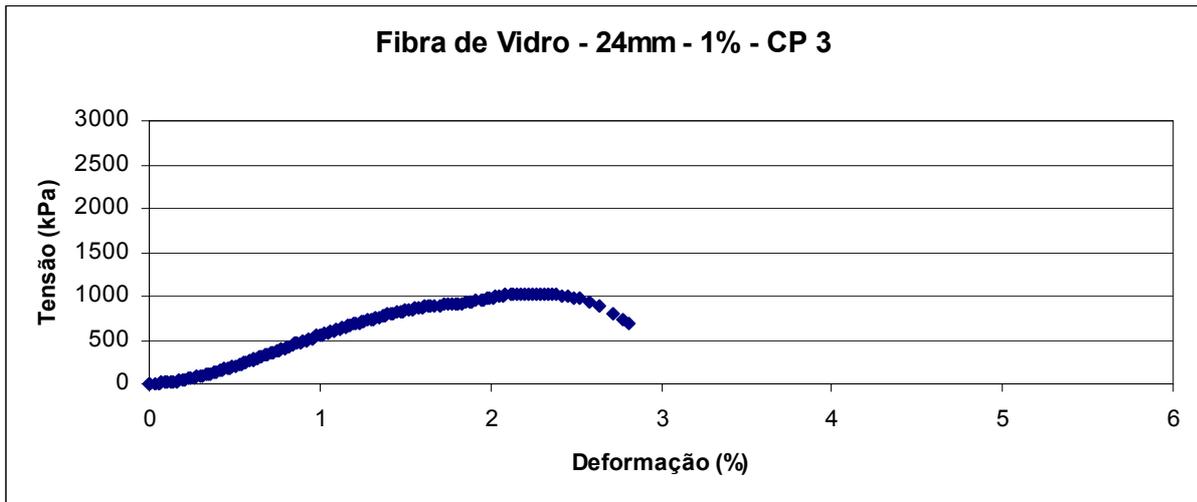


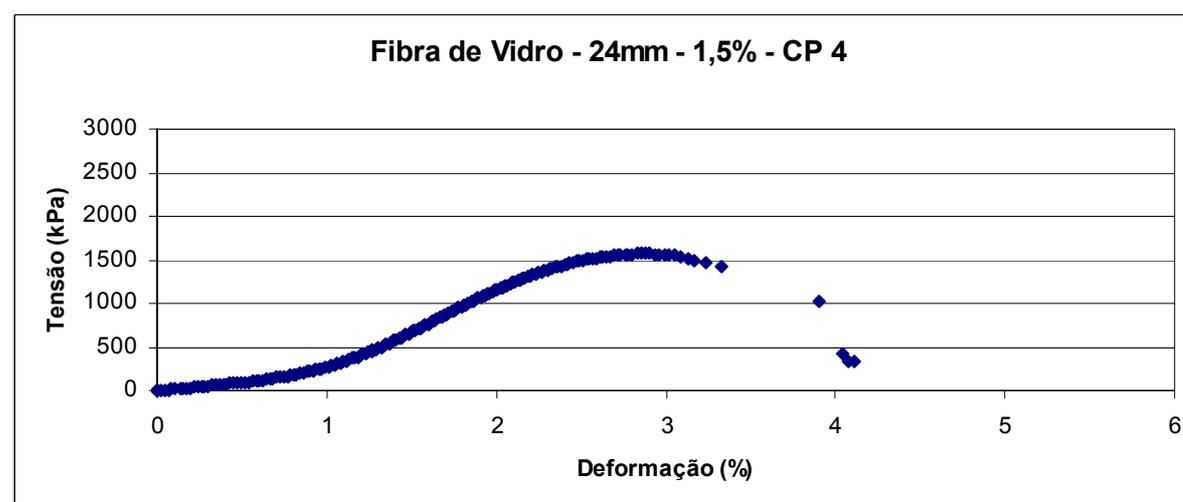
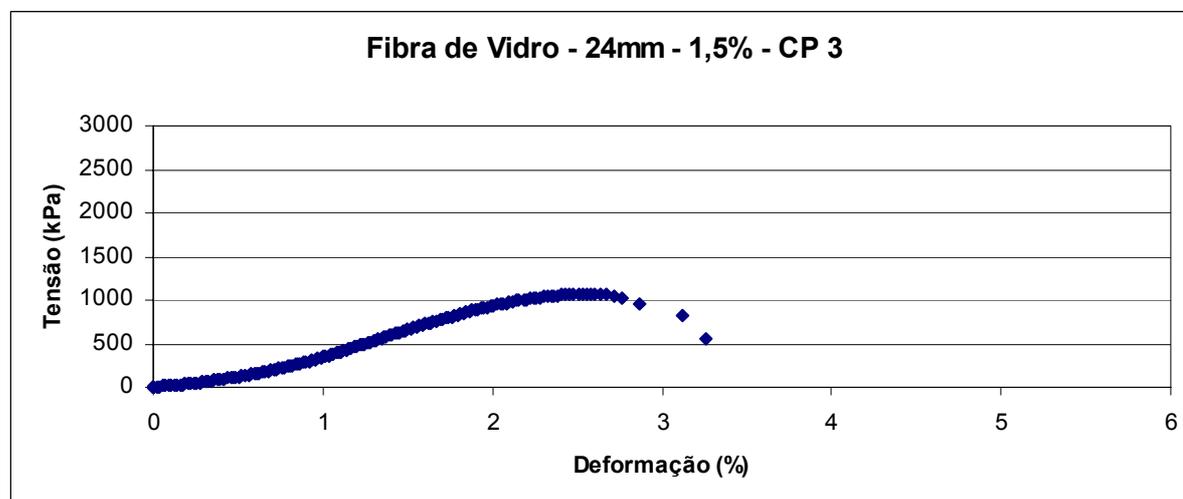
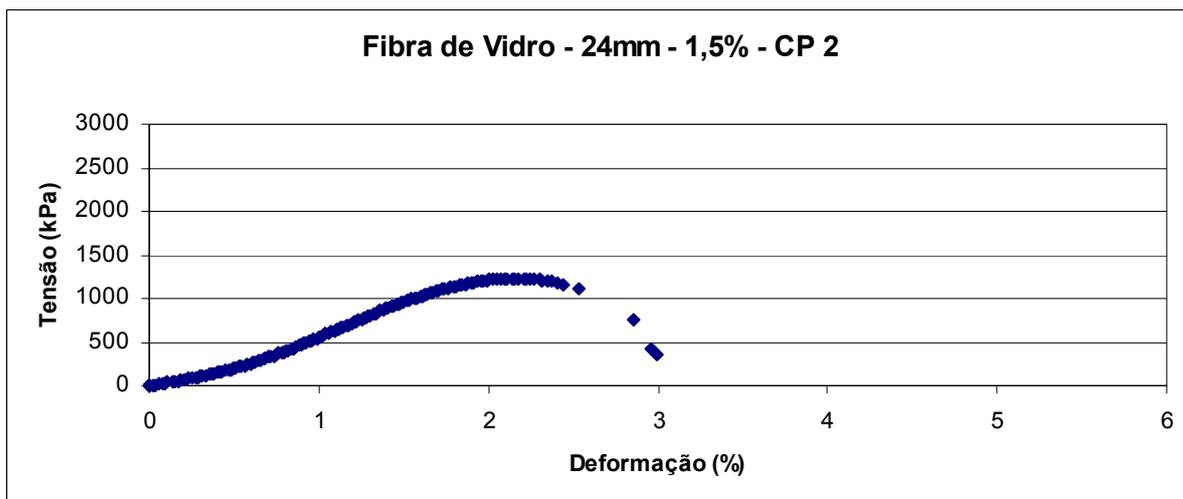












Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)