



# REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



**Tese de Doutorado**

**"Estudo do Comportamento Mecânico de Compósitos Solo-Fibras Vegetais Impermeabilizadas com Solução de Poliestireno Expandido (EPS) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)"**



**Autora: Gislene Aparecida Santiago**  
**Orientador: Prof. D.Sc. Vagner Roberto Botaro**  
**Co-Orientador: Prof. Ph.D. Nilo Cesar Consoli**

**Dezembro de 2011**



# REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

**Gislene Aparecida Santiago**

**"Estudo do Comportamento Mecânico de Compósitos Solo-Fibras Vegetais Impermeabilizadas com Solução de Poliestireno Expandido (EPS) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)"**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Análise e Seleção de Materiais  
Orientador: Prof. D.Sc. Vagner Roberto Botaro  
Co-orientador: Prof. Ph.D. Nilo Cesar Consoli

Ouro Preto, Dezembro de 2011

S235e

Santiago, Gislene Aparecida.

Estudo do comportamento mecânico de Compósitos Solo - Fibras Vegetais impermeabilizadas com Solução de Poliestireno Expandido (EPS) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) [manuscrito] / Gislene Aparecida Santiago – 2011. 130f.: il., color.; graf.; tabs.

Orientadores: Prof. DSc. Vagner Roberto Botaro e Prof. PhD. Nilo César Consoli.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Rede Temática em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Análise e Seleção de Materiais.

1. Compostos fibrosos - Teses.
  2. Solos - Correção - Teses.
  3. Poliestireno – Teses.
  4. Betume – Teses.
- I. Botaro, Vagner Roberto. II. Consoli, Nilo César. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 620.168:624.131

Catálogo: [sisbin@sisbin.ufop.br](mailto:sisbin@sisbin.ufop.br)



**REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

UFOP - CETEC - UEMG

Pós-Graduação em Engenharia de Materiais



**“Estudo do Comportamento Mecânico de Compósitos Solo-Fibras Vegetais Impermeabilizadas com Solução de Poliestireno Expandido (EPS) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)”**

**Autora: Gislene Aparecida Santiago**

Tese defendida e aprovada, em 14 de dezembro de 2011, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Vagner Roberto Botaro (Doutor) – Orientador  
Universidade Federal de São Carlos / REDEMAT

Prof. Vanessa de Freitas Cunha Lins (Doutora)  
Universidade Federal de Minas Gerais

Profª Christianne de Lyra Nogueira (Doutora)  
Universidade Federal de Ouro Preto

Profª Maria Célia da Silva Lanna (Doutora)  
Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Stélio Maia Menezes (Doutor)  
Universidade Federal de São João Del Rei

*Ao meu amado filho Gustavo, razão da minha vida.*

*Com muito amor e gratidão à minha mãe e à memória de meu pai,  
que deixou o incentivo ao conhecimento como maior herança.*

*“Estamos diante de um momento crítico na história da Terra, numa época em que a humanidade deve escolher o seu futuro. À medida que o mundo torna-se cada vez mais interdependente e frágil, o futuro reserva, ao mesmo tempo, grande perigo e grande esperança. Para seguir adiante, devemos reconhecer que, no meio de uma magnífica diversidade de culturas e formas de vida, somos uma família humana e uma comunidade terrestre com um destino comum. Devemos nos juntar para gerar uma sociedade sustentável global fundada no respeito pela natureza, nos direitos humanos universais, na justiça econômica e numa cultura da paz. Para chegar a este propósito, é imperativo que nós, os povos da Terra, declaremos nossa responsabilidade uns para com os outros, com a grande comunidade de vida e com as futuras gerações.”*

O Texto da Carta da Terra - Preâmbulo

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela capacidade intelectual, por iluminar meu caminho e me dar saúde e perseverança para realizar este trabalho.

Ao professor Vagner Botaro, pela orientação, disponibilidade, dedicação, amizade, confiança, pela motivação, alegria e grande entusiasmo com os resultados obtidos, sempre, desde os tempos do mestrado! É MUITO BOM ter um orientador assim!

Ao professor Nilo Consoli, pela acolhida do tema, pela orientação, atenção e disponibilidade. Por ter “aberto as portas” da UFRGS para que eu pudesse realizar parte deste trabalho. É uma honra ter sido orientada por um grande profissional da Engenharia Geotécnica e uma felicidade enorme ouvir: “teus resultados estão fantásticos”!

À minha mãe, por sua ajuda no corte das fibras, por seu amor, por suas orações, pelo incentivo, apoio e dedicação.

Ao meu filho, Gustavo, por seu amor, carinho, compreensão, principalmente nos momentos de ausência, e por me dar tantas alegrias.

Ao Edmar Coelho, pela importante ajuda com os ensaios triaxiais realizados na UFOP.

Ao Lucas Festugato, pela paciência, disponibilidade e ajuda com os ensaios triaxiais realizados na UFRGS.

À professora Maria Célia Lanna e sua equipe, pela realização dos ensaios microbiológicos.

À Ana Maria, pela dedicação, atenção e competência, na secretaria da REDEMAT.

À coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT/UFOP pela acolhida e pelo apoio, principalmente nas participações em eventos.

À Solange, por cuidar bem da minha casa e do Gustavo, principalmente nos momentos em que precisei me ausentar.

À Ana Cristina Magalhães e Márcia Rujner, do NIT/IFMG, pela imprescindível ajuda com o pedido de patente, desde a redação até seu depósito.

Ao Instituto Federal de Minas Gerais – campus Ouro Preto (IFMG) pelo incentivo e apoio à minha capacitação docente.

À Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela acolhida e por ter possibilitado meus estudos.

À Pematec Triangel do Brasil Ltda pela doação das fibras de curauá.

A todos que, direta ou indiretamente contribuíram para realização desta pesquisa.



## SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	v
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	x
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS .....	xi
<b>RESUMO .....</b>	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO PROJETO .....	2
1.2 DEFINIÇÕES BÁSICAS .....	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE .....	4
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>6</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>8</b>
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	8
3.2 SOLOS REFORÇADOS .....	8
3.2.1 Reforço e Estabilização de Solos.....	8
3.2.2 Tipos de Fibras Utilizadas como Reforço.....	10
Fibras Naturais.....	13
▪ Fibra de Curauá ( <i>Ananas erectifolius</i> ).....	19
▪ Fibra de Sisal ( <i>Agave sisalana</i> ).....	20
3.3 POLIESTIRENO (PS).....	23
3.3.1 Poliestireno Expandido (EPS).....	25
3.4 MATERIAIS BETUMINOSOS.....	30
3.4.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) .....	33
3.5 INTERAÇÃO SOLO-FIBRA – ESTUDOS EXPERIMENTAIS .....	34
3.6 ALTERAÇÕES NA PROPRIEDADE DOS SOLOS PELA INCLUSÃO DE FIBRAS 51	
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>59</b>
4.1 VARIÁVEIS INVESTIGADAS .....	59
4.2 MATERIAIS .....	59
4.2.1 Areia.....	59
4.2.2 Fibras.....	61
4.2.3 Água.....	61
4.2.4 Impermeabilizantes.....	61
4.3 MÉTODOS .....	61

4.3.1	Caracterização Química das Fibras de Curauá e de Sisal ( <i>in natura</i> ) .....	61
4.3.2	Impermeabilização das Fibras .....	66
4.3.3	Caracterização das Fibras de Curauá e de Sisal antes e após Impermeabilização 68	
4.3.4	Análise Microbiológica das Fibras Naturais e Impermeabilizadas .....	69
4.3.5	Avaliação Mecânica dos Compósitos .....	73
4.3.6	Medida do Comprimento das Fibras.....	77
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>	<b>78</b>
5.1	Considerações Iniciais .....	78
5.2	Caracterização Química das Fibras .....	79
5.3	Caracterização Mecânica das Fibras .....	80
5.4	Caracterização das Fibras antes e após Impermeabilização .....	81
5.4.1	Microscopia Eletrônica de Varredura .....	81
5.4.2	Avaliação da Atividade Celulolítica Fúngica sobre as Fibras.....	84
5.4.3	Consumo de Solução de EPS e CAP .....	84
5.5	Comportamento Tensão-Deformação dos Compósitos Estudados .....	85
5.6	PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO.....	100
5.7	Análise da Influência dos Tratamentos das Fibras no Comportamento Tensão- Deformação dos Compósitos.....	102
5.8	ANÁLISE DA DEFORMABILIDADE .....	112
5.9	FIBRAS MEDIDAS .....	113
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>115</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>118</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>119</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 3.1:</b> Classificação das fibras.....	11
<b>Figura 3.2:</b> Artesanato para o uso comum de fibras naturais.....	14
<b>Figura 3.3:</b> Exemplos de aplicação das fibras naturais na indústria automotiva.....	15
<b>Figura 3.4:</b> Esquema da fibro-célula de uma fibra vegetal com dimensões aproximadas.....	17
<b>Figura 3.5:</b> Estrutura da Celulose.....	17
<b>Figura 3.6:</b> Plantação de Curauá.....	19
<b>Figura 3.7:</b> Fibras de Curauá.....	20
<b>Figura 3.8:</b> Plantação de sisal.....	21
<b>Figura 3.9:</b> Fibras de Sisal.....	22
<b>Figura 3.10:</b> Fórmula Estrutural de uma unidade repetitiva do Poliestireno (PS).....	23
<b>Figura 3.11:</b> Equação de Polimerização do Estireno.....	24
<b>Figura 3.12:</b> Representação Estrutural da Estereorregularidade do PS.....	24
<b>Figura 3.13:</b> Exemplo de aplicação de EPS na infra-estrutura de estradas (ABRAPEX).....	25
<b>Figura 3.14:</b> Partículas Esféricas de EPS (ACEPE, 2004).....	26
<b>Figura 3.15:</b> Descarte do EPS pós-consumo.....	30
<b>Figura 3.16:</b> Representação simplificada de cadeias poliméricas contidas no CAP.....	33
<b>Figura 3.17:</b> Comparação de estaca com elemento de reforço de solo (McGown <i>et al.</i> , 1978) .....	35
<b>Figura 3.18:</b> Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra (Gray & Ohashi, 1983).....	37
<b>Figura 4.1:</b> Curva granulométrica da areia de Osório (laser).....	60
<b>Figura 4.2:</b> Impermeabilização das fibras (a) Solução de EPS e..... (b) Solução de CAP.....	67
<b>Figura 4.3:</b> Equipamento de DMA da UFSCar – Sorocaba utilizado para as análises de comportamento mecânico das fibras.....	69
<b>Figura 4.4:</b> Cepa de referência <i>Trichoderma viride</i> QM 9414.....	70
<b>Figura 4.5:</b> Ensaio em Incubadora tipo shaker - Solab Scientifica.....	71
<b>Figura 4.6:</b> Equipamento utilizado nos ensaios de compressão triaxial.....	73
<b>Figura 4.7:</b> Sistema de compressão triaxial (Festugato, 2008).....	75
<b>Figura 4.8:</b> Sensores de efeito Hall em funcionamento aderidos à amostra (Festugato, 2008). .....	75
<b>Figura 5.1:</b> Micrografias obtidas por MEV das superfícies das fibras de curauá sem tratamento. Ampliações: 100x; 250x, 500x e 1000x.....	81
<b>Figura 5.2:</b> Micrografias obtidas por MEV das superfícies das fibras de sisal sem tratamento. Ampliações: 100x; 250x, 500x e 1000x.....	82
<b>Figura 5.3:</b> Micrografias obtidas por MEV das superfícies das fibras de curauá Impermeabilizadas com EPS. Ampliações: 250x e 500x.....	82
<b>Figura 5.4:</b> Micrografias obtidas por MEV das superfícies das fibras de curauá impermeabilizadas com CAP. Ampliações: 250x e 500x.....	83
<b>Figura 5.5:</b> Micrografias obtidas por MEV das superfícies das fibras de sisal impermeabilizadas com EPS. Ampliações: 250x e 500x.....	83
<b>Figura 5.6:</b> Micrografias obtidas por MEV das superfícies das fibras de sisal Impermeabilizadas com CAP. Ampliações: 250x e 500x.....	83

<b>Figura 5.7:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado ( $Dr=50\%$ )..	87
<b>Figura 5.8:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado e reforçado com fibras de sisal 24mm ( $Dr=50\%$ ).....	88
<b>Figura 5.9:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado e reforçado com fibras de sisal 36mm ( $Dr=50\%$ ).....	89
<b>Figura 5.10:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado e reforçado com fibras de curauá 24mm ( $Dr=50\%$ ).....	90
<b>Figura 5.11:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado e reforçado com fibras de curauá 36mm ( $Dr=50\%$ ).....	91
<b>Figura 5.12:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado ( $Dr=90\%$ )..	92
<b>Figura 5.13:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado e reforçado com fibras de sisal 24mm ( $Dr=90\%$ ).....	94
<b>Figura 5.14:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado e reforçado com fibras de sisal 36mm ( $Dr=90\%$ ).....	95
<b>Figura 5.15:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado e reforçado com fibras de curauá 24mm ( $Dr=90\%$ ).....	96
<b>Figura 5.16:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado e reforçado com fibras de curauá 36mm ( $Dr=90\%$ ).....	97
<b>Figura 5.17:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, na tensão confinante de 100kPa, do material reforçado com fibras de curauá de 24,36 e 50mm ( $Dr=50\%$ ).....	98
<b>Figura 5.18:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, na tensão confinante de 100kPa, do material reforçado com fibras de sisal de 24,36 e 50mm ( $Dr=50\%$ ).....	99
<b>Figura 5.19:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, do material reforçado com fibras de curauá 24mm naturais e impermeabilizadas com soluções de EPS e CAP( $Dr=50\%$ ).....	104
<b>Figura 5.20:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, do material reforçado com fibras de curauá 36mm naturais e impermeabilizadas com soluções de EPS e CAP( $Dr=50\%$ ).....	105
<b>Figura 5.21:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, do material reforçado com fibras de sisal 24mm naturais e impermeabilizadas com soluções de EPS e CAP( $Dr=50\%$ ).....	106
<b>Figura 5.22:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, do material reforçado com fibras de sisal 36mm naturais e impermeabilizadas com soluções de EPS e CAP( $Dr=50\%$ ).....	107
<b>Figura 5.23:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, do material reforçado com fibras de curauá 24mm naturais e impermeabilizadas com soluções de EPS e CAP ( $Dr=90\%$ ).....	108

<b>Figura 5.24:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, do material reforçado com fibras de curauá 36mm naturais e Impermeabilizadas com soluções de EPS e CAP (Dr=90%). .....	109
<b>Figura 5.25:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, do material reforçado com fibras de sisal 24mm naturais e Impermeabilizadas com soluções de EPS e CAP(Dr=90%). .....	110
<b>Figura 5.26:</b> Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial, do material reforçado com fibras de sisal 36mm naturais e Impermeabilizadas com soluções de EPS e CAP(Dr=90%). .....	111

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela III.1:</b> Composição química das fibras de curauá (Oliveira, 2010) .....	20
<b>Tabela III.2:</b> Composição química das fibras de sisal (Siqueira, 2006).....	22
<b>Tabela IV.1:</b> Índices físicos da areia de Osório. ....	60
<b>Tabela IV.2:</b> Sistemas para compor Controle Negativo, Positivo e os Testes Celulolíticos com as Fibras Naturais e Impermeabilizadas. ....	71
<b>Tabela IV.3:</b> Glicose Produzida. ....	72
<b>Tabela IV.4:</b> Programa de ensaios triaxiais. ....	76
<b>Tabela V.1:</b> Composição química das fibras estudadas.....	79
<b>Tabela V.2:</b> Propriedades mecânicas das fibras estudadas. ....	80
<b>Tabela V.3:</b> Valores de Densidade Ótica dos Testes Realizados. ....	84
<b>Tabela V.4:</b> Massa de EPS e CAP absorvida pelas fibras. ....	85
<b>Tabela V.5:</b> Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais estudados nesta pesquisa e dos materiais estudados por Casagrande (2005) e Festugato (2008), na Dr 50%. ....	101
<b>Tabela V.6:</b> Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais estudados na Dr50%. ....	112
<b>Tabela V.7:</b> Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais estudados na Dr90%. ....	113

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

$'$	Relativo a tensões efetivas
$\delta$	Relativo a incrementos
$\varepsilon_a$	Deformação axial
$\varepsilon_r$	Deformação radial
$\varepsilon_s$	Deformação distorcional
$\varepsilon_v$	Deformação volumétrica
$\phi'$	Ângulo de atrito interno efetivo
$\phi'_c$	Ângulo de atrito interno no estado crítico
$\gamma_s$	Peso específico real dos grãos
$v$	Volume específico
$\lambda$	Declividade da linha isotrópica de compressão no plano $v: \ln p'$
$\Gamma$	Volume específico ou intercepto da LEC para $p'=1\text{kPa}$ , no plano $v: \ln p'$
$\sigma_1, \sigma_3$	Tensões principais maior e menor
$\sigma_a, \sigma_r$	Tensões principais axial e radial
$\eta$	Inclinação da LIC no plano normalizado $q/p'_e: p'/p'_e$
$\psi$	Parâmetro de estado (BEEN & JEFFERIES, 1985)
$\kappa$	Declividade da linha de expansão no plano $v: \ln p'$
$\omega$	Teor de umidade
$\omega_{ótimo}$	Teor de umidade ótimo de compactação
$B$	Parâmetro de poro-pressão de Skempton
$c'$	Intercepto coesivo efetivo
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	California Bearing Ratio
CID	Ensaio triaxial consolidado isotropicamente drenado
CIU	Ensaio triaxial consolidado isotropicamente não-drenado
$C_c$	Coeficiente de curvatura

$C_u$	Coeficiente de uniformidade
$d$	Diâmetro da fibra
$D_{10}$	Diâmetro efetivo das partículas
$D_{50}$	Diâmetro médio das partículas
dtex	Unidade representativa da espessura dos filamentos (1dtex=1g/10000m)
$E$	Índice de vazios
$e_0$	Índice de vazios inicial
$e_{máx}$	Índice de vazios máximo
$e_{mín}$	Índice de vazios mínimo
EPS	Poliestireno Expandido
$F_a$	Resistência de atrito mobilizada ao longo da fibra
$F_t$	Resistência à tração da fibra
$G$	Módulo de cisalhamento
$G_0$	Módulo de cisalhamento inicial ou elástico
$K_0$	Coeficiente de empuxo sob condições de deformações radiais nulas
$l$	Comprimento da fibra
$l/d$	Índice aspecto ou fator de forma
LEC	Linha do Estado Crítico
LIC	Linha Isotrópica de Compressão
M	Inclinação da linha do estado crítico no plano $q:p'$
N	Volume específico ou intercepto da LIC para $p'=1\text{kPa}$ , no plano $v:\ln p'$
NBR	Norma Brasileira
$p'$	$(\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ ou $(\sigma_a + 2\sigma_r)/3$
$p'_e$	Pressão equivalente
PET	Polietileno tereftalato
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PS	Poliestireno
$Q$	Tensão desvio, $(\sigma_1 - \sigma_3)$ ou $(\sigma_a - \sigma_r)$
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto



## RESUMO

A crescente preocupação com o meio ambiente e o uso de produtos naturais tem contribuído fortemente para o uso de materiais derivados da biomassa, e em particular fibras vegetais. Algumas vantagens são atribuídas ao uso de fibras vegetais em muitas aplicações industriais quando comparado a fibras sintéticas. A fibra vegetal vem de fontes renováveis, é atóxica, de baixo custo e tem menor densidade. Outro aspecto importante a ser considerado no uso de fibras vegetais é a geração de empregos rurais e industriais. Assim, as implicações sociais e ambientais de seu uso também devem ser reconhecidas. No entanto, a rápida absorção e dessorção de água e a degradação de fibras vegetais podem representar características negativas. Assim, um estudo sobre o efeito do tratamento superficial das fibras vegetais, visando diminuir sua higroscopicidade e aumentar sua durabilidade é necessário para a que estas possam substituir com sucesso as fibras sintéticas.

Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi analisar o comportamento mecânico de um solo granular reforçado com a inclusão aleatória de fibras de curauá e sisal, naturais e superficialmente tratadas com soluções de EPS (poliestireno expandido) e CAP (cimento asfáltico de petróleo). Estas fibras foram misturadas ao solo granular para a avaliação da influência de tais materiais na melhoria das propriedades mecânicas da mistura. A fim de caracterizar o desempenho destas fibras foram realizadas caracterização química, microscopia eletrônica de varredura (SEM), análise dinâmico mecânica (DMA) e análises microbiológicas. Também uma série de ensaios geotécnicos foram realizados sobre as amostras com 0% e 0,50% de teor de fibra e 24, 36 e 50 mm de comprimento. A influência do teor e comprimento de fibras sobre as propriedades do solo arenoso reforçado foram estudadas através de ensaios triaxiais drenados. Os resultados indicaram que a inclusão de fibras vegetais melhora as propriedades geotécnicas das amostras. Observou-se que o reforço fibroso aumenta a resistência ao cisalhamento de pico e os parâmetros de resistência ao cisalhamento das amostras de solo em ensaios de compressão triaxial. Constatou-se que a adição de fibras vegetais naturais e tratadas confere melhoria significativa no comportamento mecânico deste solo, e o potencial das fibras de curauá e sisal como elemento de reforço. Os polímeros utilizados foram adequados à análise proposta, cobrindo a superfície das fibras vegetais e aumentando sua durabilidade.

## **ABSTRACT**

The increasing concern about the environment and the use of natural products has strongly contributed to the use of materials derived from biomass, and in particular vegetal fibers. Some advantages are attributed to the use of vegetal fibers in many industrial applications when compared to synthetic fibers. The vegetal fiber comes from renewable sources; it is nontoxic, shows low cost and have lower density. Another important aspect to be considered in the use of vegetal fibers is the generation of rural and industrial jobs. Thus, social and environmental implications of their use should also be recognized. However, the rapid absorption and desorption of water and degradation of vegetal fibers can represent negative characteristics. Thus, a study of the effect of vegetal fibers surface treatment in order to decrease its hygroscopicity and increase its durability is necessary for the successful replacement of synthetic fibers by these fibers.

In this context, the aim of this research was to analyze the mechanical behavior of a granular soil reinforced with random inclusion of curauá and sisal fibers, natural and superficially treated with solutions of EPS (expanded polystyrene) and CAP (asphalt). These fibers were mixed to the granular soil to evaluation the influence of such materials on the mechanical properties improvement of the mixture. In order to characterize the performance of these fibers, chemical characterization, scanning electron microscopy (SEM), dynamic mechanical analysis (DMA) and microbiological analysis were employed. Also a series of geotechnical laboratory tests were performed on the specimens with 0% and 0.50% fiber content and 24, 36 and 50 mm in length. The influence of fiber content and length of fiber on the reinforced sandy soil properties were studied by drained triaxial tests. The test results indicated that the inclusion of vegetal fibers increases the geotechnical properties of the specimens. It was observed that fiber reinforcement increases the peak shear strength and shear parameters of the soil samples in compression triaxial tests. Through the obtained results, it was observed that the addition of natural and treated vegetal fibers conferred significant improvement to the mechanical behavior of this soil, and it was shown the curauá and sisal fibers potential as soil reinforcement. The polymers used were suitable to the proposed analysis, covering the vegetal fibers surface and increasing their durability.

# 1 INTRODUÇÃO

Os elevados custos das obras de engenharia civil induzem a necessidade de se desenvolver estudos de processos de estabilização e reforço que possibilitem melhorar determinadas propriedades geotécnicas dos solos, de modo a enquadrá-los nas especificações construtivas vigentes.

Sendo o solo natural um material complexo e variável, é comum que este não preencha total ou parcialmente as exigências de projeto. Uma alternativa disponível ao engenheiro geotécnico para viabilizar técnica e economicamente a realização de obras de engenharia sobre solos pobres é remover o material existente no local e substituí-lo por outro com características adequadas ou modificar e melhorar as propriedades do solo existente, de modo a criar um novo material com características de resistência e deformabilidade adequadas para constituir o solo de fundação de obras de engenharia.

As propriedades de um solo podem ser alteradas através de diferentes processos, entre os quais podemos citar a compactação mecânica, a estabilização por processos físico-químicos e o reforço de solos com a inclusão de elementos resistentes, como geotêxteis, fibras, grelhas, tiras (Casagrande, 2005).

A técnica de reforço através da inclusão de fibras tem sido desenvolvida para melhorar o desempenho de materiais suscetíveis a problemas causados pelo surgimento de fissuras, como, por exemplo, a perda da capacidade de suporte do solo, não somente na área geotécnica como em outras áreas da engenharia. Esta técnica tem sido estudada por vários pesquisadores (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986; Maher & Gray, 1990; Maher & Ho, 1993; Silva, 1995; Consoli et al., 1997, 1998, 1999, 2002, 2003-a e 2003-b, 2005; Feuerharmel, 2000; 2002, Specht et al., 2002; Vendruscolo, 2003; Donato, 2004, Heineck et al., 2005; Casagrande, 2005; Donato, 2007; Festugato, 2008; Girardello, 2010; Tang et al., 2010; Methacanon et al., 2010; Galán-Marín et al., 2010; Rudnik et al., 2011; Ashour et al., 2011) e tem se mostrado eficiente, melhorando várias propriedades de engenharia do solo, gerando um compósito bastante atraente para uso em obras geotécnicas.

Para que sejam concebidos novos materiais é importante que se conheça, as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais constituintes, bem como suas possíveis combinações. O conhecimento do mecanismo de interação matriz-reforço é de grande

importância no entendimento da resposta da mistura no que tange ao seu comportamento mecânico. Este mecanismo depende de vários fatores relacionados com a matriz (concretos, solo-cimento ou solo), como granulometria, índices de vazios e grau de cimentação, e com as fibras, como comprimento, espessura, rugosidade, capacidade de alongamento, módulo de elasticidade, entre outros fatores. (Donato, 2007).

O paradigma de se preservar o meio ambiente e de se utilizar produtos naturais vem contribuindo para um maior interesse na utilização de materiais derivados da biomassa. Neste sentido, os materiais compósitos com fibras vegetais surgem como uma boa alternativa no campo dos materiais para aplicações de engenharia.

A rápida absorção e desorção de água e a biodegradabilidade da fibra vegetal podem representar características negativas na composição de compósitos. Assim, um estudo do efeito do tratamento superficial nas fibras com solução de EPS (poliestireno expandido) reciclado e solução de CAP (cimento asfáltico de petróleo) visando diminuir sua higroscopicidade e aumentar sua durabilidade, torna-se necessário para que estas possam substituir com sucesso as fibras sintéticas.

Materiais poliméricos como EPS são utilizados em larga escala e após seu uso geralmente são dispostos em aterros sanitários ou mesmo em lixões urbanos, comprometendo dessa forma, o meio ambiente, pois demandam uma grande área para sua deposição final, além de prejudicar a degradação dos materiais orgânicos presentes. A prática de reciclagem destes materiais resulta em crescimento econômico, geração de emprego e renda àqueles que sobrevivem da captação dos resíduos sólidos recicláveis, além de contribuir para a preservação do meio ambiente.

## **1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO PROJETO**

Esta pesquisa propõe-se a contribuir com o desenvolvimento de novos compósitos que possibilitem melhorar propriedades geotécnicas de um solo através da inclusão de fibras vegetais impermeabilizadas como elemento de reforço, visando diminuição dos custos das obras de engenharia civil. Foi dado um enfoque à durabilidade, uma vez que as fibras foram impermeabilizadas e submetidas a ensaios microbiológicos.

Buscou-se também contribuir para a preservação ambiental através da prática de reciclagem de materiais poliméricos, e incentivo ao uso de materiais derivados da biomassa, o que resulta em crescimento econômico, geração de emprego e renda àqueles que sobrevivem da captação dos resíduos sólidos recicláveis e dos que sobrevivem das culturas de sisal e de curauá.

Dentre os vários estudos realizados, onde se confirmam algumas hipóteses e outras não, este trabalho contribui ao estado da arte no conhecimento atual de solos reforçados, com estudos originais nos seguintes tópicos:

- Obtenção de impermeabilizantes, impermeabilização de fibras vegetais e análise da eficiência da impermeabilização através de ensaios microbiológicos. Trabalhos em diversas áreas vêm sendo realizados, por diversos autores, com fibras vegetais naturais;
- Uso de fibras vegetais impermeabilizadas como elemento de reforço de solo. Os trabalhos já realizados apresentam apenas estudo de utilização de fibras sintéticas e fibras vegetais naturais como reforço de solo.

Devido à originalidade do trabalho desenvolvido nesta pesquisa, foi feito o depósito de pedido de patente (Nº 221108391901) junto ao INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial), visando resguardar o interesse de proteção do invento.

## **1.2 DEFINIÇÕES BÁSICAS**

Para melhor compreensão do trabalho, alguns conceitos são apresentados:

- *Material compósito* é aquele originado da combinação de dois ou mais materiais que apresentam propriedades que não são encontradas nos materiais que lhe deram origem;
- *Material compósito fibroso* é aquele compósito em que um dos materiais constituintes tem a forma de fibra (filamentos em que uma das dimensões é muito superior às outras duas);

- *Compósito solo-fibra*: Os termos solo e fibras são referidos de forma genérica pelos termos matriz e reforço, respectivamente, nomenclatura usual na ciência dos materiais. A matriz ocupa a maior parte do volume total do compósito.

Uma breve revisão da terminologia descrita por Been et al. (1991) para solos arenosos, utilizada no trabalho, é apresentada:

- *Estado*: o estado de um solo é a descrição das condições físicas sob as quais ele existe. Índice de vazios e tensões são as variáveis primárias de estado para solos. Estrutura é uma variável de estado importante, enquanto temperatura, por exemplo, é de menor importância;
- *Propriedades intrínsecas do material*: podem ser definidas unicamente e são independentes do estado do solo. A granulometria, a mineralogia, a forma do grão, o ângulo de atrito mineral/mineral e o peso específico real dos grãos são exemplos;
- *Propriedades comportamentais*: são medidas em ensaios específicos e dependem do tipo de ensaio, do estado inicial e das propriedades intrínsecas do solo. Incluem ângulo de atrito de pico, dilatância, etc.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE**

O trabalho está dividido em cinco capítulos, de acordo com as etapas de pesquisa realizadas. É iniciado com este capítulo introdutório, Capítulo 1, seguido do Capítulo 2, onde são apresentados os objetivos gerais e específicos, no Capítulo 3 é apresentada uma revisão da literatura existente, compreendida por tópicos referentes aos principais assuntos abordados nesta pesquisa. No Capítulo 4, o programa experimental é exposto e a descrição dos materiais utilizados, dos equipamentos e dos métodos de ensaios, é apresentada. O Capítulo 5 consiste na apresentação e na análise dos resultados dos ensaios triaxiais, considerando aspectos referentes à deformabilidade e à resistência ao cisalhamento dos materiais estudados, executados conforme o planejamento experimental. Será apresentada também a análise dos resultados de caracterização das fibras, bem como análise dos ensaios microbiológicos das fibras naturais e impermeabilizadas. As principais conclusões, que representam a síntese do conhecimento adquirido durante a realização deste trabalho, serão apresentadas no Capítulo 6,

com as sugestões para futuros trabalhos. São apresentadas, por fim, as referências bibliográficas.

## 2 OBJETIVOS

Nesse contexto, objetiva-se analisar a influência da inclusão aleatória de fibras de curauá e sisal, naturais e impermeabilizadas e de diferentes comprimentos, no comportamento mecânico de um solo granular fino, incluindo análise da durabilidade das fibras em laboratório, com vistas a aplicações em obras de engenharia civil.

Dentro dos objetivos gerais, encontram-se os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar as fibras naturais e tratadas através das análises: Química, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e dos ensaios Mecânico Dinâmico (DMA).
- Estudar o comportamento tensão-deformação de um solo arenoso não-reforçado e reforçado por diferentes tipos de fibras, através de ensaios triaxiais drenados, com carregamento axial a taxa de deformação constante, sob trajetórias de tensões convencionais;
- Avaliar a influência da inclusão das fibras e de seus índices de aspecto no ganho de resistência do material reforçado em relação ao material sem reforço;
- Através do estudo das curvas tensão-deformação, investigar a existência de um comportamento de enrijecimento no material reforçado.
- Analisar, a partir das envoltórias de ruptura, a mudança dos parâmetros de resistência dos materiais em função da adição de diferentes tipos de fibras;
- Identificar a influência da inclusão das fibras na deformabilidade dos compósitos;
- Analisar as características de alongamento e ruptura, ou não, das fibras após serem solicitadas e submetidas à compressão triaxial para melhor compreender o comportamento solo-fibra e a real atuação e mobilização dos reforços no interior da massa de solo;
- Comparar o desempenho dos compósitos produzidos com fibras de sisal e de curauá naturais e tratadas com os de fibras de polipropileno, inseridas no mesmo solo arenoso, estudados por Casagrande (2005) e Festugato (2008).



- Analisar a eficiência da impermeabilização das fibras de curauá e de sisal, por meio de ensaios microbiológicos pela avaliação da atividade celulolítica da espécie fúngica *Trichoderma viride* QM 9414.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Neste Capítulo é apresentada uma revisão da literatura sobre as definições e propriedades gerais relacionadas à melhoria e o reforço de solos com fibras. É feita uma breve descrição sobre as fibras vegetais, particularmente fibras de curauá e sisal, sobre o poliestireno expandido (EPS) e cimento asfáltico de petróleo (CAP), por fazerem parte do escopo deste trabalho. Aspectos técnicos sobre os mecanismos de interação entre solo e reforço e as alterações do comportamento dos solos causadas pela adição de fibras também são abordados.

### **3.2 SOLOS REFORÇADOS**

#### **3.2.1 Reforço e Estabilização de Solos**

Entende-se por melhoria ou reforço de solos a utilização de processos físicos e/ou químicos que busquem o melhoramento das propriedades mecânicas dos solos. Procura-se, usualmente, o aumento da resistência mecânica do solo tratado e a diminuição de sua compressibilidade e de sua permeabilidade. (Casagrande, 2005).

Numerosas técnicas de melhoramento das características do solo e de seu comportamento já são conhecidas e utilizadas pelo homem. De acordo com Van Impe (1989), o melhoramento do solo é provavelmente a mais antiga, porém, do ponto de vista técnico, ainda o mais intrigante de todos os métodos executivos comuns em engenharia civil.

O reforço de solos com fibras é utilizado pelo homem desde a Antigüidade, a pirâmide de Ziggurat e a torre de Agar Quf, na Mesopotâmia (1400 A.C.), foram construídas empregando-se camadas intercaladas de solo e mantas de raízes. Indícios do emprego dessa técnica também são encontrados em partes da Grande Muralha da China e em estradas construídas pelos Incas, no Peru, através do emprego de lã de lhama como reforço, as quais existem até os dias atuais. Há vestígios da utilização de palha em tijolos de argila, citados no Êxodo. São também conhecidas aplicações de mantas de folhas e galhos sobre camadas de solos moles antes da construção de aterros no interior do Brasil e em outros países.

A utilização de mantas de algodão pelo Departamento de Estradas da Carolina do Sul – EUA, em 1926, foi uma das aplicações que mais se aproxima de um geossintético atual. Vidal (1969) patenteou a técnica denominada “Terra Armada”, quando solos reforçados começaram a ser empregados, onde o reforço de solo consistia na introdução de tiras metálicas conectadas a painéis de concreto que compunham a face do maciço de solo.

Porém, o reforço de solos com fibras, nos moldes atuais, passou a ser investigado há pouco mais de três décadas. A técnica inicialmente desenvolvida enfocava o reforço de solos através de inclusões aleatoriamente distribuídas dentro de uma massa de solo, onde se procurava avaliar o efeito de raízes de plantas na resistência ao cisalhamento dos solos e na estabilidade de taludes (Gray & Ohashi, 1983).

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

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

A utilização de geossintéticos no Brasil data do final dos anos 70 e início dos anos 80, com obras envolvendo aplicações em drenagem e filtração e também reforço de solos. Apesar do substancial crescimento do interesse em geossintéticos no país nos últimos anos, este ainda pode ser considerado tímido. Para Palmeira (1995) o desenvolvimento da pesquisa sobre geossintéticos tem contribuído para a utilização destes materiais na geotecnia. Este autor aborda os tipos de geossintéticos disponíveis, sendo estes classificados em geotêxteis, geogrelhas, geomalhas, geomembranas, tiras, fibras, e geocompostos. Os geotêxteis são os

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

O fibrossolo consiste na mistura de solo e fibras para utilização em pavimentos, aterros sobre solos moles, estabilidade de taludes e em fundações superficiais (Casagrande, 2005).

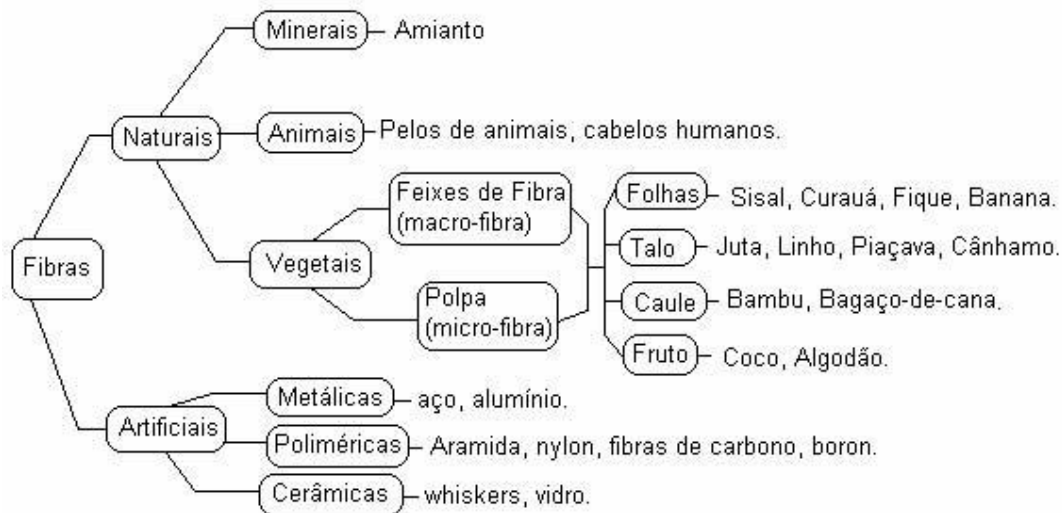
### **3.2.2 Tipos de Fibras Utilizadas como Reforço**

Numerosos tipos de fibras são utilizados no reforço de solos. As características de comportamento de cada uma delas, as propriedades físicas, químicas e mecânicas, que por sua vez afetam o comportamento do material compósito, estão intimamente relacionadas ao material do qual são compostas e ao seu processo de fabricação (Feurharmel, 2000).

Assim, a compreensão do mecanismo de interação matriz-reforço e da parcela de contribuição de cada uma das fases no comportamento do material compósito como um todo é fundamental para a definição do tipo de fibra a ser empregado. Essa definição dependerá fundamentalmente das características da matriz a ser reforçada e das características desejadas do material compósito resultante (Casagrande, 2005).

Várias pesquisas têm demonstrado que o uso de materiais de reforço com maior capacidade de alongação tem conduzido à melhores resultados do que quando se utilizam fibras com módulo muito elevado, como fibras de aço (Taylor, 1994). Algumas características relevantes devem ser consideradas na escolha da fibra para reforço de materiais: a fibra deve ser quimicamente neutra e não deteriorável, não sofrer ataque de fungos, bactérias ou álcalis e não ser prejudicial à saúde humana, além de apresentar características físicas e mecânicas adequadas.

As fibras podem ser classificadas em dois grandes grupos: naturais e artificiais. A Figura 3.1 mostra, esquematicamente, as principais fibras de cada classe.



**Figura 3.1:** Classificação das fibras.

### Fibras Poliméricas

Os polímeros, de acordo com sua estrutura química, apresentam diferentes denominações e comportamentos, dando origem a diferentes tipos de fibras. Atualmente vários formatos de fibras poliméricas têm sido empregados como reforço de solos. Há as chamadas fibriladas, que são as fibras que apresentam um formato trançado quando esticadas transversalmente, projetadas para que se “abram” durante o processo de mistura com o solo.

As fibras poliméricas são subdivididas em fibras de polipropileno, de polietileno, de poliéster e fibras de poliamida, descritas a seguir:

- *Fibras de Polipropileno:* as fibras de polipropileno são constituídas de um tipo de material que adquire uma consistência plástica com o aumento da temperatura, denominado termoplástico. Os polímeros termoplásticos são constituídos por séries de longas cadeias de moléculas polimerizadas, separadas entre si de forma a que possam deslizar umas sobre as outras (Hollaway, 1994). Essas fibras possuem uma grande flexibilidade e tenacidade em função de sua constituição; seu módulo de elasticidade é de aproximadamente 8GPa (menor que qualquer outra fibra) e sua resistência à tração é de aproximadamente 400MPa. Além disso, possuem elevada resistência ao ataque de várias substâncias químicas e aos álcalis (Taylor, 1994). Tais características conferem aos materiais a que estas fibras são incorporadas uma substancial resistência ao impacto;

- *Fibras de Polietileno*: as fibras de polietileno têm um módulo de elasticidade baixo, são fracamente aderidas à matriz cimentada e altamente resistentes aos álcalis. Sua durabilidade é alta, mas apresentam maiores deformações de fluência, o que significa que, se elas forem utilizadas para suportar tensões altas permanentemente em um compósito fissurado, consideráveis elongações e deflexões podem ocorrer ao longo do tempo (Hannant, 1994). Procurando minimizar o problema da baixa aderência e módulo de elasticidade, tem sido desenvolvido o polietileno de alta densidade;
- *Fibras de Poliéster*: o poliéster apresenta alta densidade, rigidez e resistência, conferindo tais características às fibras feitas deste material. Essas fibras possuem um aspecto bastante similar às de polipropileno e podem ser utilizadas para as mesmas aplicações (Taylor, 1994). O poliéster atualmente mais conhecido é o polietileno tereftalato, cuja sigla é PET. É o material constituinte das garrafas plásticas de refrigerantes, águas minerais e óleos de cozinha, entre outros.
- *Fibras de Poliamida (Kevlar)*: polímeros contendo longas cadeias de moléculas geralmente possuem baixa resistência e rigidez, uma vez que suas moléculas são espiraladas e dobradas. Entretanto, se estas moléculas forem esticadas e reforçadas durante o processo de manufatura, altas resistências e módulos de elasticidade podem ser alcançados, como é o caso do Kevlar (Taylor, 1994). A fibra de poliamida aromática, comercialmente conhecida por Kevlar, é a fibra orgânica de maior sucesso. Existem dois tipos, o Kevlar 29, cuja resistência mecânica é da ordem de 3GPa e o módulo de elasticidade médio é de aproximadamente 64GPa, e o Kevlar 49, cuja resistência mecânica é a mesma do anterior, mas seu módulo de elasticidade é de 300GPa (Hollaway, 1994).

### **Fibras Minerais**

Dentre as fibras minerais, são citadas as de carbono, de vidro e de amianto, apresentadas a seguir:

- *Fibras de Carbono*: baseada na resistência das ligações entre os átomos de carbono e na baixa densidade, as fibras de carbono apresentam alta resistência à tração e módulo de elasticidade em torno de 420GPa. Características que tornam imprescindível uma grande aderência entre a matriz e as fibras (Taylor, 1994).

- *Fibras de Vidro*: as fibras de vidro são geralmente manufaturadas na forma de fios compostos de centenas de filamentos individuais justapostos. O diâmetro dos filamentos individuais é geralmente da ordem de 10 $\mu$ m (Taylor, 1994). Cerca de 99% das fibras de vidro são produzidas a partir do vidro tipo E, que é susceptível ao ataque dos álcalis.
- *Fibras de Amianto*: as fibras de amianto apresentam resistência à tração em torno de 1GPa e módulo de elasticidade em torno de 160GPa, e apresentam uma ótima aderência com uma matriz composta por cimento. Seu diâmetro é muito pequeno, da ordem de 1 $\mu$ m (Taylor, 1994). Essa fibra, quando cortada, libera partículas muito pequenas, em função do seu reduzido diâmetro, que danificam os alvéolos pulmonares se aspiradas pelo homem. Assim, sua utilização na construção civil é proibida em muitos países.

### **Fibras Metálicas**

As fibras de aço conduziram a um número considerável de pesquisas como método de melhoria das propriedades mecânicas de materiais de construção. As fibras de aço utilizadas na construção civil apresentam índice de aspecto na faixa de 30 a 50, comprimento variando de 10,0 a 76,2mm e diâmetro entre 0,13 e 0,90mm. A ruptura do compósito é normalmente associada ao arrancamento da fibra e não a sua ruptura. A resistência à tração da fibra é da ordem de 1,1GPa e o módulo de elasticidade é de 200GPa. Este tipo de fibra tem uma grande variedade de formatos para aumentar a resistência ao arrancamento. Dependendo do meio a que estão inseridas, podem apresentar problemas de corrosão. Uma técnica utilizada para minimizar tal problema é o banho de níquel (Taylor, 1994). Seu formato pode ser bastante variável, de forma a aumentar sua aderência com a matriz (Hannant, 1994).

### **Fibras Naturais**

A aplicação de fibras naturais na construção data dos primórdios de nossa civilização. Milhares de anos atrás, os Persas já usavam as fibras associadas ao solo para construções de habitações, resultando em paredes com bom isolamento térmico e boa aparência estética (Ghavami e Tolêdo Filho 1991).

De acordo com a Sindifibras – Sindicato das Indústrias de Fibras Naturais da Bahia, a maior parte de toda a produção brasileira de fibras vegetais é direcionada para a exportação

para os Estados Unidos, Japão e toda a Europa, e grande parte do uso destas fibras vegetais ainda é em aplicações convencionais como, por exemplo, na produção de fios para cordoalhas, sacarias, artesanatos e tecidos. A Figura 3.2 apresenta a utilização de fibras naturais para a confecção de artesanatos.



**Figura 3.2:** Artesanato para o uso comum de fibras naturais.

A partir da década de 90 a indústria automotiva, impulsionada pelo aumento da consciência ambiental, fez avanços significativos no desenvolvimento de compósitos de fibras naturais para serem utilizados em peças para automóveis. Vários modelos de veículos, inicialmente na Europa e, depois, na América do Norte, utilizam estes compósitos de fibras naturais no revestimento interno de veículos, em painéis de portas, porta-objetos, tetos, caixa de rodas, consoles, protetor de cárter, etc. Promovidos como sendo materiais alternativos de baixo custo e de baixo peso comparados à fibra de vidro, estes produtos agrícolas, incluindo linho, juta, sisal, cânhamo, entre outros, sinalizaram o início de uma era "verde" da indústria com enorme potencial. Um estudo de mercado realizado em 2005 projeta taxas de crescimento superiores a 50 por cento por ano até 2010. A Figura 3.3 exhibe exemplos de aplicação de alguns tipos de fibras naturais em pesquisas da indústria automotiva.





**Figura 3.3:** Exemplos de aplicação das fibras naturais na indústria automotiva.

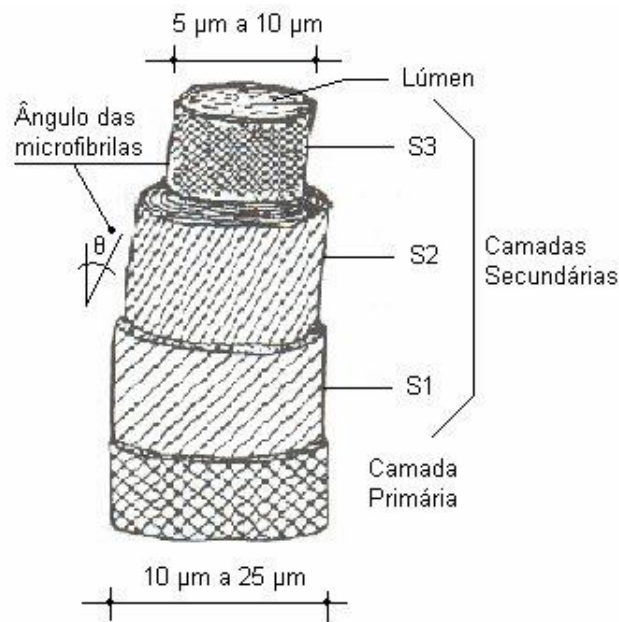
Com base em sua morfologia, as fibras vegetais podem ser classificadas em quatro classes (Cook 1980 apud Tolêdo Filho 1997).

- Fibras das folhas: Tendo sua origem nas plantas monocotiledôneas, as fibras das folhas ocorrem em feixes com extremidades sobrepostas de tal forma que produzem filamentos contínuos através do comprimento da folha (Tolêdo Filho 1997), conferindo-lhe resistência mecânica e dando suporte aos vasos de condução de água do vegetal.
- Fibras de talo ou tronco: Tendo origem em plantas dicotiledôneas, essas fibras ocorrem no floema, que fica na entrecasca do talo. Os feixes de fibra são unidos entre si e mantidos no lugar pelo tecido celular do floema e pelas substâncias gomosas e graxas. As fibras podem ser obtidas colocando-se os talos em tanques de água quente ou deixando-os espalhados no chão para permitir que a ação das bactérias dissolva o material que envolve as fibras. O processo é seguido por secagem das fibras.
- Fibras do Caule (madeira): são fibras curtas, grossas e rígidas. Pedacos de madeira são processados em várias soluções e sujeitos a tratamentos mecânicos para extrair fibras de celulose (wood fibres) de boa qualidade na forma de polpa. Como exemplo, temos fibras de bambu e de cana-de-açúcar (Tolêdo Filho 1997).

- Fibras do Fruto: Essas fibras formam uma camada protetora de caules, folhas, frutos e sementes das plantas. As fibras de coco e algodão são incluídas neste grupo (Tolêdo Filho 1997).

As fibras oriundas das folhas são as de maior interesse para serem utilizadas como reforço, embora fibras de talo, do caule e do fruto também possam ser usadas. De uma maneira geral, as fibras das folhas são mais grossas que as fibras dos talos e são referenciadas como fibras “duras” enquanto as fibras do talo são chamadas de fibras “macias” e, portanto, mais próprias para fins têxteis. Nesse trabalho foram utilizados, dois tipos de fibras vegetais, fibras das folhas de curauá e sisal.

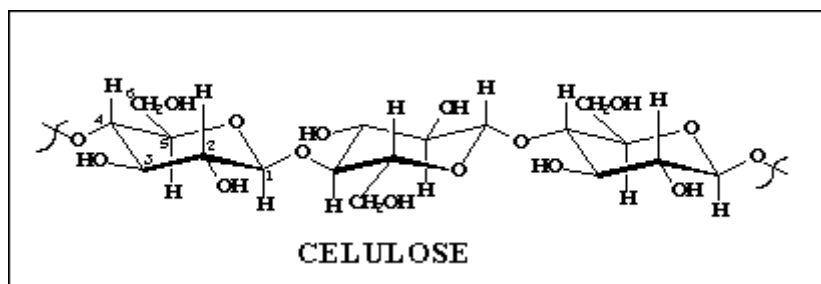
As fibras vegetais são constituídas por células individuais (microfibras) unidas umas às outras por meio da lamela intermediária, que é constituída de hemicelulose e lignina. Cada microfibrilha é formada por um número de camadas, contendo fibrilas que são compostas por cadeias moleculares de celulose. Essas fibrilas se apresentam, em cada camada sob a forma de espiral com ângulos de inclinação variáveis, que têm influência sobre o desempenho mecânico da fibra. A Figura 3.4 apresenta um esquema de uma microfibrilha, onde podem ser vistas as camadas primária e secundária (Gram 1983). A camada secundária é dividida em três subcamadas (S1, S2 e S3). A região central da fibra apresenta uma cavidade denominada lúmen, que é grande responsável pela elevada absorção de água e baixa massa específica aparente, características comuns às fibras vegetais. Além disso, substâncias agressivas costumam penetrar no lúmen, a exemplo dos compostos hidratados do cimento, em compósitos com matriz cimentícia causando reações degradantes dos componentes da fibra.



**Figura 3.4:** Esquema da fibra-célula de uma fibra vegetal com dimensões aproximadas.

Para uma melhor compreensão das propriedades mecânicas e durabilidade das fibras, seus principais componentes estruturais (celulose, hemicelulose e lignina) são comentados.

A celulose é o componente principal de todas as fibras vegetais, sendo principal responsável pela sua resistência mecânica. É constituída de unidades de anidro-D-glicose ( $C_6H_{10}O_5$ ), que unidas formam uma cadeia molecular. Sua estrutura é mostrada na Figura 3.5. A celulose pode ser descrita como um polímero linear com uma estrutura de cadeia uniforme (Fengel et al., 1989). Cada unidade de anidro-D-glicose contém três grupos hidroxila ( $-OH$ ). Estas hidroxilas formam ligações de hidrogênio dentro da molécula (intramolecular) e entre moléculas de celulose (intermolecular). A cristalinidade da celulose deve-se principalmente às ligações de hidrogênio intermoleculares. Devido às ligações de hidrogênio, as fibras vegetais são de natureza hidrófila.



**Figura 3.5:** Estrutura da Celulose

As hemiceluloses são constituídas por diferentes unidades de açúcares sendo solúveis em álcalis. Os principais açúcares são as pentoses, hexoses, 6-desoxi-hexoses e os ácidos urônicos. O seu grau de polimerização é de 10 a 100 vezes menor que o da celulose e as cadeias possuem um considerável grau de ramificação em relação à celulose (Fengel et al., 1989).

A lignina possui uma estrutura complexa com constituintes alifáticos e aromáticos. É um material amorfo encontrado nas paredes celulares das plantas, cuja função é conferir rigidez à parede celular.

Comparativamente às fibras sintéticas, as fibras vegetais oferecem as seguintes vantagens: fonte abundante e de rápida renovação, baixo custo, baixa densidade, altas propriedades específicas, são menos abrasivas se comparadas às fibras de vidro, não-tóxicas e biodegradáveis (Oliveira, 2010). Em média, o processo de produção de fibras naturais economiza 60% da energia normalmente utilizada na produção de fibra de vidro, reduzindo também significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> na fase de fabricação da matéria-prima. Além disso, o desperdício de material que surge como subproduto da produção da fibra pode ser utilizado como fertilizante orgânico.

Como desvantagens pode-se citar a baixa temperatura de processamento, limitada a aproximadamente 200° C. Outras desvantagens são a falta de uniformidade de propriedades, que dependem da origem das fibras, da região do plantio e da habilidade manual durante a colheita e a alta absorção de umidade, que pode causar o inchaço das fibras. A absorção de umidade pode ser drasticamente reduzida pela modificação química das fibras e pela boa adesão na interface fibra/matriz. A avaliação da durabilidade dos compostos formados com fibras vegetais é o principal problema a ser investigado, pois podem ser degradadas pela ação de microorganismos.

O uso de matérias-primas de fontes renováveis vem sendo objeto de muitos estudos e pesquisas recentes, devido ao seu potencial na substituição de derivados petroquímicos. Por serem materiais considerados “ecologicamente corretos” compósitos com fibras vegetais tem-se mostrado uma alternativa viável na substituição das fibras sintéticas e de vidro em muitas aplicações. Neste contexto, os materiais compósitos com fibras vegetais tem se mostrado como uma boa alternativa no campo dos materiais para aplicações de engenharia.

- **Fibra de Curauá (*Ananas erectifolius*)**

Espécie típica da Amazônia, o curauá (Figura 3.6) é famoso por suas folhas, que chegam a 1,5m de comprimento e 4,0 cm de largura, são duras, eretas e planas e fornecem fibras resistentes, leves, flexíveis e biodegradáveis.



**Figura 3.6:** Plantação de Curauá

O curauá só se desenvolve em clima quente e úmido. Suas folhas longas são da família botânica do abacaxi e produzem uma fibra têxtil de natureza lignocelulósica. Além disso, o cultivo da planta não provoca a degradação da mata nativa, contribui com a revitalização de terras desmatadas, não é exigente a fertilizantes químicos e pode ser consorciada com culturas alimentares, o que representa uma fonte alternativa de renda e garante também a segurança alimentar ao pequeno agricultor da região amazônica. O curauá não necessita de solos muito ricos, podendo ser plantado em solos de textura arenosa. Cada planta produz cerca de 24 folhas e o rendimento de fibra seca é de aproximadamente 6%. Um hectare produz 3.600 quilos de fibra seca (Figura 3.7) ao ano, embora esses valores variem bastante (Oliveira, 2010).



**Figura 3.7:** Fibras de Curauá

O curauá está entre as fibras mais competitivas, figurando entre as mais economicamente viáveis (Santos, 2009). Devido as suas características, a fibra de curauá também vem despertando o interesse da indústria automobilística sendo usada como agente de reforço em painéis dianteiros, porta-pacotes, laterais de portas e porta-malas de veículos que integram o portfólio de gigantes do setor, como Volkswagen, Honda e General Motors. A Tabela III.1 apresenta uma composição química para a fibra de curauá.

**Tabela III.1:** Composição química das fibras de curauá (Oliveira, 2010)

<b>Componentes</b>	<b>Fibras de sisal (%)</b>
Umidade	7,8
Cinzas	0,91
Celulose	61,9
Hemicelulose	3,4
Lignina	6,5

▪ **Fibra de Sisal (*Agave sisalana*)**

As primeiras plantações de sisal, Figura 3.8, classificado como *Agave Sisalana* Perrine, foram desenvolvidas pelos Maias, no México, antes da chegada dos europeus. Atualmente são conhecidas 57 espécies. A cultura sisaleira começou a ser difundida no Brasil a partir de 1920, no estado da Paraíba. A cultura do sisal, uma das fibras mais utilizadas mundialmente, é de extrema importância socioeconômica para o Brasil, por ser a única economicamente viável

na região semi-árida do Nordeste, com cerca de 1 milhão de pessoas que dela dependem para sua subsistência (Mattoso et al., 1997).



**Figura 3.8:** Plantação de sisal

O crescimento da planta depende, entre outros fatores, da disponibilidade de água durante um determinado período do ano; a planta estoca água na estação chuvosa e consome na estação seca. O trabalho no campo se concentra basicamente no corte das folhas, desfibramento, lavagem/secagem e batimento das fibras. A produção destina-se, em geral, à exportação como matéria prima.

As fibras de sisal classificam-se no grupo de fibras chamadas “estruturais”, cuja função é dar sustentação e rigidez às folhas. São extraídas das folhas por um processo que utiliza uma desfibradeira. Cada folha de sisal contém em média 4% em peso de fibras. Dos 96% restantes, 81% é líquido (suco) e 15% são os resíduos de desfibragem e podem ser classificados como adubo orgânico e ração animal (Mattoso et al., 1997).

Cada fibra de sisal é constituída por uma centena de fibras elementares ligadas entre si. Estas fibras possuem um alto teor de celulose, excelentes propriedades de resistência à ruptura e alongamento e boa resistência à ação da água salgada.

A planta de sisal produz aproximadamente 200 a 250 folhas antes de florescer e cada folha contém entre 700 e 1400 fibras. As fibras de sisal dispõem-se longitudinalmente ao longo do comprimento da folha e de forma praticamente regular, com comprimentos que variam de 45 a 120cm. Compreendem três tipos: fibras mecânicas, fibras de fita e fibras de



xilemas. As fibras mecânicas estão presentes em maior número e dificilmente se dividem durante os processos de manufatura, o que lhes confere maior importância comercial.

A fibra de sisal (Figura 3.9) é leve, atóxica, que apresenta alto módulo de elasticidade e resistência à tração e custa aproximadamente dez vezes menos que a fibra de vidro. Entre outras vantagens da fibra de sisal podemos apontar a facilidade de modificação superficial, característica das fibras vegetais, sua abundância no Brasil e facilidade de cultivo. A microestrutura helicoidal oca do sisal é responsável por um mecanismo de falha diferenciado de outras fibras vegetais, sendo que os compósitos reforçados por sisal apresentam trabalho de fratura similar ao de compósitos de polietileno de altíssimo peso molecular reforçado por fibras de vidro.



**Figura 3.9:** Fibras de Sisal

A composição química das fibras de sisal varia muito e depende da idade da planta, parte da planta, método de extração, fontes, métodos de medida, etc. A Tabela III.2 apresenta uma composição química típica de fibras de sisal sem nenhum tipo de tratamento.

**Tabela III.2:** Composição química das fibras de sisal (Siqueira, 2006)

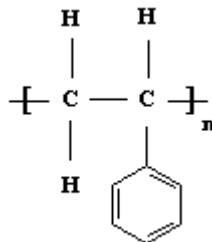
<b>Componentes</b>	<b>Fibras de sisal</b>
Umidade	9,7
Cinzas	1,1%
Extrativos Solúveis em H <sub>2</sub> O a 70°C	1,7%
Extrativos Solúveis em etanol/ciclohexano	1,8%
Lignina Klason solúvel	0,8%
Lignina Klason insolúvel	8,6%
Lignina Klason total	9,4%



### 3.3 POLIESTIRENO (PS)

Conhecidas desde 1845, as resinas de poliestireno tiveram grande importância industrial no início da segunda guerra mundial (1939), graças aos estudos realizados por Ostro Mislensky e Staudinger, na Alemanha. Nos anos 90 foi um dos termoplásticos mais consumidos, devido ao baixo custo, menor peso e boas propriedades elétricas (como baixa condutibilidade elétrica), transparência, alto brilho e boa resistência a alguns ácidos fortes.

O PS é um polímero vinílico, sendo, portanto, uma cadeia hidrocarbônica com um grupo fenila unido a um dos carbonos do grupo vinila, produzido a partir do monômero estireno através da polimerização via radicais livres e sua fórmula estrutural está representada na figura 3.10.



**Figura 3.10:** Fórmula Estrutural de uma unidade repetitiva do Poliestireno (PS)

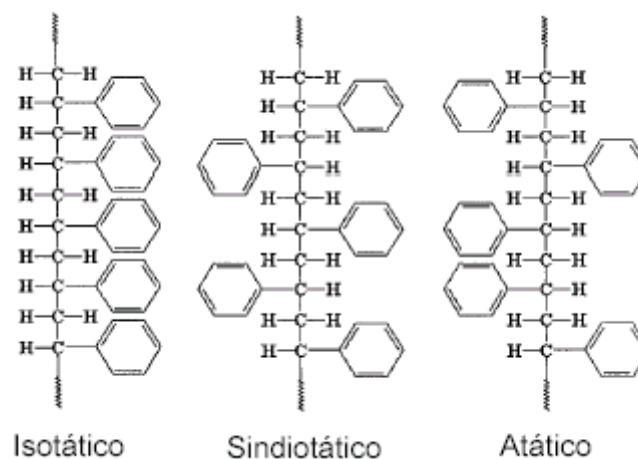
O estireno é um hidrocarboneto líquido com ponto de ebulição de 145°C e ponto de solidificação de -30,6°C. Sua produção pode vir da desidrogenação do etil benzeno, que é obtido a partir da alquilação do etileno e do benzeno, provenientes do petróleo e da hulha, respectivamente, na presença de um catalizador, como por exemplo o cloreto de alumínio.

A polimerização vinílica do monômero estireno é ativada por um indicador, por exemplo, o peróxido de benzoíla ou o 2,2'-azo-bis-isobutirilnitrila (AIBN). Estes agem no monômero rompendo a ligação dupla, promovendo a reação de polimerização segundo o esquema apresentado na Figura 3.11.



**Figura 3.11:** Equação de Polimerização do Estireno

Na polimerização por radicais livres se forma o poliestireno atático, tipo de configuração onde o grupo fenila está disposto espacialmente ao acaso ao longo da cadeia polimérica, sendo um polímero termoplástico amorfo. O poliestireno ainda pode ser obtido nas configurações isotática e sindiotática, nas quais o grupo fenila está disposto de maneira ordenada para um mesmo lado ou de maneira alternada em um plano ao longo da cadeia polimérica. O poliestireno sindiotático passou a ser produzido comercialmente por polimerização via catálise metalocênica e possui estrutura cristalina que funde a 270°C. A Figura 3.12 mostra uma representação estrutural da estereorregularidade do PS.



**Figura 3.12:** Representação Estrutural da Estereorregularidade do PS

As principais características do poliestireno são: alta temperatura de transição vítrea, transparência, facilidade de processamento, estabilidade térmica, alto módulo de elasticidade,

excelentes propriedades elétricas e baixo custo. Polímeros estruturais amorfos são indicados para uso em temperaturas bem abaixo de sua temperatura de transição vítrea (Tg).

O PS possui um bom escoamento sob condições de moldagem por injeção, o que o torna um polímero ideal para esta técnica. Como existem várias grades ou tipos de PS, este pode ser processado por vários métodos de transformação industrial como: co-extrusão, termoformagem, extrusão-termoformagem para fabricação de embalagens de alimentos e extrusão de chapas.

Devido às suas propriedades especiais, o PS pode ser utilizado numa vasta gama de aplicações, e comercialmente é vendido em três formas ou tipos: cristal ou Standard, poliestireno de alto impacto (HIPS) e poliestireno expandido (EPS) (BNDES, 2004).

### 3.3.1 Poliestireno Expandido (EPS)

Um dos polímeros com maior e constante crescimento no mercado tem sido o poliestireno expandido (EPS)<sup>1</sup>, cujas aplicações estendem-se por diversas áreas como: embalagens para equipamentos eletro-eletrônicos, utilidades domésticas como conservadoras térmicas, isolantes acústicos e térmicos, bandejas para acondicionamento de alimentos, entre outras. Um mercado onde a aplicação do EPS sofreu grande crescimento nos últimos anos é a construção civil, sendo utilizado como isolante acústico e térmico, como blocos para confecção de pisos e lajes e, até mesmo, podendo ser construídas paredes inteiriças de EPS, que recebem posterior acabamento com cimento. A Figura 3.13 mostra um exemplo de aplicação de EPS na construção civil.



**Figura 3.13:** Exemplo de aplicação de EPS na infra-estrutura de estradas (ABRAPEX)

<sup>1</sup> Após a transformação o EPS é mais conhecido como ISOPOR, marca registrada pela BASF no Brasil.

A matéria prima do EPS é o poliestireno (PS) expansível, um polímero do estireno, que contém um agente expensor. É obtido através do petróleo por meio de diversas transformações químicas.

O EPS consiste em um polímero obtido pela polimerização em cadeias via radicais livres, do estireno. Esta polimerização é conduzida normalmente em suspensão, obtendo-se partículas esféricas com uma ampla faixa de tamanhos (geralmente entre 0,1 e 3,0mm), como mostra a Figura 3.14.



**Figura 3.14:** Partículas Esféricas de EPS (ACEPE, 2004)

Para que obtenha a característica de expansibilidade, deve-se incorporar um agente de expansão à matriz polimérica, que se caracteriza por uma substância capaz de vaporizar e expandir termicamente no interior do polímero, fazendo com que o mesmo tenha seu volume específico aumentado muitas vezes.

O processo de transformação do poliestireno expandido pode ser realizado de diversas maneiras, as mais comuns são: extrusão direta, formando o chamado poliestireno levemente expandido e expansão em moldes, formando o EPS realmente, que tem maior aplicação.

Na extrusão direta o agente de expansão é misturado ao polímero em uma extrusora, sob pressão. O agente vaporiza-se com a redução da pressão após a saída da extrusora, da massa polimérica fundida, formando uma estrutura celular na matriz polimérica.

A expansão em moldes é conseguida com o aquecimento das partículas de EPS acima da Tg (temperatura de transição vítrea). Com isso o agente de expansão, que é incorporado ao polímero durante o processo de síntese, vaporiza-se no interior da massa altamente viscosa de polímero, formando também uma estrutura celular após o resfriamento.

O processo de expansão em moldes é realizado em duas etapas. Na primeira as partículas são pré-expandidas com vapor ou ar quente em sistemas não confinados. Em

seguida são transferidas para silos onde permanecem em maturação para equalização entre a pressão externa e a interna, que sofreu redução após o resfriamento do material.

A redução na pressão interna cria um vácuo que deve ser compensado pela difusão de ar para dentro das perolas pré-expandidas. A segunda etapa de expansão, chamada de moldagem, ocorre após a maturação, quando o material pré-expandido é carregado em um molde vazado onde recebe novo aquecimento com vapor ou ar quente, sendo que as partículas expandem-se e soldam-se umas às outras, formando uma peça.

Os agentes de expansão, também conhecidos como agentes de formação de espumas, são substâncias capazes de vaporizar ou liberar gases no interior de uma matriz polimérica aquecida acima da sua  $T_g$  (temperatura de transição vítrea). Estes são normalmente classificadas em agentes de expansão química ou física.

Os agentes de expansão química liberam gases como resultado de sua composição térmica ou reações com outros componentes da mistura polimérica. Alguns exemplos são sais inorgânicos como carbonato de amônio ou de metal alcalino e compostos orgânicos como azo-e diazo-compostos.

Os agentes de expansão física, por sua vez, produzem vapor como resultado da mudança de estado (evaporação) com a elevação da temperatura ou diminuição da pressão.

No passado utilizaram CFC's (cloro/flúor/carbonos) como agentes de expansão, porém provou-se que estes compostos atacam a camada de ozônio na estratosfera, responsável pela proteção da superfície terrestre contra o excesso de raios ultravioleta, vindos do sol e nocivos aos seres vivos.

Atualmente o agente de expansão mais comum para o EPS comercial é uma mistura de isômeros de pentano (n- e iso-pentano), que possui um ponto de ebulição entre 28 e 36° C. O pentano, solúvel na matriz de PS, age como plastificante e redutor da  $T_g$ , facilitando a expansão.

Dentre as muitas vantagens e características verificadas no EPS, destacam-se as seguintes:

- **Baixa condutibilidade térmica:** A estrutura de células fechadas, cheias de ar, dificulta a passagem do calor, o que confere ao EPS um excelente poder isolante.
- **Exposição a temperaturas extremas:** O EPS não tem limite na exposição a baixas temperaturas; a temperatura mínima de utilização corresponde à da liquefação dos gases componentes do ar contido nas células. No entanto, como todos os plásticos, o EPS tem um limite superior de exposição à temperatura. A temperatura máxima do EPS poderá ultrapassar os 100°C em exposições muito curtas, baixando para 80-85°C em situações de exposição prolongada com a aplicação de cargas elevadas.
- **Baixo peso específico:** Entre 9kg/m<sup>3</sup> a 40kg/m<sup>3</sup>.
- **Resistência mecânica:** Possui alta resistência à compressão que normalmente varia de 7000kgf/m<sup>2</sup> até 14000kgf/m<sup>2</sup>.
- **Baixa absorção de água:** O EPS não é higroscópico. Mesmo quando imerso em água ele absorve apenas pequenas quantidades de água. Tal propriedade garante que o EPS mantenha suas características térmicas e mecânicas mesmo sob a ação da umidade. O EPS não apresenta ascensão capilar.
- **Difusão do vapor de água:** O EPS é permeável ao vapor de água.
- **Resistente ao envelhecimento:** Todas as propriedades do EPS mantêm-se inalteradas ao longo da vida do material. Estima-se, na natureza, que o EPS tenha vida útil de 150 a 200 anos.
- **Resistente Quimicamente:** O EPS é compatível com a maioria dos materiais correntemente utilizados na construção civil, tais como cimento, gesso, cal e água.

**Comportamento microbiológico:** O EPS não apodrece nem embola, não é solúvel em água e nem libera substâncias para o ambiente. O EPS é totalmente inócuo, portanto não constitui substrato ou alimento para o desenvolvimento de animais ou microorganismos.

O EPS é composto de 98% de ar e 2% de matéria-prima (em massa), que desde a sua criação, tem sido amplamente aplicada de diversas formas como embalagens industriais (tanto para a conservação de produtos alimentícios como para proteção de equipamentos), artigos de consumo, isolante térmico, aplicação em processos de fundição de blocos de motores na indústria automobilística, materiais para a construção civil (formas para concreto, isolamento térmico de lajes, drenagem em muro de arrimo, forros isolantes e decorativos, isolamento térmico de telhados, concreto leve, entre outros) (ABRAPEX, 2004).

A produção de materiais e bens de consumo tem se multiplicado nos últimos anos, trazendo a preocupação ecológica com o descarte e reciclagem destes materiais. Segundo Ribas (2007), a preocupação em preservar o meio ambiente iniciou-se na década de 80, e principalmente tornou-se mais visível nos anos 90, seja porque realmente houve conscientização na preservação, seja pelo marketing ecológico que muitas empresas passaram a realizar para ganhar credibilidade de seus clientes. Embalagens de vários materiais têm encontrado lugar na indústria quando reprocessadas e misturadas a materiais virgens para confecção de novos produtos. Um exemplo clássico é a reciclagem de garrafas PET, que podem ser reprocessadas após moagem ou micronização, dando origem a artefatos termoplásticos dos mais diversos tipos. Segundo Guelbert et al (2007), para as empresas que utilizam matéria-prima reciclado na composição de outros produtos, a facilidade de serem processadas e o baixo custo viabilizam a utilização das matérias-primas recicladas. Entretanto alguns materiais têm encontrado dificuldade em serem incorporados novamente no ciclo produtivo como é o caso do EPS, por apresentar uma baixa densidade apresenta grandes dificuldades de ser reprocessado em equipamentos convencionais, pois ocupa grande volume e pequena quantidade mássica, inviabilizando economicamente a produção de artefatos. Dados da Associação Brasileira de Poliestireno Expandido (ABRAPEX) apontam que a produção de EPS em todo o mundo no ano de 2000 foi da ordem de 2,95 milhões de toneladas que é um fator preocupante para o meio ambiente devido ao grande volume que o EPS ocupa, pois não há muitas alternativas de reprocessamento para este material, sendo o descarte uma solução comumente adotada (Figura 3.15). O maior problema relacionado ao descarte do EPS é o fato deste necessitar de um longo tempo de degradação além do volume que ocupa, ocasionando poluição visual e possíveis superlotações dos lixões e aterros sanitários, onde no Brasil segundo Calderoni (1999), aproximadamente 20% destes é ocupado por material termoplástico.



**Figura 3.15:** Descarte do EPS pós-consumo

Nesta pesquisa buscou-se uma alternativa melhor para o descarte deste material, agregando assim, um maior valor econômico, legal e ambiental, tanto para a empresa quanto para a sociedade.

### **3.4 MATERIAIS BETUMINOSOS**

Os materiais betuminosos são por definição, misturas de hidrocarbonetos solúveis em bissulfeto de carbono ( $CS_2$ ), com propriedades de aglutinação. Existem duas categorias de materiais betuminosos: os asfaltos, provenientes do petróleo e os alcatrões, oriundos da queima do carvão (Pinto, 1988a).

Os betumes possuem as seguintes características básicas:

- **São adesivos e aglomerantes que dispensam uso da água:** ao contrário dos aglomerantes minerais da construção civil, como cimento Portland, cal e gesso;
- **São hidrófugos:** repelem água;
- **São facilmente fundidos e solidificados**
- **São termoplásticos:** não possuem ponto de fusão amolecendo em temperaturas variadas;
- **São inócuos:** não interagem quimicamente com os agregados minerais (ou cargas), que lhe são adicionados como material de enchimento em diversas aplicações;
- **São recicláveis:** decorrentes das duas últimas características, podem ser reaproveitados após uso;



A partir de 1909 iniciou-se o emprego de asfalto derivado do petróleo, o qual, pelas características de economia e pureza, em relação aos asfaltos naturais, constitui atualmente a principal fonte de suprimento.

Os asfaltos são materiais aglutinantes de cor escura constituídos por misturas complexas de hidrocarbonetos não voláteis de elevada massa molecular. Originam-se do petróleo, podendo ser obtidos pela evaporação natural de depósitos localizados na superfície terrestre (asfaltos naturais) ou por destilação em unidades industriais.

Os asfaltos podem ser encontrados em estado natural ou obtidos através do refino do petróleo. Os asfaltos naturais têm origem na elevação do petróleo a superfície, que sofre uma espécie de destilação natural ao longo de milhares de anos, pela ação do sol e do vento, que retiram os gases e óleos leves, deixando um resíduo muito duro que é o asfalto natural. Há ocorrências sob a forma de rochas, que nada mais são do que rochas porosas que se tornam, naturalmente, impregnadas de asfalto. Citam-se, por exemplo, os arenitos, os xistos e os calcários asfálticos (Liberatori, 2000).

Os asfaltos de petróleo são obtidos através de uma destilação fracionada de certos tipos de petróleo. Na origem orgânica do petróleo, é comprovada a existência de materiais de origem animal e vegetal. A decomposição destes seres, na ausência de oxigênio, forma os hidrocarbonetos que fazem parte da constituição química do petróleo.

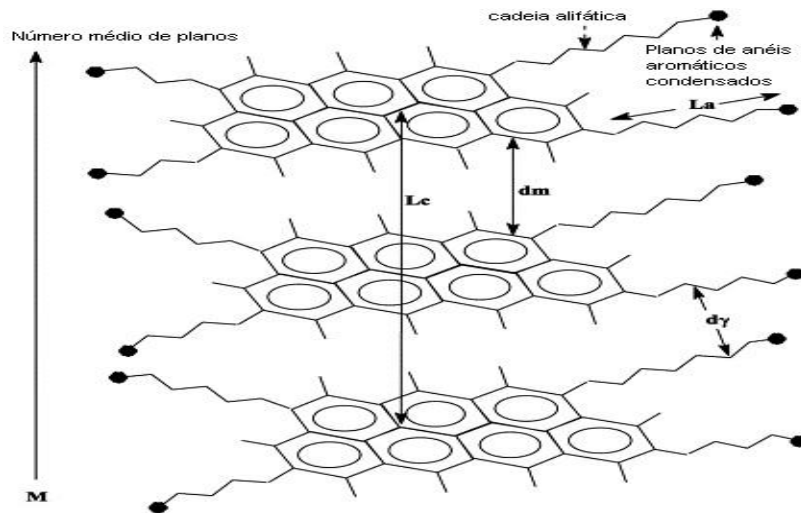
Assim sendo, pode-se dizer que ele é constituído por uma mistura complexa de hidrocarbonetos com os mais diferentes pontos de ebulição contendo, ainda, pequenas quantidades de compostos orgânicos oxigenados, nitrogenados, sulfurados, organometálicos, água, sais minerais e areia, que são considerados como impurezas.

Diante da complexidade de sua composição química, alguns pesquisadores elaboraram métodos de separação do asfalto segundo sua solubilidade em solventes específicos (Corbett, 1969). Dentre estes, a metodologia mais utilizada, e também a mais citada na literatura, é aquela do químico Corbett, a qual diz que o asfalto é um material formado basicamente por quatro famílias genéricas; saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos, chamadas frações SARA. As três primeiras frações constituem a porção maltênica, solúvel em n-heptano, e a última denomina-se porção asfáltica, insolúvel em n-heptano. Os saturados e os aromáticos funcionam como plastificantes das frações de resinas e asfaltenos, as quais possuem maior

massa molar. Os asfaltenos, sólidos de coloração preta, possuem massa molar que pode variar de 1000 a 100000 g/mol, as resinas de 500 a 50000 e os compostos aromáticos e saturados de 300 a 2000 g/mol. O teor de cada fração, assim como sua massa molar, depende da origem do petróleo e de seu processo de refino.

Conforme o teor de asfaltenos e maltenos, o asfalto pode variar sua estrutura coloidal e suas propriedades reológicas com a temperatura. Considera-se que o asfalto possui três tipos fundamentais de estruturas:

- Estrutura GEL: caracterizada pela aglomeração das micelas de asfalto, formando uma fase contínua pouco dispersa pelas resinas. Os asfaltos de estrutura GEL são ricos em asfaltenos e possuem a fase maltênica pobre em hidrocarbonetos aromáticos, apresentando um comportamento reológico do tipo elástico.
- Estrutura SOL: caracterizada pela peptização total das micelas de asfalto pelas resinas. Consiste em uma solução diluída e bem estabilizada de asfaltenos em meio dispersante fortemente estruturado pelas resinas. Os asfaltos de estrutura SOL possuem a fase maltênica rica em aromáticos e apresentam comportamento reológico viscoso.
- Estrutura SOL-GEL: caracterizada pela presença de um agregado de micelas de asfaltenos dentro de um meio dispersante de resinas é um tipo de estrutura intermediário entre SOL e GEL. A maioria dos asfaltos para pavimentação possui esse tipo de estrutura, cujo comportamento reológico é viscoelástico. A Figura 3.16 mostra uma estrutura parcial de um asfalto.



**Figura 3.16:** Representação simplificada de cadeias poliméricas contidas no CAP.

No processo de destilação do petróleo, a separação das frações leves como a gasolina e querosene, do asfalto, se dá por vaporização, fracionamento e condensação em uma torre de fracionamento a vácuo, a temperaturas relativamente baixas. Esta medida evita o craqueamento do asfalto, ou seja, a perda de suas propriedades ligantes e aglutinantes.

O produto que permanece no fundo da torre de vácuo após a remoção dos outros destilados denomina-se resíduo asfáltico, e se for enquadrado nas especificações Brasileiras passa a ter o nome de cimento asfáltico de petróleo (CAP) (IBP, 1994).

### 3.4.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O cimento asfáltico de petróleo, ou CAP apresenta propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, e possui características de flexibilidade, durabilidade e alta resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis (Comissão de asfalto do IBP, 1994). No Brasil, a produção de asfalto corresponde de 1 a 2 % da produção total de derivados de petróleo gerados pela Petrobrás. O asfalto pode variar suas características de acordo com o tipo de petróleo ou ainda com o tipo de planta industrial da refinaria onde é obtido.

O controle das propriedades do asfalto é realizado segundo um conjunto de normas, o qual chamamos especificações. As especificações mundialmente conhecidas e utilizadas são a

americana ASTM e a européia, elaborada pelo Comitê Européen Normalisation (CEN). No Brasil, o Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes – DNIT, antigo DNER (Departamento Nacional de Estradas e Rodagem), possui um conjunto de normas, elaboradas pela Comissão de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP.

Segundo as novas especificações o CAP é classificado de acordo com sua penetração, ou seja, pela medida, em décimos de mm (dmm), que uma agulha padrão penetra em uma amostra de 100 g de asfalto, durante 5 s à temperatura de 25°C. Sendo assim, o asfalto pode denominar-se CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 ou CAP 150/200. O CAP normalmente utilizado em pavimentação no Brasil é o CAP 50/70, antigamente chamado de CAP 20.

### **3.5 INTERAÇÃO SOLO-FIBRA – ESTUDOS EXPERIMENTAIS**

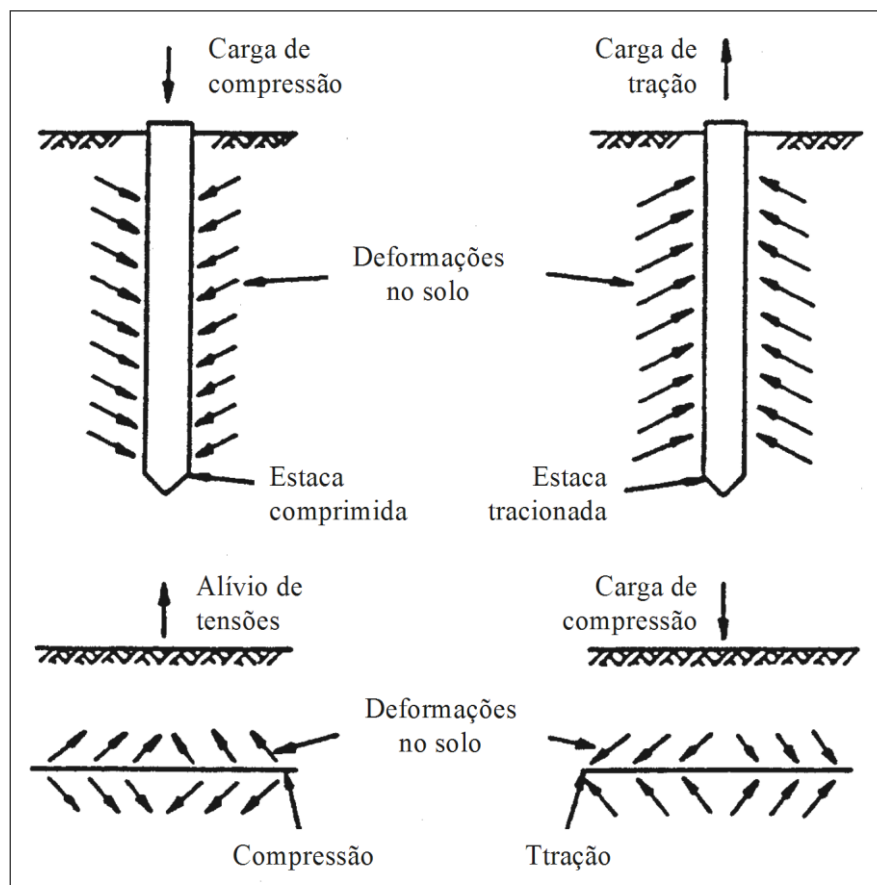
Os fatores que afetam o comportamento do compósito solo-fibra são muito complexos. São inúmeras as combinações de variáveis que alteram de forma significativa os mecanismos de interação. Para uma dada combinação de variáveis, o resultado obtido pode ser o desejado para uma dada aplicação do compósito, porém, pode não ser para outra. Com o conhecimento das mudanças na estrutura do material reforçado com fibras em relação ao solo sem fibras, pode-se avaliar até que ponto o comportamento mecânico dos solos reforçados pode ser explicado pelas mudanças nos parâmetros usuais empregados para solos não reforçados.

As características de resistência mecânica e de deformabilidade do elemento de reforço têm uma influência fundamental no comportamento tensão-deformação do solo reforçado. McGown *et al.* (1978) propuseram a divisão de reforço de solos em inclusões extensíveis e não-extensíveis. O elemento de reforço extensível tem deformação de ruptura maior que a máxima deformação de tração no solo sem reforço. Sua principal função é de aumentar a ductilidade e diminuir a perda de resistência pós-pico, além do acréscimo de resistência mecânica. Já o elemento de reforço não-extensível tem deformação de ruptura menor que a máxima deformação de tração no solo sem reforço, confere ganho de resistência mecânica, porém, rupturas catastróficas podem ocorrer se o reforço romper.

As fibras somente passam a exercer uma ação efetiva dentro da massa de solo quando esta, submetida a esforços externos, sofre deformações. O funcionamento das fibras como elementos de reforço é então comandado pelas características de deformabilidade do solo e

pela forma de distribuição destas deformações, que dependem do tipo de solicitação ao qual o material está sendo submetido.

Procurando compreender melhor esse processo, os autores citados estabeleceram uma analogia entre o elemento de reforço de solo e uma estaca cravada. Conforme a Figura 3.17, em sistemas de estacas, pode existir estacas comprimidas ou tracionadas, dependendo das forças externas aplicadas a estas. As estacas, por sua vez, induzem deformações à massa de solo. Já no sistema de solo reforçado ocorre o contrário, carregamentos externos de compressão ou alívio de tensões agem na massa de solo provocando deformações internas que acabam por transferir esforços para os elementos de reforço. Porém, as deformações internas do solo envolvidas nestas condições não são analogamente correspondentes às envolvidas no sistema de estacas.



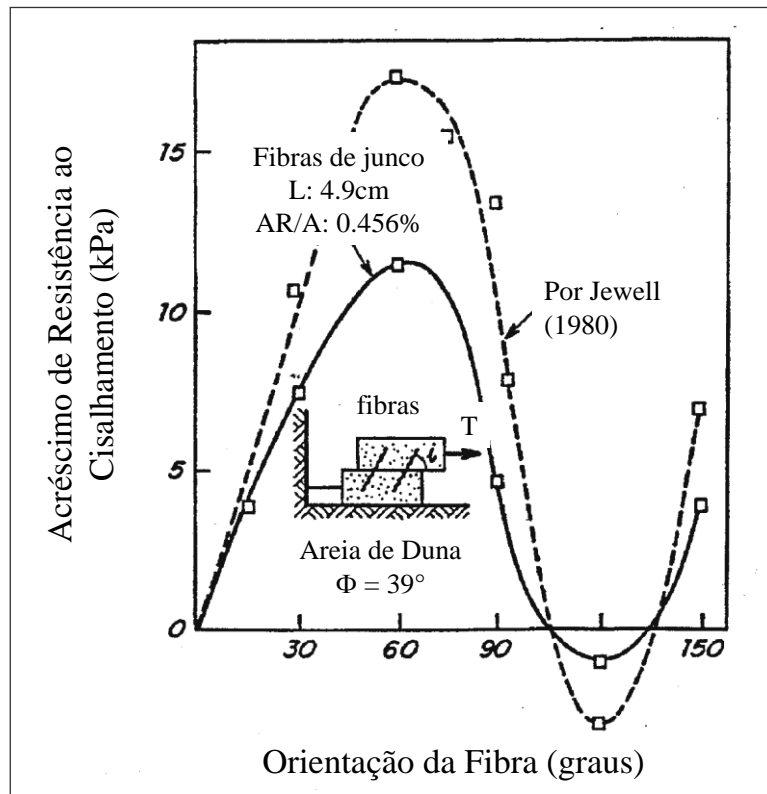
**Figura 3.17:** Comparação de estaca com elemento de reforço de solo  
(McGown *et al.*, 1978)

McGown *et al.* (1978) observam ainda, que para o máximo benefício das inclusões, estas devem estar dispostas na direção das deformações principais dentro da massa de solo e que a adesão entre solo e reforço e as características de deformação e resistência mecânica são parâmetros muito importantes na definição do comportamento do material compósito. Ao serem submetidas a esforços de tração, as fibras transferem esforços para o solo, provocando uma redistribuição de tensões e, portanto, de deformações no interior do solo.

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

Um modelo teórico para prever o comportamento de uma areia reforçada com fibras foi proposto por Gray & Ohashi (1983). Ensaios de cisalhamento direto foram executados com areia, nos estados fofo e denso, reforçada com fibras naturais, sintéticas e metálicas. Os resultados mostraram que a inclusão da fibra aumentou a resistência ao cisalhamento de pico e reduziu a queda pós-pico. Foi possível observar a existência de uma tensão de confinamento crítica onde, abaixo desta, as fibras são arrancadas e, acima desta, as fibras são alongadas. O aumento do comprimento das fibras resultou num aumento da resistência ao cisalhamento, porém, esse aumento é verificado até certo limite, a partir do qual, este efeito não é mais observado.

A orientação das fibras com relação à superfície de cisalhamento também é considerada no modelo. Na Figura 3.18 são apresentados resultados de ensaios de cisalhamento direto realizados pelos autores mencionados anteriormente. Como se pode observar, a inclinação de 60° em relação ao plano de ruptura representa a maior contribuição em termos de resistência e a inclinação de 120° representa a redução da resistência ao cisalhamento.



**Figura 3.18:** Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra (Gray & Ohashi, 1983)

Freitag (1986) examinou os efeitos da inclusão de fibras na resistência à compressão simples de um solo residual de calcário compactado segundo uma larga faixa de teores de umidade. Foram usadas três fibras sintéticas diferentes: uma de nylon (descartada no início dos trabalhos por dificuldades de mistura), uma de polipropileno (com 0,20mm de diâmetro) e outra também de polipropileno chamada Fibermesh (0,10mm de diâmetro). As fibras mediam 20mm de comprimento e o teor adicionado foi de 1% em volume. Os resultados indicaram que houve aumento da resistência à compressão não confinada, principalmente para teores de umidade próximos à ótima e no ramo úmido da curva de compactação. As curvas tensão-deformação mostraram que o solo reforçado rompe em uma deformação bem superior à do solo não reforçado, sendo capaz de absorver maior energia de deformação.

McGown *et al.* (1988) estudaram a influência da adição de malhas de polipropileno na resistência de um solo granular. A adição do reforço aumentou de forma considerável a resistência do solo obtida em ensaios triaxiais e ensaios de placa em escala reduzida. O

intertravamento entre o solo e o reforço alterou os parâmetros de resistência e de deformabilidade, sendo mais pronunciado para teores maiores de reforço.

Gray & Maher (1989) salientam que uma massa de solo reforçada com fibras discretas distribuídas aleatoriamente utiliza processos tradicionais de mistura do solo estabilizado com cimento, cal ou outro aditivo. O mesmo pode-se dizer para o processo de compactação. Uma das principais vantagens de fibras distribuídas aleatoriamente é a manutenção da resistência isotrópica e a ausência de planos de fraqueza que podem ser desenvolvidos em sistemas de reforço orientado. Nesse trabalho, foi analisada a influência de diversos parâmetros das fibras e dos solos sobre o comportamento tensão-deformação das misturas. Os autores verificaram a existência de uma tensão de confinamento crítica. No estudo, o aumento do índice de aspecto resulta na redução desta tensão de confinamento crítica e torna mais efetivo a contribuição da fibra no aumento da resistência ao cisalhamento, porém, o crescimento da resistência ao cisalhamento com o aumento do teor de fibra é observado até um certo limite.

Shewbridge & Sitar (1989) avaliaram o mecanismo de desenvolvimento da zona de cisalhamento de um solo granular reforçado com vários tipos de fibras. Foram realizados ensaios em equipamento de cisalhamento direto cujas dimensões eram maiores que as convencionais. Para o solo reforçado, a zona de cisalhamento era mais larga e aumentava com a concentração, rigidez e aderência entre o solo e o reforço.

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

Para tensões confinantes baixas, a inclusão de fibras afeta a parcela friccional da resistência. Para tensões maiores existe um ponto que define uma clara mudança no mecanismo de interação solo-fibra, a partir do qual a parcela friccional atinge o mesmo patamar do solo sem reforço, correspondendo à alteração de comportamento somente à



parcela coesiva. A tensão de confinamento correspondente à mudança no mecanismo de interação solo-fibra é então definida como a tensão de confinamento crítica, caracterizando o ponto onde a resistência ao cisalhamento, desenvolvida na interface solo-fibra, se iguala ou supera a resistência à tração da fibra. Abaixo da tensão crítica, a resistência última à tração da fibra é maior e a forma de ruptura nas zonas de cisalhamento do material compósito se dá por deslizamento entre solo e fibra.

Após um amplo programa experimental, Maher & Gray (1990) concluíram que o aumento da resistência ao cisalhamento é função das propriedades da areia (gradação, tamanho e forma das partículas) e da fibra (teor, índice aspecto e módulo). A resistência diminui com o aumento do tamanho médio e da esfericidade das partículas de areia, por outro lado, há um acréscimo da resistência com o aumento do coeficiente de uniformidade da areia, do teor de fibras, do módulo de elasticidade das fibras e do índice de aspecto. O modelo proposto pelos autores citados acima, para prever o comportamento do solo reforçado com fibras, é baseado num modelo aplicado a concreto reforçado com fibras. Em geral, há um razoável ajuste entre os valores experimentais e os previstos pelo modelo. Entretanto, ainda há a necessidade de um melhor refinamento do modelo, principalmente em relação à estimativa da espessura da zona de cisalhamento. Concordando, Gray & Al-Refeai (1986) concluíram que quanto menor a rugosidade superficial das fibras maior é a tensão de confinamento crítica. Da mesma forma, Gray & Ohashi (1983) concluíram que quanto maior a esfericidade das partículas maior é a tensão crítica. Ranjan & Charan (1996) observam ainda que a tensão crítica diminui com o aumento do índice aspecto.

Fatani *et al.* (1991) realizaram ensaios de cisalhamento direto para avaliar o comportamento de uma areia siltosa reforçada. Os elementos de reforço consistiam de fibras metálicas flexíveis, semi-rígidas e rígidas. A influência da orientação das fibras segundo o plano de cisalhamento foi investigada. Reforços posicionados a 90° em relação ao plano de cisalhamento e distribuídos aleatoriamente são mais efetivos no aumento da resistência.

Maher & Ho (1993) estudaram o comportamento de uma areia artificialmente cimentada reforçada com fibras de vidro distribuídas aleatoriamente. Ensaios triaxiais foram executados sob carregamento estático e cíclico. A resistência à tração do material cimentado reforçado também foi avaliada pelo ensaio brasileiro através da determinação da resistência à tração por compressão diametral. A inclusão das fibras aumentou significativamente a

resistência de pico da areia cimentada. O aumento do comprimento e do teor de fibras aumentou a resistência à tração a baixas tensões de confinamento; aumentou o índice de fragilidade, porém, houve uma redução com o acréscimo da tensão de confinamento; aumentou a capacidade de absorção de energia; aumentou o intercepto coesivo e o ângulo de atrito interno; e aumentou significativamente a resistência à tração da areia cimentada. Com a adição das fibras também houve um aumento do número de ciclos e da magnitude das deformações necessárias para causar a ruptura da areia cimentada.

As propriedades mecânicas de um compósito caulinita/fibra foram estudadas por Maher & Ho (1994) através de ensaios de compressão não confinada, de compressão diametral e de flexão. Foram utilizadas fibras de polipropileno, vidro e celulose. Observou-se que a inclusão aleatória das fibras aumentou significativamente a resistência e a ductilidade do compósito, sendo este aumento mais pronunciado para baixos teores de umidade. Para o mesmo teor de reforço, fibras mais curtas são mais numerosas dentro da matriz e existe uma maior possibilidade de elas estarem presentes na superfície de ruptura contribuindo para o aumento da resistência. Todavia, após a ruptura, as fibras mais curtas são arrancadas mais facilmente, o que denota a importância de fibras mais longas quando se deseja melhorar a ductilidade e a capacidade de absorção de energia.

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

Ranjan & Charan (1996) realizaram uma série de ensaios de compressão triaxial em solos granulares reforçados com fibras naturais e sintéticas distribuídas aleatoriamente para

estudar a influência das características das fibras (teor, índice de aspecto, superfície de fricção) e das propriedades dos solos na resistência ao cisalhamento. Baseados nos resultados obtidos os autores constataram a existência da tensão confinante crítica e que, aumentando a relação  $l/d$ , a tensão confinante crítica reduz de valor, ou seja, as fibras serão suscetíveis ao arrancamento somente em um intervalo pequeno de tensão de confinamento.

Nataraj *et al.* (1996) apresentaram os resultados de uma série de ensaios de laboratório em um solo arenoso e outro argiloso reforçados com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente. Com a adição de fibras não houve alterações significativas nos parâmetros de compactação do solo, porém, houve um aumento da resistência ao cisalhamento das areias, sendo o aumento mais pronunciado para maiores teores de fibras. Independentemente do solo estudado, foi observado que a inclusão das fibras aumentou a resistência à compressão não confinada. Tanto o solo arenoso quanto o argiloso apresentaram valores de CBR maiores com a inclusão das fibras.

Preocupados com a quantidade de resíduos plásticos e a necessidade de fazer uso deles, Omine *et al.* (1996) investigaram as propriedades mecânicas de um solo argiloso cimentado reforçado com pedaços de plástico e com pedaços de garrafas PET por meio de ensaios de compressão não confinada. Foi avaliado o efeito da esbeltez dos pedaços de plásticos e o efeito do teor de cimento. Os autores concluíram que a adição de pedaços de plásticos aumenta a resistência à compressão não-confinada, sendo este aumento mais pronunciado para pedaços de plásticos mais esbeltos. Porém, para maiores teores de cimento, a adição do reforço reduziu a resistência. Os resultados dos ensaios obtidos por Li & Mitchell (1988) mostraram que o reforço em formato de malha (fibras poliméricas) e com ancoragens (fibras metálicas) apresentam os melhores resultados, dobrando a resistência ao cisalhamento quando se compara uma areia fracamente cimentada (3% de cimento) com e sem reforço. De maneira geral, todas as inclusões aumentaram a ductilidade do material permitindo uma maior absorção de energia.

Ulbrich (1997) e Consoli *et al.* (1998) avaliaram o efeito da inclusão de fibras de vidro em um solo arenoso artificialmente cimentado e não cimentado através de ensaios de compressão não-confinada, diametral e triaxiais drenados. Fibras relativamente rígidas (vidro e PET) exercem efeito mais pronunciado na resistência de pico, ao passo que fibras relativamente flexíveis (polipropileno) exercem efeito mais pronunciado no modo de ruptura

e no comportamento último. Considerações semelhantes também foram feitas por Consoli et al. (2002) quando avaliaram os efeitos da inclusão de fibras distribuídas aleatoriamente e da adição de cimento sobre as propriedades de resistência e deformabilidade de um compósito solo-cimento-fibra.

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

Montardo (1999) e Montardo *et al.* (2002) avaliaram os efeitos da inclusão de fibras distribuídas aleatoriamente e da adição de cimento sobre as propriedades de resistência e deformabilidade de um compósito solo-cimento-fibra. Foram utilizados para este fim uma areia fina uniforme, cimento Portland (CP V – ARI) e fibras de polietileno tereftalato (PET) obtidas a partir do reprocessamento de garrafas plásticas descartáveis. Os autores observaram que a inclusão de fibras teve uma influência significativa nas propriedades mecânicas do solo cimentado, aumentando a resistência à compressão não-confinada e à tração por compressão diametral, sendo este aumento mais pronunciado para maiores porcentagens de fibra. O efeito do comprimento da fibra, porém, mostrou-se nulo. Quanto ao comportamento na compressão triaxial, verificou-se o aumento da tensão desvio de pico, tanto com a porcentagem como com o comprimento das fibras, resultando de um aumento no ângulo de atrito de pico. Concluíram também que o reforço da areia cimentada com fibras PET resultou na melhoria do comportamento pós-pico, com o aumento da tensão desvio última e, embora tenha reduzido sensivelmente o índice de fragilidade do solo cimentado (de forma mais acentuada para o comprimento de fibra maior), não alterou expressivamente o modo de ruptura do material. A rigidez inicial não foi afetada pela inclusão das fibras, sendo esta uma função basicamente do nível de cimentação.

Murray *et al.* (2000) executaram ensaios de compactação e de compressão triaxial para avaliar as características de compactação e o potencial de deformação de um solo silto-arenoso reforçado com fibras de carpete recicladas e fibras de polipropileno fibriladas, distribuídas aleatoriamente. Inclusões de fibras discretas aumentaram a resistência de pico significativamente reduzindo a perda de resistência pós-pico, mudando em alguns casos, o comportamento do material, de rígido para dúctil. Os ensaios de compactação indicaram que o peso específico seco máximo diminuiu, aumentando o teor de umidade ótimo, com o aumento do teor de fibra. Os ensaios triaxiais revelaram que ambos os tipos de fibras aumentaram a resistência na ruptura e modificaram a taxa de deformação de um solo silto-arenoso. Não foi observado um teor de fibra ideal para o material reforçado com fibras de carpete recicladas, porém, para as fibras de polipropileno, esse teor é de aproximadamente 1%, e as perdas de resistência referentes à saturação são reduzidas no solo reforçado.

Specht (2000) avaliou os efeitos da inclusão de fibras poliméricas de diferentes propriedades mecânicas, uma em forma de filamentos e outra fibrilada (formada por pequenos filamentos unidos), sobre as propriedades de resistência e deformabilidade de um solo residual artificialmente cimentado sob condições de carregamento estático e dinâmico. O autor concluiu que as fibras extensíveis (em forma de filamentos) foram mais efetivas na melhoria das características pós-ruptura do compósito aumentando de forma expressiva a tenacidade, a ductilidade e a vida de fadiga. Entretanto, as fibras de caráter inextensíveis (fibriladas) foram mais efetivas na redução da deformabilidade e no aumento de resistência de pico. Estruturas de pavimento semi-rígido foram dimensionadas onde se observou uma significativa redução na espessura da camada cimentada quando da utilização de reforços fibrosos em forma de filamentos.

Feuerharmel (2000) estudou o comportamento de uma argila caulínica, artificialmente cimentada e não-cimentada, reforçada com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente na massa de solo. Comparando a influência da adição dessas fibras a dois outros solos, um arenoso e outro areno-siltoso, concluiu-se que a adição de fibras de polipropileno provocou reduções no módulo de deformação inicial do solo, sendo que a intensidade das alterações depende do tipo e das características de cada solo. Para misturas não-cimentadas, os solos menos rígidos foram os mais afetados enquanto que as alterações na areia foram pequenas. Quanto à resistência ao cisalhamento, concluiu que o comportamento resistente dos solos não-cimentados reforçados pode ser dividido em três etapas, uma inicial, onde o comportamento é

controlado pela matriz de solo, uma etapa intermediária, na qual o comportamento do material compósito é comandado juntamente pela matriz e pelos elementos de reforço, e uma etapa final, onde o comportamento do material é comandado exclusivamente pelas fibras. Para os solos não-cimentados, cujas deformações se distribuem por toda a amostra, também conclui que as fibras constituem uma estrutura entrelaçada que impõe uma resistência às deformações radiais na amostra, aumentando assim as deformações de compressão do solo. Este efeito depende da adesão entre o solo e as fibras, sendo que para a areia, onde esta adesão é inferior aos demais solos, não se observa alterações significativas na variação volumétrica.

Estudos experimentais realizados por Casagrande & Consoli (2002) em areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno mostraram um crescimento constante da resistência com o aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elasto-plástico de enrijecimento. Segundo os autores, as fibras passaram a contribuir de forma mais significativa para o acréscimo da resistência a partir de 2,5% de deformação axial.

Santoni *et al.* (2001) investigaram o efeito de numerosas variáveis no desempenho de amostras de areias reforçadas por fibras aleatoriamente distribuídas. Através de ensaios de compressão simples em seis diferentes areias, reforçadas com quatro tipos de fibras, com cinco comprimentos, seis diâmetros, em cinco taxas de dosagens, verificaram o significativo acréscimo da resistência não-confinada das amostras reforçadas. Em termos do ganho de resistência, são verificados o comprimento ideal de 51mm para as fibras e uma taxa de dosagem ótima situada entre 0,6 e 1,0% em relação à massa de solo seco. Os autores, ainda, verificam a melhora no comportamento das amostras reforçadas, tanto no ramo úmido como no ramo seco da curva de compactação, e afirmam que a inclusão de até 8% de silte, em massa, não afeta o desempenho das misturas. Para taxas de dosagem de fibras entre 0,6 e 1,0%, as amostras apresentaram comportamento de enrijecimento, caracterizado pelo aumento da resistência à compressão não-confinada com correspondente aumento da deformação; para taxas inferiores a 0,6%, tal comportamento não é verificado.

Zornberg (2002) propôs uma metodologia para analisar o equilíbrio limite de solos reforçados através de uma caracterização estrutural independente, do solo e das fibras, baseando-se em um equacionamento de estruturas discretas. Tal metodologia contrapõe a análise tradicional de solo reforçado com fibras, que usa ensaios de laboratório para a caracterização das propriedades deste, ou seja, este método tem por finalidade analisar

distintamente as características do solo (peso específico, coesão e ângulo de atrito), e das fibras (comprimento, diâmetro, peso específico e resistência à tração), a fim de estudar as suas atribuições para a análise de distribuição de tensões. Porém uma discussão proposta por Heineck & Consoli (2004), mostra que a precisão de parâmetros através deste equacionamento somente é válida quando a ruptura é governada pelo arrancamento das fibras, não pela ruptura destas, em tensões superiores à crítica, havendo uma superestimação do intercepto coesivo, enquanto o ângulo de atrito permanece praticamente inalterado. Segundo os autores citados, a diferença entre os parâmetros obtidos experimentalmente e analiticamente é possivelmente causada por características das fibras e índices aspecto distintos do programa de ensaios utilizado.

O comportamento hidráulico e mecânico de novos materiais geotécnicos compósitos, tentando adequar suas características à utilização em barreiras hidráulicas, foi analisado por Heineck (2002). Fibras de polipropileno de 24 mm de comprimento e bentonita foram adicionadas a amostras compactadas de solo, cinza, areia e caulim. Uma análise conjunta com ensaios de condutividade hidráulica indicou a utilização do material compósito (caulim e fibras) como *liners* de cobertura ou de fundo, até mesmo em casos de resíduos perigosos. Prosseguindo o estudo, Heineck *et al.* (2003-a) e Heineck *et al.* (2005) avaliaram a contribuição de fibras para grandes deformações de cisalhamento (ensaios do tipo *ring shear*), acima dos valores usuais em testes padrões de laboratório, bem como a avaliação da influência da inserção de fibras em solos para pequeníssimas deformações (ensaios triaxiais com *bender elements*). Os resultados mostraram que a influência do reforço fibroso nos solos continua após grandes deformações de cisalhamento, não havendo perda de resistência mesmo para deslocamentos horizontais da ordem de 250mm e que a introdução de fibras de polipropileno não influencia a rigidez inicial dos materiais estudados.

O estudo realizado por Donato *et al.* (2004) teve como propósito avaliar o comportamento mecânico de concreto compactado com rolo com adição de fibras de polipropileno. A partir dos resultados de ensaios de resistência à compressão simples e triaxial pode-se observar que as fibras provocam uma queda do módulo inicial dos compósitos estudados, tanto para os cimentados, quanto para os não cimentados, levando a uma melhoria significativa na resistência à compressão e na ductilidade do material reforçado, bem como reduções da rigidez inicial e do índice de fragilidade do material, sendo estas modificações de comportamento tão mais efetivas quanto mais fina a granulometria da matriz. Além disso, um

aumento considerável da resistência à tração foi observado através dos resultados de ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

Vendruscolo (2003) verificou a influência da adição de fibras de polipropileno no comportamento de um solo arenoso cimentado e não cimentado através de ensaios triaxiais e concluiu que a influência desta inclusão sobre as propriedades mecânicas do compósito depende fundamentalmente das propriedades da matriz, onde o efeito da adição de fibras é mais evidente para maiores comprimentos e maiores teores de fibras, sendo mais pronunciado para materiais compósitos com maiores pesos específicos. O autor cita também que a influência das fibras na resistência de pico e última do material depende do diâmetro das fibras e da distribuição granulométrica do solo.

Um amplo estudo realizado por Consoli *et al.* (2004) avaliou o comportamento de uma areia cimentada e não cimentada reforçada com fibras de vidro, de poliéster e de polipropileno. A influência das fibras de poliéster e vidro é perceptível na redução da rigidez e no aumento do ângulo de atrito interno de ambas as matrizes (cimentada e não cimentada). A redução da fragilidade e do valor de intercepto coesivo acentua-se para o compósito cimentado. Por outro lado, as fibras de polipropileno reduziram drasticamente o índice de fragilidade da areia cimentada, mudando o modo de ruptura de frágil a dúctil, para o maior comprimento de fibra estudado (36mm), com o aumento da capacidade de energia absorvida, fato este não observado para os outros tipos de fibra estudados. Ou seja, não é possível estabelecer regras de comportamento sem o conhecimento prévio das propriedades dos materiais envolvidos.

Santos (2004) desenvolveu um equipamento de compressão confinada com medição de tensão lateral e avaliou o comportamento, sobre a trajetória de tensões com deformações radiais nulas, de uma areia e de misturas de areia-fibra, considerando a influência da adição de fibras de diferentes comprimentos. Os resultados mostraram que a inclusão de fibras torna-se cada vez mais significativa com o aumento das tensões e que a variação do comprimento das fibras também tem efeito sobre a trajetória de tensões, sendo maior a influência quanto maior for o comprimento. Também mostram os resultados que a tensão lateral diminui com a inclusão de fibras, sendo esta redução cada vez mais significativa com o aumento das tensões verticais e proporcional ao comprimento das fibras. O autor afirma, ainda, que a presença de fibras modifica o comportamento tensão-deformação no carregamento, principalmente nas



tensões iniciais, e praticamente mantém a mesma forma da curva da areia sem fibras nas tensões maiores e no descarregamento. Os valores de  $K_0$  diminuem com a inclusão de fibras e com o aumento do comprimento das mesmas para todos os níveis de tensão tanto no carregamento quanto no descarregamento, mantendo-se praticamente constantes no carregamento e crescendo no descarregamento.

Casagrande (2005) estudou o comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno, submetidos a grandes deformações, que possuíam características adequadas para o emprego em *liners* de cobertura de aterros sanitários e aterros sobre solos moles. Foram realizados ensaios triaxiais consolidados drenados com distintas trajetórias de tensões e aplicação de altas tensões, em amostras de areia e areia-fibra, como também em ensaios de cisalhamento do tipo *ring shear* e provas de carga em placa de 0,30 m de diâmetro sobre espessas camadas de areia compactada, reforçada e não reforçada com fibras. Nesta pesquisa buscou-se investigar o comportamento tensão-deformação de misturas reforçadas, os efeitos do comprimento, porcentagem, diâmetro e alongamento/ruptura das fibras, tensão de confinamento, granulometria do solo e densidade das misturas, nas propriedades mecânicas do material reforçado, bem como a influência da adição de fibras no comportamento carga-recalque e nos mecanismos de ruptura de uma areia reforçada. A adição de fibras influenciou o comportamento compressivo da areia, aumentou os parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico e pós-pico das matrizes estudadas após grandes deslocamentos horizontais, sem quedas significativas de resistência pós-pico no caso da matriz arenosa. O efeito da inclusão de fibras foi mais evidente para altas tensões efetivas médias iniciais, menores diâmetros, maiores comprimentos e maiores teores de fibras, sendo seu efeito mais pronunciado para misturas mais densas. O comportamento carga-recalque do solo arenoso foi significativamente influenciado pela adição de fibras, aumentando a capacidade de suporte deste e alterando mecanismos de ruptura.

Casagrande *et al.* (2006) avaliaram o comportamento de misturas de uma bentonita reforçada com fibras de polipropileno através de ensaios do tipo *ring shear*. Os autores observaram que a inclusão aleatória das fibras aumentou a resistência ao cisalhamento de pico do solo, porém o ganho de resistência era reduzido a deformações maiores e as resistências residuais dos materiais com e sem reforço eram similares. O aumento da resistência de pico foi percebido com o aumento do comprimento e da quantidade de fibras. Os autores

verificaram, após a realização dos ensaios, que as fibras sofreram alongamento e, predominantemente, ruptura.

Donato (2007) estudou a distribuição de tensões em um solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno através de ensaios de prova de carga em placa circular, com medidas diretas de tensão pelo uso de células de tensão total. Calibrações em laboratório foram realizadas para avaliar os fatores que afetam as medições de tensões em células de tensão total inseridas no solo. O Método dos Elementos Finitos foi também utilizado para simular numericamente a distribuição de tensões dentro de câmaras de calibração. Nos ensaios de placa pode-se observar que o comportamento carga-recalque do solo arenoso é significativamente influenciado pela adição de fibras, aumentando a capacidade de suporte deste e alterando os mecanismos de ruptura. As medidas de tensões mostram uma mudança na distribuição de tensões com a inclusão do reforço.

Um procedimento para determinação da distribuição da orientação das fibras em areia reforçada com fibras flexíveis foi apresentado por Diambra *et al.* (2007). Elaborado com base em amostras cilíndricas compactadas em laboratório, o procedimento pode ser extrapolado para amostra de qualquer formato, desde que o eixo de simetria seja conhecido, de acordo com os autores. No estudo, a distribuição das fibras não se mostrou isotrópica, tipicamente 97% das fibras ficaram dispostas a 45° da horizontal. Observaram ainda que a orientação das fibras não foi afetada pela quantidade de reforço adicionada à matriz de solo.

Através de ensaios do tipo ring shear, realizados em amostras de areia reforçadas com fibras de polipropileno aleatoriamente distribuídas e não-reforçadas, Consoli *et al.* (2007-a) investigaram o comportamento das misturas a elevadas deformações, examinando o efeito do comprimento das fibras, da quantidade de fibras, da tensão normal efetiva e da densidade relativa das amostras. Os efeitos do reforço mostraram-se mais pronunciados para as fibras mais longas, para as maiores quantidades de fibra e para os compósitos mais densos. Nas amostras do estudo, o ganho de resistência proporcionado pelas fibras não sofreu redução, mesmo a deformações cisalhantes muito elevadas, superiores a 3000%. As fibras foram exumadas após os ensaios e foi descoberto que sofreram alongamento e ruptura para todas tensões normais e para todos comprimentos iniciais de fibras estudados e, também, que o desempenho das fibras depende do deslocamento cisalhante ocorrido.

Sob diferentes trajetórias de tensões, convencional,  $p'$  constante e descarregamento lateral, considerando tensões efetivas entre 20 e 680kPa, Consoli *et al.* (2007-b) realizaram ensaios triaxiais drenados em amostras de areia reforçada por fibras de polipropileno aleatoriamente distribuídas. Os autores demonstraram que a envoltória de ruptura e, conseqüentemente, os parâmetros de resistência da areia reforçada são independentes da trajetória de tensão aplicada nos ensaios triaxiais. A envoltória de ruptura do compósito foi ajustada de forma bi-linear e não foi verificada a ruptura das fibras, apenas o alongamento.

Pinto (2008) avaliou a influência na adição, em matrizes de solo, de fibras vegetais (curauá e sisal) com comprimentos de 25 e 35 mm, adicionados em 0,5% e 1%, além da adição de 4 e 6% de cimento, em peso de solo. Sob carregamento estático, foram moldados e extraídos espécimes cilíndricos (50x100mm). Ensaio de absorção d'água, de compressão simples e diametral avaliaram a durabilidade e resistência dos compósitos. Os resultados dos experimentos, após a compilação e análise demonstraram que os métodos de estabilização, utilizadas nesta pesquisa, interagem e se complementam. A estabilização química permitiu o enrijecimento e acréscimo na resistência dos compósitos. A estabilização mecânica conduziu a espécimes de menor porosidade, permitindo uma melhor interação entre fibra/matriz. Por fim, a estabilização física proporcionou o enrijecimento da matriz de solo, observado pelo acréscimo de resistência em pequenas deformações, além do aumento na capacidade de absorção de energia pós-fissuração, impedindo a ruptura frágil comum em matrizes sem fibras.

Girardello (2010) estudou o comportamento mecânico de uma areia não saturada, com e sem reforço de fibras de polipropileno, através de ensaios de placa realizados em densidade relativa de 50% e 90%. A análise dos resultados dos ensaios de placa indicaram que a inclusão de fibras influencia significativamente no comportamento carga-recalque do material. O melhor resultado foi obtido para o ensaio realizado na maior densidade relativa (Dr 90%) com adição de fibras, apresentando uma mudança significativa no comportamento carga-recalque. Ensaio triaxiais também foram realizados a fim de obter os parâmetros de resistência e deformação dos materiais estudados, onde o autor pode notar que os ensaios realizados de forma não saturada, seu ângulo de atrito diminui sensivelmente em comparação com os ensaios saturados, o que se explica, segundo o autor, pelo surgimento de um intercepto coesivo, que confere ao solo maior capacidade de suporte, pois neste caso, soma-se a resistência devido a sucção do material.

A seguir são apresentadas, resumidamente, as conclusões obtidas por diversos pesquisadores a respeito da influência dos principais fatores mencionados anteriormente no comportamento de solos reforçados. Alguns aspectos apresentaram resultados antagônicos, dependendo diretamente do tipo de fibra utilizada.

- *Teor de fibra*: quanto maior o teor de fibra, maior é o acréscimo de resistência mecânica, até um certo limite, a partir do qual este efeito não é mais observado (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986; McGown *et al.*, 1988; Maher & Ho, 1994; Ulbrich, 1997; Specht, 2000; Santoni *et al.*, 2001; Vendruscolo, 2003).
- *Comprimento da fibra*: quanto maior o comprimento da fibra maior é o ganho de resistência mecânica, até certo limite (Gray & Ohashi, 1983; Ulbrich, 1997; Santoni *et al.*; 2001; Heineck, 2002; Vendruscolo, 2003); o aumento do comprimento da fibra provoca aumento da capacidade de absorção de energia (Ulbrich, 1997; Montardo *et al.*, 2002).
- *Orientação das fibras*: os elementos de reforço devem estar posicionados na direção das deformações de tração do solo (McGown *et al.*, 1978; Morel & Gourc, 1997; Fatani *et al.*, 1991); fibras distribuídas aleatoriamente mantém a resistência isotrópica, não sendo observados planos potenciais de fragilidade (Gray & Al-Refeai, 1986; Gray & Maher, 1989).
- *Rugosidade*: as fibras devem estar bem aderidas à matriz do compósito para que a sua resistência à tração seja mobilizada (Taylor, 1994).
- *Módulo de elasticidade da fibra*: fibras com módulo de elasticidade baixo comportam-se como reforços idealmente extensíveis (Gray & Ohashi, 1983; Specht, 2000); e não contribuem para o aumento da resistência mecânica (Montardo, 1999; Specht, 2000).
- *Tensão confinante*: foi verificada uma tensão de confinamento crítica onde, abaixo desta, os elementos de reforço são arrancados (Gray & Ohashi, 1983; Teodoro, 1999; Morel & Gourc, 1997; 2001; Heineck, 2002). A tensão confinante crítica é sensível a alguns parâmetros do compósito solo-fibra como índice de aspecto das fibras ( $l/d$ ), coeficiente de uniformidade e forma das partículas do solo (Gray & Maher, 1989).

### 3.6 ALTERAÇÕES NA PROPRIEDADE DOS SOLOS PELA INCLUSÃO DE FIBRAS

Diversos autores já relataram em seus trabalhos algumas mudanças que ocorrem no comportamento mecânico dos solos reforçados com fibras. Estas mudanças são relacionadas à compactação, resistência, deformabilidade, modo de ruptura, variação volumétrica, rigidez inicial e condutividade hidráulica. A seguir são descritas alterações que ocorrem no solo devido à inclusão de fibras.

- Compactação

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

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

Bueno *et al.* (1996) observaram o mesmo comportamento com relação à umidade para um solo arenoso, ao contrário do solo argiloso, onde não foi observada nenhuma alteração na umidade ótima. Em ambos os casos, a massa específica máxima não sofreu alterações com a inclusão de fibras.

Vários outros autores relataram também não ter encontrado alteração significativa com a inclusão de fibras (e.g. Maher e Ho, 1994; Ulbrich, 1997; Consoli *et al.*, 1999; Heineck, 2002).

- Resistência ao Cisalhamento de Pico

Em geral, as fibras inibem a amplitude das fissuras associadas à ruptura do compósito. Este fato leva a um aumento nas áreas sob as curvas tensão-deformação. Essa propriedade é comumente referida como tenacidade, e representa o trabalho da fratura ou a capacidade de absorção de energia do compósito.

Estudos comparativos entre um material granular e um coesivo realizado por Bueno *et al.* (1996) mostraram que os solos coesivos são menos sensíveis ao aumento do comprimento das fibras. Análises baseadas em ensaios triaxiais revelaram um acréscimo no ângulo de atrito com a adição do reforço, sendo este maior quanto maior for a quantidade de fibras.

Ranjan & Charan (1996) observaram que a curva tensão-deformação de uma areia fina reforçada exibia tendência de crescimento mesmo a deformações axiais de ordem de 20%. Teodoro (1999) observou um aumento na resistência de uma areia siltosa reforçada com o aumento do comprimento das fibras de polipropileno de 0 para 30mm, comportamento este distinto do solo argiloso, que apresentou um máximo de resistência para fibras de 15mm.

O estudo realizado por Maher e Gray (1990), utilizando duas composições de bolas de vidro em lugar do solo, ambas com granulometrias uniformes, porém diferentes diâmetros médios das partículas, mostrou que o aumento do tamanho das partículas ( $D_{50} = 0,25\text{mm}$  para  $0,6\text{mm}$ ) não alterou a tensão de confinamento crítica, mas diminuiu a contribuição das fibras para a resistência.

Acréscimos na resistência pela inclusão de fibras ao solo foram relatados por vários autores. Alguns constataram um aumento da resistência de forma linear com o aumento da quantidade de reforço (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986), por outro lado, outros constataram um aumento não linear (Jewell & Wroth, 1987; Teodoro, 1999).

Montardo (1999) relatou o aumento do ângulo de atrito interno de uma areia uniforme com e sem cimentação artificial, reforçada com diferentes tipos de fibras. Com relação ao intercepto coesivo, o autor somente encontrou um aumento para a areia não cimentada reforçada com fibras de polipropileno.

O aumento do ângulo de atrito e do intercepto coesivo com a inclusão de fibras e com o aumento do teor de fibras também foi relatado por diversos pesquisadores (Hoare, 1979; Gray

& Ohashi, 1983; Bueno *et al.*, 1996). Porém, Teodoro (1999) observou somente o aumento da parcela coesiva de uma areia siltosa reforçada, sem alterações significativas no ângulo de atrito. Por outro lado, Heineck (2002) constatou uma bi-linearidade na envoltória de ruptura de uma areia siltosa reforçada com fibras. A parte inicial da envoltória possui um intercepto coesivo praticamente inexistente e um ângulo de atrito que supera o dobro do valor correspondente ao solo sem reforço. Já na segunda parte da envoltória, acima da tensão confinante crítica, o ângulo de atrito é semelhante ao do solo sem reforço, entretanto, houve um acréscimo razoável do intercepto coesivo.

Segundo Vendruscolo (2003), as fibras possuem a característica de conferir um intercepto coesivo ao solo arenoso, além de proporcionarem um aumento do ângulo de atrito; já para o solo cimentado, as fibras têm uma influência maior sobre a coesão última e o ângulo de atrito último.

Montardo (1999) e Consoli *et al.* (2002) constataram o aumento do ângulo de atrito de uma areia uniforme cimentada e não cimentada reforçada com vários tipos de fibra. Acréscimos da coesão somente foram verificados para a areia não cimentada reforçada com fibras. Resultados semelhantes também foram obtidos por Heineck (2002) para uma areia reforçada com fibras. Não foi constatada pelos autores a existência de uma tensão de confinamento crítica para estes materiais. Para Specht *et al.* (2002), a alteração dos parâmetros de resistência depende das características do reforço. Os autores observaram que para uma areia siltosa cimentada reforçada com fibras extensíveis não houve alteração dos parâmetros de resistência, por outro lado, considerando fibras inextensíveis, houve um leve aumento da coesão e do ângulo de atrito da areia siltosa cimentada reforçada com as fibras mais rígidas.

Outro ponto comum em termos de resistência observado por vários autores ao estudarem um solo granular reforçado foi a bi-linearidade das envoltórias de resistência (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986; Maher & Gray, 1990; Morel & Gourc, 1997; Zornberg, 2002). Gray & Al Refeai (1986) observaram ainda que quanto menor for a rugosidade ou aderência da interface solo-fibra, maior é a tensão de confinamento crítica. Fibras mais rugosas tendem a ser mais efetivas no aumento da resistência.

Com relação à granulometria do solo, Stauffer & Holtz (1996) realizaram vários ensaios triaxiais em duas areias reforçadas com distribuições granulométricas distintas, uma bem

graduada e uma uniforme, porém com mesmo diâmetro médio ( $D_{50}$ ) dos grãos do solo. Os autores observaram um aumento maior de resistência na areia bem graduada com a adição de fibras. A forma das partículas também é um fator que influencia na resistência do solo reforçado com fibras (Gray & Maher, 1989). A contribuição das fibras na resistência diminui com o aumento do índice de esfericidade das partículas, ou seja, partículas de solo mais arredondadas prejudicam a eficiência do reforço.

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

Sob diferentes trajetórias de tensões, Consoli *et al.* (2007-b) realizaram ensaios triaxiais drenados em amostras de areia reforçada por fibras de polipropileno aleatoriamente distribuídas. Os autores demonstraram que a envoltória de ruptura e, conseqüentemente, os parâmetros de resistência do material reforçado são independentes da trajetória de tensão aplicada nos ensaios triaxiais. A envoltória de ruptura do compósito foi ajustada de forma bi-linear e não foi verificada a ruptura das fibras, apenas o alongamento.

- Resistência ao Cisalhamento Pós-Pico

Praticamente todos os trabalhos que analisaram o comportamento de solos reforçados em termos da resistência concluíram que a adição de fibras reduz a queda da resistência pós-pico (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986; Fatani *et al.*, 1991; Ranjan *et al.*, 1996; Consoli *et al.*; 1997, 1999; Donato *et al.*, 2004; Casagrande *et al.*, 2006; Consoli *et al.*, 2007a).

- Deformabilidade

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

McGown *et al.* (1988), para areias e Maher & Ho (1994), para argilas, relataram um aumento no módulo de deformabilidade, tanto maior quanto maior o teor de fibras.



Contrariamente, Ulbrich (1997) e Consoli *et al.* (1999) obtiveram redução do módulo de deformabilidade com a inclusão de fibras, para areias cimentadas e não cimentadas.

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

Para Heineck (2002) e Heineck *et al.* (2003-a), a taxa de deformação onde as fibras passam a contribuir de forma mais significativa para o acréscimo de resistência ao cisalhamento depende do tipo de matriz.

Resultados de módulo de resiliência realizados por Donato *et al.* (2004) permitiram verificar a grande importância da inclusão de fibras sobre a deformabilidade resiliente, onde o módulo é reduzido em 65%.

- Modo de Ruptura

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

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

Montardo (1999) concluiu que a inclusão de fibras de polipropileno no compósito de matriz cimentada altera significativamente o seu modo de ruptura. Com a inclusão das fibras o comportamento do material na ruptura, que era frágil, torna-se dúctil. Estas constatações resultaram da análise dos índices de fragilidade e da verificação visual da ausência ou

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

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

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

Uma mudança significativa quanto ao modo de ruptura foi verificado por Donato *et al.* (2004), onde todas as amostras cimentadas não reforçadas estudadas exibiram um comportamento frágil na ruptura, enquanto que as amostras reforçadas com 0,5% de fibras de polipropileno apresentaram uma fragilidade menos pronunciada, mudando o comportamento de frágil para dúctil.

#### ▪ Variação Volumétrica

A adição de fibras aumenta as deformações volumétricas de compressão na ruptura, segundo relatos de Stauffer & Holtz (1996), sendo este aumento mais pronunciado para uma areia uniforme do que para uma areia bem graduada, ambas com mesmo diâmetro médio ( $D_{50}$ ).

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

Consoli *et al.* (2005-b), através de ensaios de compressão isotrópica, verificaram que a inclusão de fibras afeta significativamente o comportamento compressivo de uma areia, modificando a localização da Linha Isotrópica de Compressão do material. De acordo com os autores, quando o material reforçado é submetido à compressão isotrópica, o movimento relativo dos grãos sob altas tensões conduz as fibras a sofrerem deformações plásticas de tração, onde estas se alongam em primeira instância, podendo inclusive atingirem a ruptura.

- Rigidez Inicial

McGown *et al.* (1988), para areias, Maher & Ho (1994) e Nataraj *et al.* (1996), para argilas, relataram aumento no módulo de deformação, tanto maior quanto maior o teor de fibras. Contrariamente, Ulbrich (1997) e Consoli *et al.* (1999) obtiveram redução do módulo com a inclusão de fibras. Montardo (1999) observou uma queda bastante acentuada da rigidez inicial de uma areia cimentada reforçada com fibras de polipropileno. No entanto, as fibras de polietileno tereftalato e de vidro não causaram alteração alguma no módulo.

Portanto, o efeito do reforço fibroso na rigidez inicial do compósito depende das características do mesmo. Michalowski & Cermák (2003) observaram que a adição de uma fibra sintética em um solo arenoso causou uma queda da rigidez inicial, por outro lado, a adição de fibras de aço aumentou a rigidez inicial. Para Feuerharmel (2000) a intensidade das alterações no módulo de elasticidade depende também do tipo e das características de cada solo. Estudos realizados pelo autor em argila e areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno indicaram grande redução do módulo, enquanto que, os resultados de ensaios realizados em areia reforçada mostraram pequenas alterações. Entretanto, considerando misturas cimentadas reforçadas com fibras, as reduções do módulo foram bastante acentuadas para os três solos analisados.

Os resultados de ensaios dinâmicos utilizando bender elements realizados por Heineck (2002) não indicaram alteração do  $G_0$  do solo arenoso quando da inclusão das fibras. Os módulos de deformação cisalhante de três diferentes materiais, areia siltosa, areia fina uniforme e cinza de fundo, a pequeníssimas deformações, de acordo com Heineck *et al.* (2005), não foram afetados pela introdução de fibras de polipropileno.

#### ▪ Condutividade Hidráulica e Outras Propriedades

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

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

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

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

Segundo Heineck (2002) e Heineck *et al.* (2003-b), para todas as matrizes estudadas, a adição de 0,5% de fibras de polipropileno de 24 mm não causou mudanças significativas na condutividade hidráulica avaliada.

## **4 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

O programa experimental estabelecido tem como objetivo principal investigar e identificar o efeito da inclusão de fibras de curauá e sisal nas propriedades mecânicas de um solo granular fino. Serão descritos os materiais utilizados, a preparação das amostras, os detalhes relevantes da execução dos ensaios e os equipamentos.

### **4.1 VARIÁVEIS INVESTIGADAS**

Todos os ensaios de compressão triaxial foram realizados na matriz arenosa, reforçada ou não com fibras, e baseados na variação da tensão efetiva média inicial (20, 100, 200 e 400kPa) em ensaios do tipo CID, consolidados isotropicamente e drenados. A determinação das variáveis fixas foi baseada nos valores que apresentaram melhor desempenho em estudos anteriores (Montardo, 1999; Specht, 2000; Casagrande 2005; Heineck, 2002; Vendruscolo, 2003; Santos, 2004, Donato, 2007 e Festugato 2008).

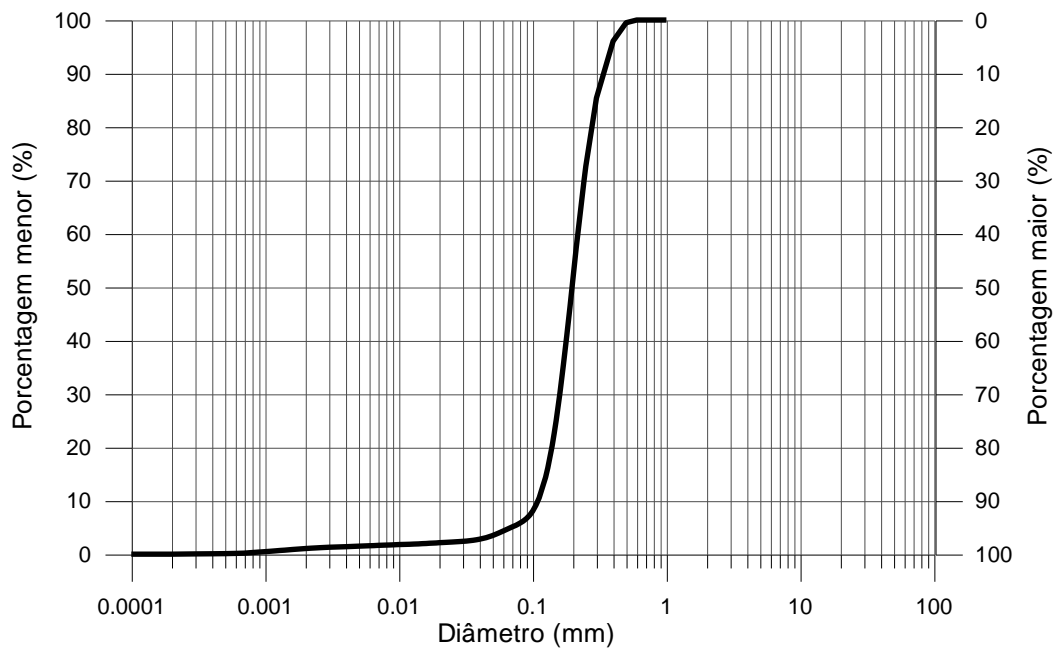
O teor de fibra foi mantido fixo em 0,5% em relação à massa de solo seco. Também foram mantidos fixos a velocidade de carregamento, de 0,015mm/min, e os parâmetros de compactação das amostras, peso específico aparente seco de 15kN/m<sup>3</sup> e umidade de 10%, e densidades relativas ( $D_r$ ) de 50% e 90%. Os parâmetros de compactação da areia, umidade de moldagem de 10 % e peso específico aparente seco de 15,9kN/m<sup>3</sup>, equivalentes a uma densidade relativa de 70%, foram obtidos por Vendruscolo (2003) através de ensaios de compactação com energia Proctor Normal, segundo a NBR 7182, ABNT 1984.

### **4.2 MATERIAIS**

#### **4.2.1 Areia**

A areia utilizada no trabalho provém de uma jazida localizada no município de Osório – RS. O material caracteriza-se por ser uma areia fina (NBR 6502 – ABNT, 1995; ASTM D 2487, 1993), limpa e de granulometria uniforme. Segundo Spinelli (1999), o quartzo é o material correspondente a 99% da sua composição mineralógica, sendo o restante composto por glauconita, ilmenita, turmalina e magnetita. A presença de matéria orgânica não é observada. A curva granulométrica do material, Figura 4.1, é determinada, por peneiramento, no Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental LEGG/ENVIRONGEO

e complementada, por processos a laser, no Laboratório de Materiais Cerâmicos LACER. Ambos os laboratórios são da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.



**Figura 4.1:** Curva granulométrica da areia de Osório (laser).

Os índices físicos do material são determinados e apresentados na Tabela IV.1.

**Tabela IV.1:** Índices físicos da areia de Osório.

Índices Físicos	Areia de Osório
Massa específica real dos grãos ( $\gamma_s$ )	26,2kN/m <sup>3</sup>
Coeficiente de uniformidade, $C_u$	2,0
Coeficiente de curvatura, $C_c$	1,1
Diâmetro efetivo, $D_{10}$	0,11mm
Diâmetro médio, $D_{50}$	0,20mm
Índice de vazios mínimo, $e_{mínimo}$	0,6
Índice de vazios máximo, $e_{máximo}$	0,9

## 4.2.2 Fibras

As fibras utilizadas como elemento de reforço foram fibras de curauá (*Ananás erectifolius*) e de sisal (*agave sisalana*) no estado natural e tratadas com soluções de EPS (poliestireno expandido) e CAP (cimento asfáltico de petróleo). Estas fibras foram adquiridas na forma de fios e cortadas nos comprimentos 24, 36 e 50mm. As fibras de curauá foram gentilmente cedidas pela empresa Pematec Triangel do Brasil, da cidade de Santarém/PA e as fibras de sisal foram compradas da empresa Sisaex Indústria Comércio e Exportação LTDA, Conceição do Coité/BA. Estas fibras vegetais foram escolhidas por apresentarem boas propriedades mecânicas e pela necessidade de novas matérias-primas provenientes de fontes renováveis, que possam substituir com sucesso as fibras sintéticas. A utilização de fibras vegetais, além de garantir a confecção de um produto ecologicamente correto, pode garantir uma nova alternativa de renda para agricultores das regiões produtoras quando produzidas em escala industrial.

## 4.2.3 Água

Água destilada é utilizada na preparação das amostras e na realização dos ensaios.

## 4.2.4 Impermeabilizantes

As fibras de curauá e de sisal foram modificadas superficialmente pelas soluções de poliestireno expandido (EPS) e cimento asfáltico de petróleo (CAP).

## 4.3 MÉTODOS

### 4.3.1 Caracterização Química das Fibras de Curauá e de Sisal (*in natura*)

#### Determinação do Teor de Umidade

A determinação do teor de umidade das fibras de sisal e de curauá foi realizada de acordo com a norma ABNT – NBR 9656, 1986.

Em um pesa-filtro previamente tarado, foram adicionadas amostras de cerca 1,0g de fibras ( $m_1$ ). Esse conjunto foi levado à estufa a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  por 4h. Em seguida, o pesa-filtro contendo a amostra de sisal foi transferido para um dessecador e após resfriamento pesou-se a

massa do sisal ( $m_2$ ). O sistema foi levado novamente para a estufa até que não houvesse variação de massa. Esse procedimento foi realizado em triplicata.

O teor de umidade da amostra foi calculado pela diferença de massas inicial e final de acordo com a Equação 4.1:

$$\%Umidade = \left[ \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \right] \times 100 \quad (4.1)$$

Onde:  $m_1$  = massa (g) da amostra de fibra úmida;  
 $m_2$  = massa (g) da amostra de fibra seca.

#### Determinação do Teor de Cinzas

O teor de cinzas das fibras de curauá e de sisal foi determinado pela norma TAPPI T211 om-85, 1991.

Foram adicionadas amostras de aproximadamente 1,0g de fibra seca em cadinhos previamente calcinados a  $600 \pm 5^\circ\text{C}$  por 1h. As amostras foram previamente carbonizadas no cadinho com bico de Bunsen até ausência de chama. Os cadinhos com as fibras carbonizadas foram levadas à mufla (Quimis) sob isoterma de  $600 \pm 5^\circ\text{C}$  por um período de 3h. Após resfriamento em dessecador com sílica gel as amostras foram pesadas em uma balança semi-analítica. Este procedimento foi realizado em triplicata.

O teor de cinzas das amostras foi determinado pela razão entre as massas final e inicial, de acordo com a Equação 4.2, seguido por média aritmética das 3 medidas:

$$\%Cinzas = \left( \frac{m_1}{m_2} \right) \times 100 \quad (4.2)$$

Onde:  $m_1$  = massa (g) de cinzas;  
 $m_2$  = massa (g) da amostra de fibra seca;

#### Determinação do Teor de Extrativos Solúveis em Água

O teor de extrativos solúveis em água foi determinado pela norma TAPPI T212 om-98.

Em um béquer, com 100mL de água destilada, foi adicionada uma amostra de fibras secas de aproximadamente 5,0g e sendo o sistema submetido à agitação mecânica a  $70 \pm 5^\circ\text{C}$



por 1h. A metodologia foi repetida trocando-se a água do sistema. Após período de extração esta amostra foi levada à estufa a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  por um período de 3h. Com posterior resfriamento em dessecador com sílica gel a amostra foi pesada em uma balança semi-analítica. O procedimento foi repetido até que não ocorressem variações de massa.

O teor de extrativos solúveis em água a  $70^\circ\text{C}$  foi calculado de acordo com a Equação 4.3, seguido por média aritmética de 3 medições:

$$\% \text{Ext.}H_2O = \left[ \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \right] \times 100 \quad (4.3)$$

Onde:  $m_1$  = massa (g) da amostra de fibra seca antes da extração;

$m_2$  = massa (g) da amostra de fibra seca após a extração .

#### Determinação do teor de extrativos Solúveis em Etanol/Ciclohexano

O teor de extrativos solúveis em solventes orgânicos (etanol/ciclohexano) foi determinado pela norma TAPPI T207 om-93.

Foram pesadas amostras de aproximadamente 1,0g de fibras secas as quais foram submetidas a um processo de extração em sistema Soxhlet. Foi utilizada uma mistura extratora de etanol P.A. (Vetec Química Fina Ltda) e ciclohexano P.A. (Vetec Química Fina Ltda) na proporção de 1:1 (v/v). O período de extração foi de 48 horas. Em seguida a amostra das fibras foi retirada do extrator e levada à estufa a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  por um período de 3h. Com subsequente resfriamento até massa constante em dessecador com sílica gel o percentual de extrativos solúveis em etanol/ciclohexano foi calculado, de acordo com a Equação 4.4, após pesagem em uma balança semi-analítica seguido por média aritmética de 3 medições:

$$\% \text{Ext.}_{\text{etanol/ciclohexano}} = \left[ \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \right] \times 100 \quad (4.4)$$

Onde:  $m_1$  = massa (g) da amostra de fibra seca antes da extração;

$m_2$  = massa (g) da amostra de fibra seca após a extração.

#### Determinação do Teor de Lignina Klason Insolúvel

O teor de lignina Klason insolúvel foi determinado pelo método TAPPI T13 m-54 (1991), modificado e adaptado por Botaro (1996).

Foi pesado cerca de aproximadamente 1,0g de fibras trituradas em liquidificador industrial (Skymssen) e secas. Esta amostra foi transferida para almofariz com 15mL de ácido sulfúrico P.A.(72%) (Vetec Química Fina Ltda) sendo a mesma macerada cuidadosamente para se promover o máximo de desfibrilamento e deixada sob repouso por um período de 24 horas nesse meio ácido. Em seguida, a mistura foi transferida para um balão de 1L, o volume ajustado para 560mL com água destilada e aquecida sob refluxo por 4 horas. A lignina insolúvel foi filtrada em um funil de vidro sinterizado n°4. O filtrado foi coletado para a determinação da lignina solúvel.

A lignina insolúvel, retida no funil de vidro sinterizado, foi seca em estufa a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  por um período de 4h sendo em seguida resfriada em dessecador com sílica gel e pesada em uma balança semi-analítica até massa constante. Posteriormente, a amostra do funil de vidro sinterizado foi transferida para um cadinho sendo o mesmo levado à mufla sob isoterma de  $600 \pm 5^\circ\text{C}$  por um período de 4 horas. A amostra foi retirada e transferida para um dessecador com sílica gel, resfriada e pesada até massa constante. O teor de lignina Klason insolúvel foi determinado de acordo com a Equação 4.5 após triplicata:

$$\% \text{Lignina Klason insolúvel} = \left( \frac{m_1}{m_2} \right) \times 100 \quad (4.5)$$

Onde:  $m_1$  = massa (g) de lignina Klason insolúvel seca (massa da amostra - massa de cinzas após calcinar a  $600^\circ\text{C}$ );

$m_2$  = massa (g) da amostra de fibra seca.

#### Determinação do Teor de Lignina Klason Solúvel

O filtrado obtido na análise do teor de Lignina Klason Insolúvel foi analisado através do método de espectroscopia na região do ultravioleta. Método TAPPI T13 m-54, também modificado e adaptado por Botaro (1996).

Para a realização desse ensaio, o filtrado obtido anteriormente foi diluído com água destilada até que a concentração final de ácido sulfúrico fosse igual a 0,05mol/L. Foi preparada uma solução de referência (branco) de ácido sulfúrico 0,05mol/L, a partir da solução 72%. Foram medidas as absorvâncias nos comprimentos de onda de 215 e 285nm. Essas medidas foram feitas nessas regiões porque correspondem às regiões do espectro ultravioleta onde são observados os compostos aromáticos. A concentração de lignina Klason

solúvel foi determinada de acordo com a seguinte Equação 3.6, baseada na Lei de Lambert Beer:

$$C_{(g/L)} = \frac{[4,53 \times (A_{215} - A_{280})]}{300} \quad (4.6)$$

Onde:  $C_{(g/L)}$  = concentração em gramas/ litro de Lignina Klason insolúvel em amostras diluídas;

$A_{215}$  = valor da absorbância em 215nm;

$A_{280}$  = valor da absorbância em 280nm.

#### Determinação do Teor de $\alpha$ -celulose

O teor de  $\alpha$ -celulose foi determinado pela norma TAPPI T222 om-88. Foram pesadas amostras de aproximadamente 1,0g de fibras trituradas as quais foram transferidas para béqueres de 100mL e onde acrescentou-se solução aquosa de NaOH (Vetec Química Fina Ltda) 17,5%. O sistema foi deixado sob repouso por 2min e as fibras trituradas foram cuidadosamente maceradas por 8min.

Transcorrido este período acrescentou-se novamente 10mL da solução de NaOH 17,5% e deixou-se em repouso por 20min. Todo o procedimento foi realizado em temperatura ambiente. Em seguida foram acrescentados 40mL de água destilada e realizou-se filtração à vácuo rapidamente em funil de vidro sinterizado nº2. O resíduo foi imediatamente lavado com 200mL de água destilada, 20mL de ácido acético 20% (Vetec Química Fina Ltda) e novamente com 200mL de água destilada. O funil foi levado à estufa sob temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  por 24h. o teor de  $\alpha$ -celulose foi determinado de acordo com a Equação 4.7, seguida por média aritmética de três medições:

$$\% \alpha - \text{celulose} = \left( \frac{m_1}{m_2} \right) \times 100 \quad (4.7)$$

Onde:  $m_1$  = massa (g) de  $\alpha$ -celulose seca;

$m_2$  = massa (g) da amostra de fibra seca.

#### Determinação do teor de Holocelulose

O teor de holocelulose foi determinado pela norma TAPPI T257 om-85.

Em um erlenmeyer de 250mL foi adicionada uma amostra de aproximadamente 3,0g de fibras triruradas e secas, 120mL de água destilada, 1,0mL de ácido acético glacial (Vetec Química Fina Ltda) e 2,5g de clorito de sódio (Synth). O recipiente foi tampado e colocado sob uma chapa de aquecimento sendo a temperatura ajustada para 70°C. A mistura reacional foi mantida sob agitação constante e após 1h foram novamente adicionados 1,0mL de ácido acético glacial e 2,5g de clorito de sódio. O procedimento de adição de ácido acético glacial e clorito de sódio foi realizado por mais de uma vez totalizando três horas de agitação neste meio. Em seguida a mistura foi resfriada abaixo de 10°C em banho de gelo e filtrada em funil de vidro sinterizado nº4. A holocelulose (resíduo sólido) foi lavada com água destilada até o filtrado apresentar incolor e a água utilizada na lavagem pH neutro. Em seguida foram borrifados três volumes de metanol (Synth). O resíduo foi seco em estufa 105 ± 5°C e resfriado em dessecador com sílica gel até massa constante. O percentual de holocelulose foi obtido através da equação 4.8, após média aritmética de três medições:

$$\% \text{ holocelulose} = \left( \frac{m_1}{m_2} \right) \times 100 \quad (4.8)$$

Onde:  $m_1$  = massa (g) de holocelulose seca;

$m_2$  = massa (g) da amostra de fibra seca.

### 4.3.2 Impermeabilização das Fibras

Para diminuir a higroscopicidade das fibras vegetais e aumentar sua durabilidade, foram realizados tratamentos superficiais com solução de EPS reciclado e CAP, visando sua aplicabilidade como elemento inibidor do processo de absorção de água e do ataque microbiológico. A obtenção dos impermeabilizantes e o tratamento das fibras vegetais foram realizados no Laboratório de Materiais Poliméricos do Departamento de Química (LAMP/DEQUI) da Universidade Federal de Ouro Preto.

Utilizou-se nesta pesquisa EPS reciclado pós-consumo (reutilizado), acetona P.A. e ciclohexano P.A (Synth). O CAP (50/70) foi fornecido pela empresa paulista BetunelKock e o Percloroetileno – Fornecido pela CONTENCO.

#### Solubilização do EPS

Em um Becker de 2000mL foi realizada a mistura do EPS aos solventes. O EPS foi partido em pequenos cubos de arestas medindo entre 5 a 10cm no quantitativo de 10% em

massa e adicionado à mistura de 30% (p/v) de acetona P.A. (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO e 70% (p/v) de ciclohexano P.A. (CH<sub>2</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>4</sub>CH<sub>2</sub>). O impermeabilizante foi obtido através da mistura com o auxílio de um bastão de vidro, até que o EPS fosse completamente dissolvido.

#### Solubilização do CAP

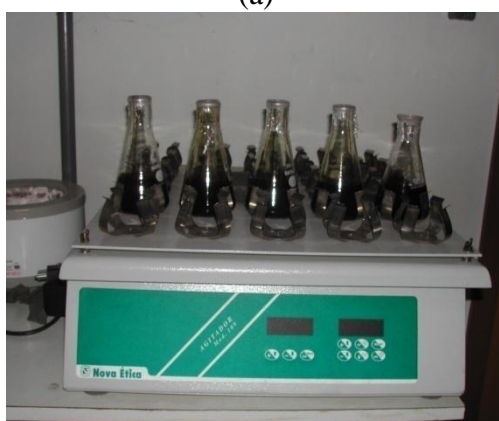
O CAP (50/70) foi adicionado a um Becker de 600mL e aquecido em estufa (Marca: FANEM – modelo: 515 C) a 150°C o tempo necessário para que se torne líquido e solubilizado em Percloroetileno.

#### Impermeabilização das Fibras

As fibras de curauá e de sisal foram modificadas superficialmente pela imersão nestas soluções e a seguir levadas ao agitador (Máquina Fisaton) durante 2 horas de agitação numa velocidade constante (Figura 4.2). A seguir, as fibras foram retiradas dos impermeabilizantes com auxílio de uma pinça metálica, e secas ao ar durante 24h. As soluções foram filtradas com auxílio de funil e papel filtro (Whatman), podendo ser reaproveitadas.



(a)



(b)

**Figura 4.2:** Impermeabilização das fibras (a) Solução de EPS e  
(b) Solução de CAP.

### Avaliação do consumo de solução de EPS e CAP

Em erlenmeyers previamente tarados, foram adicionadas soluções de EPS e de CAP ( $m_1$ ). A estes conjuntos foram adicionadas fibras de curauá e de sisal, realizando-se a impermeabilização das fibras conforme procedimento descrito acima. Após a retirada das fibras, pesaram-se novamente os conjuntos: erlenmeyers e soluções ( $m_2$ ).

O consumo de solução de EPS e de CAP para cada fibra vegetal estudada foi calculado pela diferença de massas inicial e final de acordo com a Equação 4.9:

$$\% \text{Consumo de Solução} = \left[ \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \right] \times 100 \quad (4.9)$$

Onde:  $m_1$  = massa (g) da solução antes da impermeabilização das fibras;

$m_2$  = massa (g) da solução pós consumo.

### **4.3.3 Caracterização das Fibras de Curauá e de Sisal antes e após Impermeabilização**

#### Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As micrografias obtidas por varredura eletrônica das fibras de sisal e de curauá antes e após tratamentos de impermeabilização foram realizadas em um equipamento JEOL – JSM5510, Laboratório de Microscopia e Microanálise – Departamento de Engenharia Geológica – DEGEO/UFOP. Para realização das análises, as amostras foram recobertas com vaporização de carbono (JEOL JEE 4C Evaporator).

#### Ensaio Dinâmico Mecânico (DMA)

Os ensaios de tensão *versus* deformação das fibras de sisal e de curauá foram realizados em um equipamento DMA Q800 da TA Instruments, no Laboratório de Química da UFSCar – campus Sorocaba (Figura 4.3), segundo a norma ASTM D5023. As fibras foram analisadas individualmente através do modo de flexão com clamp de garra para fibras. As condições experimentais utilizadas foram velocidade 1mm/min e temperatura 25°C. Em virtude do clamp utilizado a amostra foi submetida a uma carga inicial de 1N (força estática).



**Figura 4.3:** Equipamento de DMA da UFSCar – Sorocaba utilizado para as análises de comportamento mecânico das fibras.

#### **4.3.4 Análise Microbiológica das Fibras Naturais e Impermeabilizadas**

Para a análise da eficiência da impermeabilização das fibras de curauá e de sisal, realizaram-se ensaios microbiológicos através da avaliação da atividade celulolítica.

##### Padronização dos ensaios

Utilizou-se a espécie fúngica de referência *Trichoderma viride* QM 9414 como amostra padrão celulolítica. Definiu-se a concentração de  $10^6$  esporos/mL das culturas de trabalho a partir da amostra fúngica padrão como a mais adequada ao crescimento fúngico com atividade celulolítica detectável.

A metodologia geral utilizada para a avaliação da atividade celulolítica do controle e dos testes foi àquela indicada por Linardi (1979), complementada com método enzimático para determinação da glicose. Para adequação da referida técnica no laboratório de microbiologia da UFOP. Inicialmente utilizou-se a cepa de referência *T. viride* QM 9414 (Figura 4.4) e que, posteriormente, continuou sendo usada como controle positivo.



**Figura 4.4:** Cepa de referência *Trichoderma viride* QM 9414.

Determinação da atividade celulolítica do fungo padrão *Trichoderma viride* sobre as fibras naturais e impermeabilizadas

Os testes para avaliação da atividade celulolítica fúngica sobre as fibras vegetais estudadas foram realizados conforme a metodologia validada inicialmente com a cepa de referência e executada conforme o que se segue: A amostra de fungo selecionada foi incubada em tubos de ensaios contendo ágar batata para crescimento desejado e produção de esporos. Após incubação por 7 dias, em temperatura ambiente, foi adicionado ao tubo 10 mL de solução salina e homogeneizado no Vórtex Biomatic. Daí, retirou-se uma alíquota de 1mL e realizou-se a contagem de esporos através da câmara de Neubauer e ajuste da concentração para a concentração ideal de 106 esporos/mL.

Para realizar cada experimento, uma alíquota de 0,1mL da solução salina com esporos de cada isolado era incubado em erlenmeyers contendo 100mL de meio Mandels e Reese ao qual era acrescentada cada fibra teste na concentração 0,25g/1mL. No controle negativo não era acrescentado fungo e no controle positivo não se colocava fibra. Essas culturas eram aeradas em Incubadora tipo shaker marca Solab Scientifica durante 7 dias (Figura 4.5).





**Figura 4.5:** Ensaio em Incubadora tipo shaker - Solab Scientifica.

Os sistemas para compor controle negativo, controle positivo, o teste celulolítico A1 com a fibra sisal natural, o teste celulolítico A2 com a fibra curauá natural, os testes com as fibras tratadas: Teste B1- Sisal com EPS, Teste B2 - Sisal com CAP, Teste C1 - Curauá com EPS e o Teste C2 - Curauá com CAP foram distribuídos conforme Tabela IV.2:

**Tabela IV.2:** Sistemas para compor Controle Negativo, Positivo e os Testes Celulolíticos com as Fibras Naturais e Impermeabilizadas.

<b>Tubos</b>	<b>Água</b>	<b>Substrato</b>	<b>Extrato de Cultura Fúngica</b>
Controle Negativo	0,2mL	0,3 mL	–
Controle Positivo	0,4mL	–	0,1 mL
Teste A1 (Sisal Natural)	0,1mL	0,3 mL (0,25g/mL)	0,1 mL
Teste A2 (Curauá Natural)	0,1mL	0,3 mL (0,25g/mL)	0,1 mL
Teste B1 (Sisal com EPS)	0,1mL	0,3 mL (0,25g/mL)	0,1 mL
Teste B2 (Sisal com CAP)	0,1mL	0,3 mL (0,25g/mL)	0,1 mL
Teste C1 (Curauá com EPS)	0,1mL	0,3 mL (0,25g/mL)	0,1 mL
Teste C2 (Curauá com CAP)	0,1mL	0,3 mL (0,25g/mL)	0,1 mL

Antes desses experimentos, foram realizados testes de atividade celulolítica da espécie fúngica escolhida utilizando-se dois substratos convencionais Carboximetilcelulose e celulose para teste de validação da atividade celulolítica de um fungo e em seguida a glicose liberada é investigada:

- Carboximetilcelulose (CMC):

Foram diluídos 2 g de CMC em 80 mL de acetato de sódio 0,1 M, completados com água até o volume de 100 mL. O pH foi acertado para 5,0 com ácido acético.

- Celulose:

Foram diluídos 0,7 g de celulose em 10 mL de acetato de sódio 0,1 M, pH 5,0.

Após os sete dias das culturas compostas, de acordo com o quadro acima, os tubos eppendorf foram centrifugados novamente, durante 5 minutos, e incubados em estufa, em temperatura 37°C, sob agitação por 12h, 24 h e 48 h foram então retiradas alíquotas de 50 µl para leitura e verificação de produção de celulase, pela avaliação da glicose liberada (tabela IV.3).

**Tabela IV.3:** Glicose Produzida.

<b>Tubos</b>	<b>Amostra</b>	<b>Reagente de Cor</b>
Controle Negativo	50 µl	1,0 mL
Controle Positivo	50 µl	1,0 mL
Teste A1 (Sisal Natural)	50 µl (0,25g/mL)	1,0 mL
Teste A2 (Curauá Natural)	50 µl (0,25g/mL)	1,0 mL
Teste B1 (Sisal com EPS)	50 µl (0,25g/mL)	1,0 mL
Teste B2 (Sisal com CAP)	50 µl (0,25g/mL)	1,0 mL
Teste C1 (Curauá com EPS)	50 µl (0,25g/mL)	1,0 mL
Teste C2 (Curauá com CAP)	50 µl (0,25g/mL)	1,0 mL

### 4.3.5 Avaliação Mecânica dos Compósitos

Os compósitos constituídos de areia e fibras de 24 e 36mm de comprimento foram ensaiados no equipamento disponível no Laboratório de Geotecnia da UFOP (Figura 4.6), dotado de sistema de aquisição automática dos dados, conversor analógico-digital (datalogger), modelo HBM Spider 8 com microcomputador acoplado, sob tensões confinantes de 20 a 400kPa.



**Figura 4.6:** Equipamento utilizado nos ensaios de compressão triaxial.

A moldagem dos corpos de provas para os ensaios triaxiais foi realizada em um molde bipartido com dimensões suficientes para confecção de amostras com 50mm de diâmetro e 110mm de altura. A mistura dos materiais é iniciada com areia e fibra, seguida pela adição de água destilada, até a completa homogeneização visual. Em amostras não-reforçadas, ocorre apenas a adição de água destilada ao solo e a mistura. Para obtenção de amostras homogêneas que permitam a análise paramétrica dos resultados, a metodologia de compactação proposta por Ladd (1978) é adotada. Os critérios adotados para a aceitação dos corpos de prova em relação aos parâmetros de compactação, como peso específico aparente seco e umidade ótima, foram respectivamente de 2 % e 3 % de tolerância para mais ou para menos.

Os procedimentos gerais adotados na preparação e execução dos ensaios triaxiais seguiram os princípios descritos por Bishop & Henkel (1962), por Head (1980-a, b e c) e

pelos procedimentos de ensaio já consolidados pelos laboratórios de Mecânica dos Solos LABGEO/UFOP e PPGEC/UFRGS.

Após a colocação dos corpos de prova na câmara triaxial, inicia-se a fase de saturação das amostras. O processo de saturação, para assegurar maior dissolução das bolhas de ar, é realizado em duas etapas. Inicialmente ocorre a percolação de água, feita da base para o topo do corpo de prova. Nessa etapa, a amostra é submetida a uma tensão confinante de 20kPa para impedir o fluxo preferencial entre a mistura e a membrana. Em seguida, acontece a aplicação de contra-pressão. Estágios de incrementos são aplicados na tensão confinante e na contra-pressão, sendo a tensão efetiva mantida constante em aproximadamente 20kPa.

A garantia de saturação da amostra é monitorada através da medição do parâmetro B de Skempton (1954), que atinge valores superiores a 0,90, medido antes da fase de adensamento.

A partir daí, é aplicada a tensão confinante conforme a tensão efetiva média inicial desejada e a fase de adensamento da amostra é iniciada. No cálculo da tensão desvio, as correções de área e de membrana são aplicadas, conforme a abordagem proposta por La Rochele *et al* (1988).

A velocidade de carregamento adotada para a fase de cisalhamento foi de 0,017mm/min.

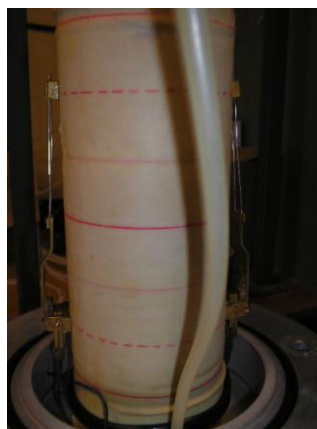
Os compósitos constituídos de areia e fibras de 50mm de comprimento foram ensaiados no equipamento contruído por Festugato (2008), no laboratório de geotecnia da UFRGS. Diferentemente das dimensões usuais e corriqueiramente empregadas nos laboratórios LABGEO/UFOP e PPGEC/UFRGS, os corpos-de-prova apresentam 100 mm de diâmetro e 200mm de altura.

Uma visão geral do equipamento e da instrumentação empregada é apresentada na Figura 4.7.



**Figura 4.7:** Sistema de compressão triaxial (Festugato, 2008).

O equipamento conta com duas interfaces ar/água para aplicação de pressão confinante e de contra-pressão. Dois reguladores de pressão, manualmente controlados, ajustam a pressão do ar, proveniente de um compressor, que incide na parte interna das membranas das interfaces. A pressão é, então, transmitida à água que as envolvem e direcionada à câmara de compressão triaxial. Dois transdutores de pressão, da marca ASHCROFT, possibilitam a medida independente dos valores de pressão confinante e de contra-pressão. A variação volumétrica é obtida através de um medidor externo do tipo Imperial College. As deformações axiais são medidas externa e internamente. Um transdutor de deslocamento linear, da marca GEFTRAN, é responsável pela medida externa, e dois sensores de efeito Hall, axial 1 e axial 2, aderidos à superfície da amostra, possibilitam a medida dos deslocamentos com elevada precisão. A Figura 4.8 mostra os sensores aderidos à amostra após a colagem.



**Figura 4.8:** Sensores de efeito Hall em funcionamento aderidos à amostra (Festugato, 2008).

O carregamento é aplicado, com taxa de deformação constante, por uma prensa WYKEHAM FARRANCE com capacidade máxima de carga de 50kN. A medida da carga imposta pelo pistão é realizada externamente através de uma célula de carga HBM, modelo S40/3t. Finalmente, a aquisição dos dados é realizada por um *data logger*, da marca NOVUS, onde toda a instrumentação é ligada. A monitoração e o gerenciamento da aquisição dos dados são feitos através do programa computacional Field Chart Novus (Festugato, 2008).

Foram realizados 62 ensaios triaxiais na matriz de areia reforçada, ou não, conforme Tabela IV.4.

**Tabela IV.4:** Programa de ensaios triaxiais.

Matriz	Fibras		Tensão Efetiva Inicial (kPa)	Total de Ensaios nas Dr 50 e 90%	
Fibra+Areia Dr 50% e Dr90%	Comprimentos das Fibras	24mm	Sisal Natural	20, 100, 200 e 400	8
			Curauá Natural	20, 100, 200 e 400	8
			Sisal com EPS	20, 100, 200 e 400	4 (Dr50%)
			Curauá com EPS	100	2
			Sisal com CAP	20, 100, 200 e 400	4 (Dr50%)
			Curauá com CAP	100	2
		36mm	Sisal Natural	20, 100, 200 e 400	8
			Curauá Natural	20, 100, 200 e 400	8
			Sisal com EPS	100	2
			Curauá com EPS	100	2
			Sisal com CAP	100	2
			Curauá com CAP	100	2
	50mm	Sisal Natural	100	1	
		Curauá Natural	100	1	
Areia Dr50% e Dr90%			20, 100, 200 e 400	8	

Os comprimentos de 24 mm e 50mm foram escolhidos para comparação dos resultados do programa experimental com os resultados de outros pesquisadores, já citados.

### **4.3.6 Medida do Comprimento das Fibras**

Para analisar as características de alongamento e ruptura, ou não, dos micro-reforços após serem solicitadas e submetidas à compressão triaxial no interior da massa de solo, ao término de cada ensaio, foram exumadas fibras das regiões do topo, intermediária e da base das amostras. Após secagem ao ar, então, 50 fibras de cada corpo-de-prova foram manualmente medidas com o uso de um paquímetro para avaliação do percentual dos comprimentos finais dos reforços.

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

### 5.1 Considerações Iniciais

Serão apresentados e analisados neste capítulo, os resultados dos ensaios de caracterização das fibras de curauá e de sisal naturais, os resultados dos ensaios de caracterização mecânica e resultados dos ensaios microbiológicos das fibras naturais e impermeabilizadas, bem como os resultados dos ensaios de compressão triaxial realizados.

Nos ensaios triaxiais, todas as amostras, como já mencionado, são cisalhadas de forma drenada, sob trajetórias de tensões convencionais. Inicialmente, o comportamento tensão-deformação do solo com e sem reforço é discutido, através das curvas de resistência em função da deformação axial e de variação volumétrica em função da deformação axial. Na seqüência são obtidos os parâmetros de resistência dos materiais estudados. É analisada, também, a deformabilidade das misturas através das curvas de módulo secante em função da deformação axial.

Para melhor compreensão do comportamento mecânico do compósito solo-fibra, quando pertinente, os resultados são comparados com o estudo realizado por Casagrande (2005) e Festugato (2008), onde ensaios triaxiais em areia reforçada com fibras de polipropileno com 3,3dtex de diâmetro e comprimentos 24mm e 50mm, respectivamente, são abordados.



## 5.2 Caracterização Química das Fibras

A Tabela V.1 apresenta algumas características das fibras de sisal e de curauá, sem tratamento, utilizadas neste trabalho.

**Tabela V.1:** Composição química das fibras estudadas.

Componentes	Fibras de curauá (%)	Fibras de sisal (%)
Umidade	7,9	9,4
Cinzas	0,9	1,2
Extrativos Solúveis em H <sub>2</sub> O a 70°C	0,8	1,4
Extrativos Solúveis em etanol/ciclohexano	0,4	1,9
Lignina Klason solúvel	0,7	0,9
Lignina Klason insolúvel	6,7	9,2
Lignina Klason total	7,4	10,1
$\alpha$ -celulose	71,2	74
Holocelulose ( $\alpha$ -celulose + hemicelulose)	83,3	86

**Nota:** Os teores apresentados referem-se a teores médios determinados em cada análise.

As condições climáticas, idade da planta e processos de digestão influenciam não somente a estrutura das fibras, mas também suas composições químicas (Gassan et al., 1999b).

Determinou-se que o teor de umidade das fibras de utilizadas neste trabalho é de 7,9% e 9,4% para as fibras de curauá e de sisal, respectivamente. Estes valores estão coerentes com os valores reportados na literatura (Gassan et al., 1999b).

Os teores de cinzas encontrados para as fibras de curauá e de sisal também estão próximos aos valores encontrados na literatura para os materiais lignocelulósicos (Santos et al., 2009; Li et al., 2000). O teor de lignina das fibras de sisal varia de 4 a 14% (Li et al., 2000). O valor encontrado neste trabalho se encontra dentro dessa faixa.

Assim como os demais constituintes da fibra, a porcentagem de extrativos solúveis na mistura etanol/cicloexano (1:1, v:v) também se encontra próximo aos valores anteriormente citados na literatura, em torno de 2 a 3% (Li et al., 2000).

Para a fibra de curauá, determinaram-se teores de lignina, celulose e hemicelulose de 7,4%, 71,2% e 12,1% respectivamente. Esses teores são próximos àqueles encontrados na literatura; para a lignina (1,0 – 7,5%), celulose (69,0 – 74,1%) e hemicelulose (9,9 – 21,1%) (Santos et al., 2009; Oliveira, 2010).

### 5.3 Caracterização Mecânica das Fibras

A análise mecânica dinâmica tem sido amplamente utilizada como uma técnica de caracterização de polímeros, por apresentar sensibilidade muito superior (em torno de três ordens de grandeza) quando comparada às técnicas convencionais. Através do DMA foi possível traçar a curva tensão *versus* deformação das fibras de curauá e de sisal e determinar suas propriedades mecânicas: módulo de elasticidade (E), resistência à tração ( $\sigma$ ) e deformação na ruptura ( $\epsilon$ ). A Tabela V.2 apresenta valores médios das propriedades mecânicas das fibras estudadas, avaliadas através do ensaio Mecânico Dinâmico, realizado no laboratório de química da UFSCar – campus Sorocaba, pelo equipamento DMAQ800-TA Instruments.

**Tabela V.2:** Propriedades mecânicas das fibras estudadas.

<b>Propriedades mecânicas</b>	<b>Fibras de curauá</b>	<b>Fibras de sisal</b>
Diâmetro médio	0,09mm	0,15mm
Módulo de elasticidade	23,0GPa	12,0GPa
Resistência à tração	605,0MPa	340,0MPa
Deformação na ruptura	2,5%	3,3%

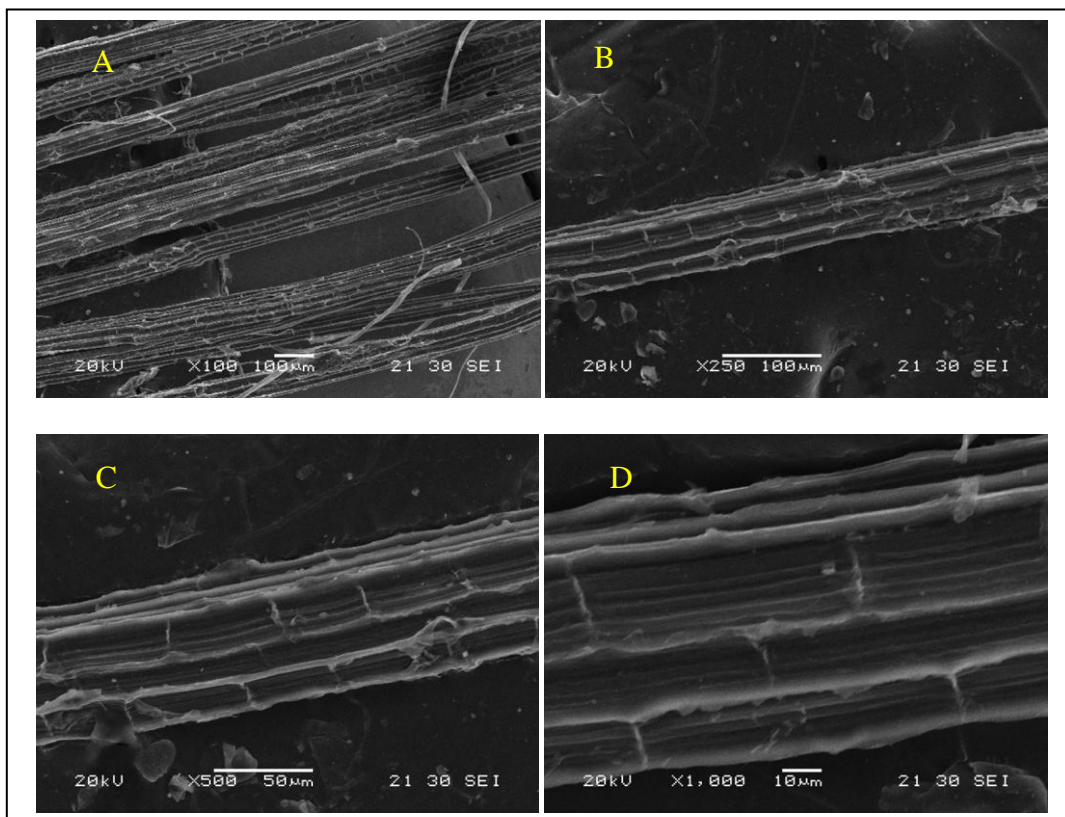
A falta de uniformidade no ângulo de atrito das microfibrilas (MFA) e outros defeitos das fibras vegetais podem influenciar nos resultados de ensaios de tração. Sucessivas falhas na hemicelulose e lignina, além da redução da MFA são responsáveis pelo comportamento visco-elástico das fibras vegetais (Spinacé et al., 2009). A fibra de curauá apresenta cerca do dobro do valor de resistência à tração e do módulo de elasticidade comparada à fibra de sisal, parâmetro

que reflete na resistência mecânica da fibra. Já a variação de deformação na ruptura não é tão significativa. Esses valores estão próximos dos valores encontrados na literatura para o módulo de elasticidade (400-618MPa e 192-336MPa), resistência à tração (15,0-23,0GPa e 9,9-11,1GPa) e deformação na ruptura (2,7-3,3% e 2,5-5,5%) para as fibras de curauá e de sisal, respectivamente. (Spinacé et al., 2009).

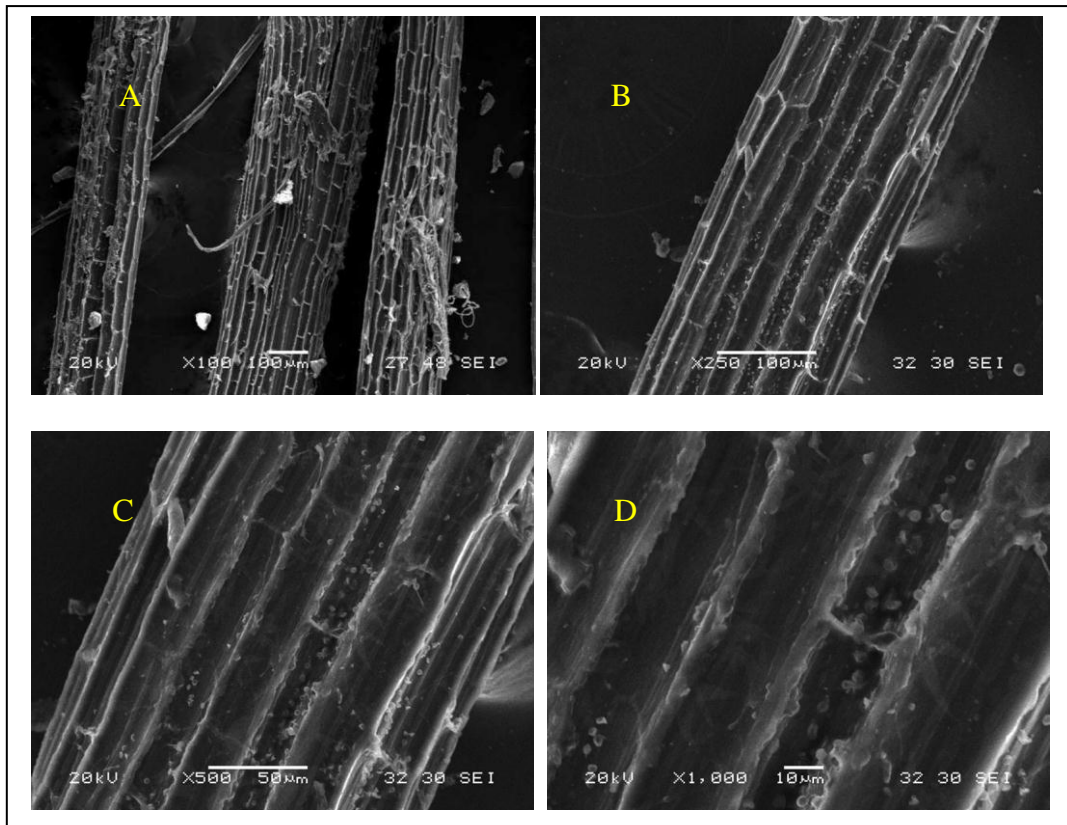
## 5.4 Caracterização das Fibras antes e após Impermeabilização

### 5.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

As figuras seguintes mostram as microscopias eletrônicas de varredura das fibras de curauá e de sisal sem tratamento e destas fibras impermeabilizadas com solução de EPS e das impermeabilizadas com CAP. Inicialmente foram realizadas as análises das fibras estudadas sem tratamento como mostrado nas Figuras 5.1 e 5.2. Pelas Figuras 5.1A e 5.2A, tem-se uma visão geral da superfície das fibras, onde se percebe a presença de células de parênquima e de resíduos provenientes do processo de beneficiamento das fibras de curauá e de sisal. Resultados semelhantes foram encontrados por Martins (2004). O mesmo pode ser visualizado com mais detalhes nas Figuras 5.1 B, C, D e 5.2B, C, D.

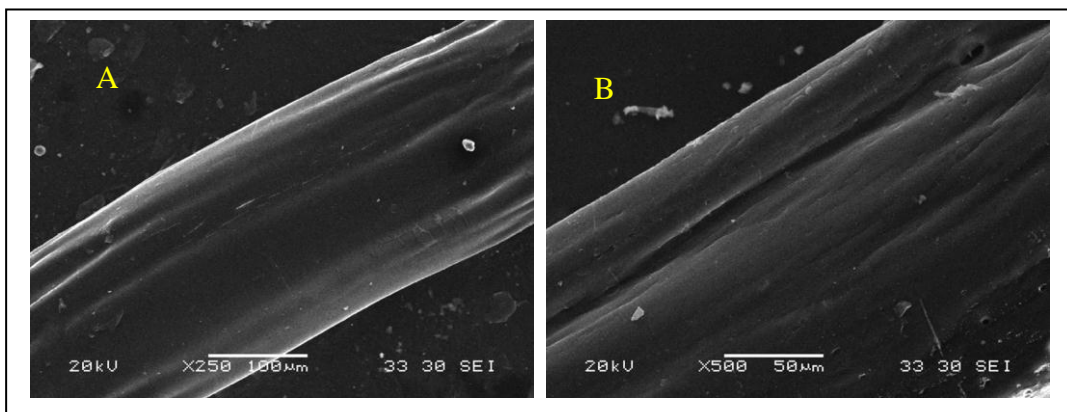


**Figura 5.1:** Micrografias obtidas por MEV das superfícies das fibras de curauá sem tratamento. Ampliações: 100x; 250x, 500x e 1000x.

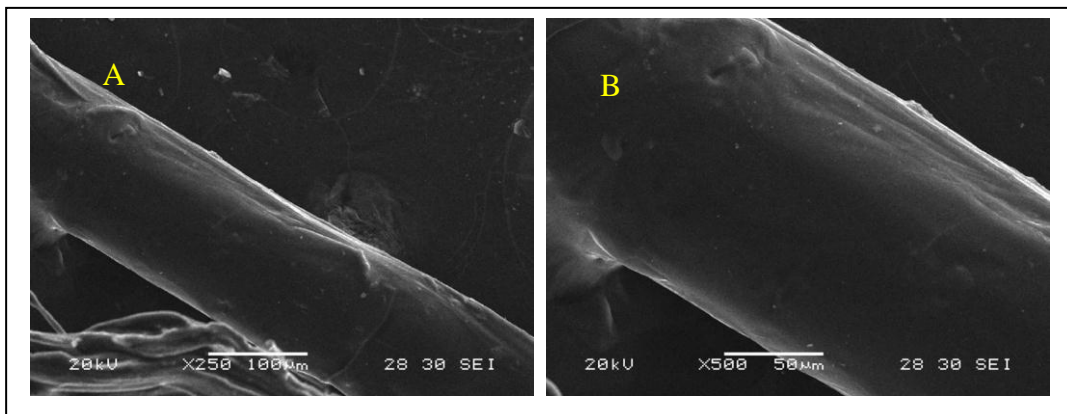


**Figura 5.2:** Micrografias obtidas por MEV das superfícies das fibras de sisal sem tratamento. Ampliações: 100x; 250x, 500x e 1000x.

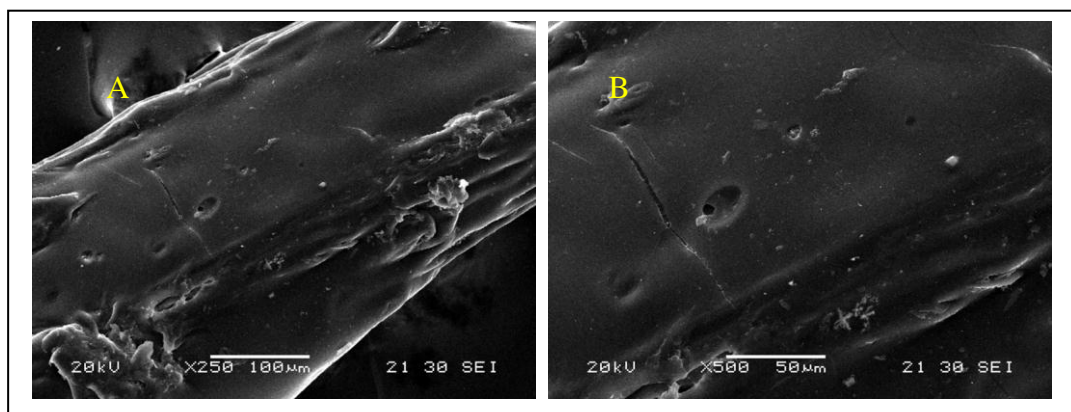
As Figuras 5.3 a 5.6 mostram as micrografias das superfícies das fibras de curauá e de sisal impermeabilizadas com EPS e CAP, respectivamente. Estas Figuras mostram a claramente a impregnação dos polímeros nas superfícies das fibras vegetais e comprovam a eficiência da impermeabilização.



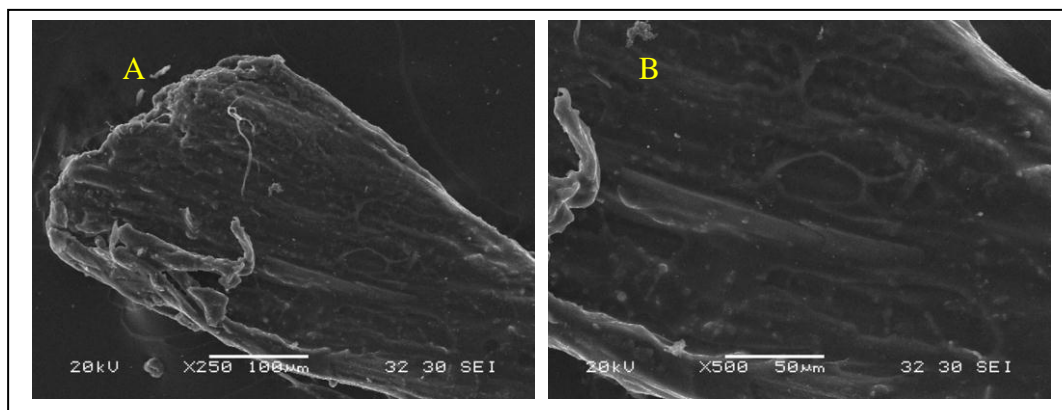
**Figura 5.3:** Micrografias obtidas por MEV das superfícies das fibras de curauá Impermeabilizadas com EPS. Ampliações: 250x e 500x.



**Figura 5.4:** Micrografias obtidas por MEV das superfícies das fibras de curauá impermeabilizadas com CAP. Ampliações: 250x e 500x.



**Figura 5.5:** Micrografias obtidas por MEV das superfícies das fibras de sisal impermeabilizadas com EPS. Ampliações: 250x e 500x.



**Figura 5.6:** Micrografias obtidas por MEV das superfícies das fibras de sisal Impermeabilizadas com CAP. Ampliações: 250x e 500x.

## 5.4.2 Avaliação da Atividade Celulolítica Fúngica sobre as Fibras

A determinação da atividade celulolítica do fungo padrão através da medida de glicose liberada foi medida em espectrofotômetro Shimadzu, modelo 1601 a 505nm. Os valores de densidade óptica dos testes com as fibras apresentados na Tabela V.3 resultam da utilização dos substratos fibra de sisal e fibra de curauá naturais e impermeabilizadas, dos testes A, B e C em 12h, 24h e 48h de incubação.

**Tabela V.3:** Valores de Densidade Óptica dos Testes Realizados.

Amostras	Atividade do Fungo Padrão		
	12h	24h	48h
Sisal Natural	1,916	1,583	1,110
Curauá Natural	1,878	1,500	1,129
Sisal com EPS	0,038	0,038	0,011
Sisal com CAP	0,012	0,002	0,001
Curauá com EPS	0,036	0,042	0,010
Curauá com CAP	0,038	0,030	0,013

Os resultados mostram que houve liberação de celulase para as fibras de curauá e de sisal sem tratamento, o que não ocorreu para as fibras impermeabilizadas, significando que estas não foram atacadas pelo fungo celulolítico. Conclui-se, portanto, o revestimento com EPS e com CAP protegeu tanto a fibra de sisal como a fibra de curauá do ataque do fungo celulolítico padrão *T. viride* QM 9414, comprovando a eficiência da impermeabilização e atestando a durabilidade das fibras vegetais impermeabilizadas.

## 5.4.3 Consumo de Solução de EPS e CAP

O consumo de massa de solução de EPS e CAP pelas fibras de curauá e de sisal foi realizado em triplicata, e seus tratamentos individuais foram transformados em média aritmética simples. Os resultados obtidos a partir destas análises estão apresentados na Tabela V.4. Observa-se que o consumo de solução de CAP é menor comparativamente ao consumo de solução de EPS, para as duas fibras estudadas. É possível verificar também, que as fibras de curauá consomem mais impermeabilizantes que as fibras de sisal. Isto se justifica pelo menor peso específico destas fibras em relação às fibras de sisal, pois, para uma mesma massa de fibras, temos mais fibras de curauá do que sisal, e portanto, maior área superficial a ser coberta pelas soluções de EPS e de CAP.

**Tabela V.4:** Massa de EPS e CAP absorvida pelas fibras.

Fibras	Solução Consumida (%)	
	EPS	CAP
Sisal	15,4	13,7
Curauá	17,2	15,6

## 5.5 Comportamento Tensão-Deformação dos Compósitos Estudados

Os resultados dos ensaios triaxiais drenados estão representados por curvas que relacionam a deformação axial ( $\epsilon_a$ ) com a tensão desviadora ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) e deformação volumétrica ( $\epsilon_v$ ). As curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios realizados para quatro níveis de tensão confinante 20, 100, 200 e 400kPa, forneceram as tensões de ruptura e tensões residuais. As envoltórias de ruptura foram obtidas a partir da análise destes resultados e fornecem os parâmetros de resistência dos compósitos.

$$p' = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2} \quad (5.1)$$

$$q = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} \quad (5.2)$$

Onde:

$\sigma'_1$  - tensão efetivas axial

$\sigma'_3$  - tensão efetiva de confinamento

A envoltória  $p'$  versus  $q$  é dada por:

$$q = a' + p' \operatorname{tg} \alpha' \quad (5.3)$$

Onde:

$a'$  e  $\alpha'$  são parâmetros efetivos da envoltória  $p'$  versus  $q$ .



A equivalência entre os parâmetros da envoltória  $p'$  versus  $q$  e os parâmetros de resistência  $c'$  (coesão efetiva) e  $\phi'$  (ângulo de atrito efetivo) da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb são dados por:

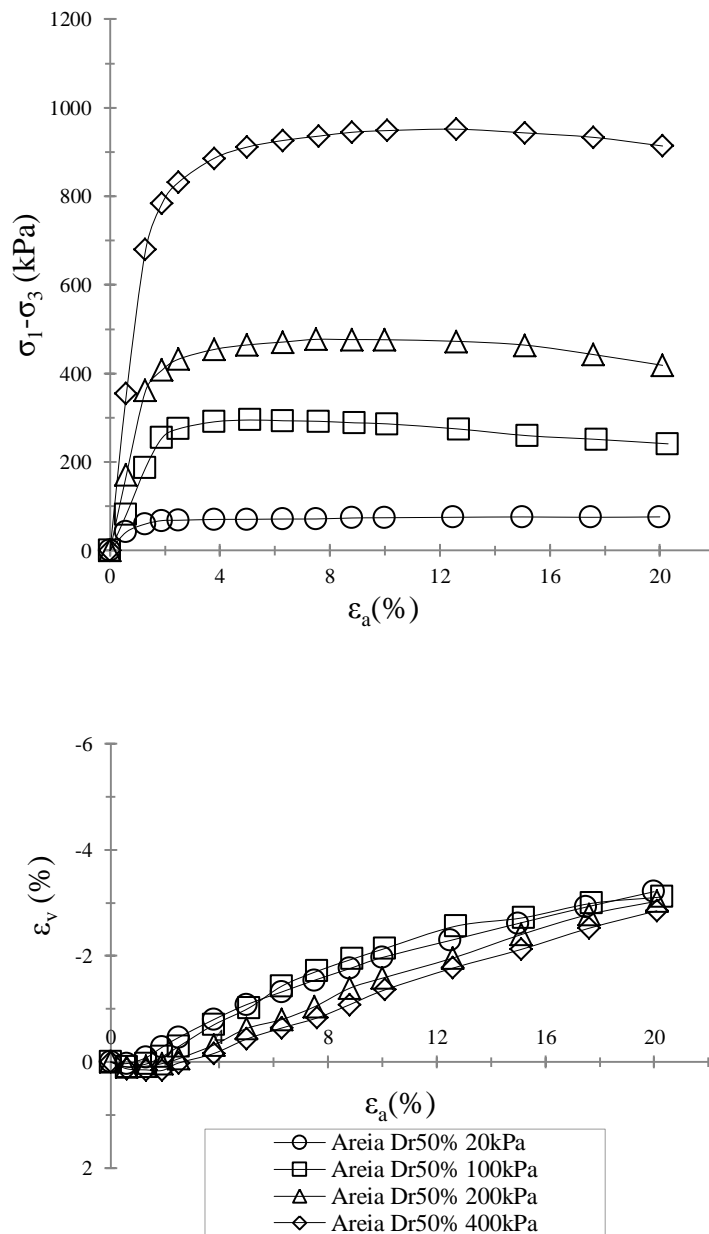
$$\text{sen}\phi' = \text{tg}\alpha' \quad (5.4)$$

$$c' = \frac{a'}{\cos\phi'} \quad (5.5)$$

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios realizados com a areia sem reforço nas densidades relativas ( $D_r$ ) de 50% e 90% e dos compósitos com fibras naturais de curauá e de sisal nos comprimentos 24mm e 36mm nas mesmas densidades. Os resultados investigados serão apresentados e analisados e comparados com a areia sem reforço e entre si.

Os resultados dos ensaios triaxiais para a areia sem reforço com densidade relativa de 50%, para as diferentes tensões confinantes efetivas, são apresentados na Figura 5.7, onde são definidas as curvas de resistência em função da deformação axial e de deformação volumétrica em função da deformação axial do material. O comportamento das amostras sem reforço, quando cisalhadas, não distingue do esperado. A resistência da areia, com densidade relativa intermediária, aumenta com o aumento da tensão confinante efetiva e não apresenta picos. É verificado o comportamento inicial compressivo seguido de expansão do solo.

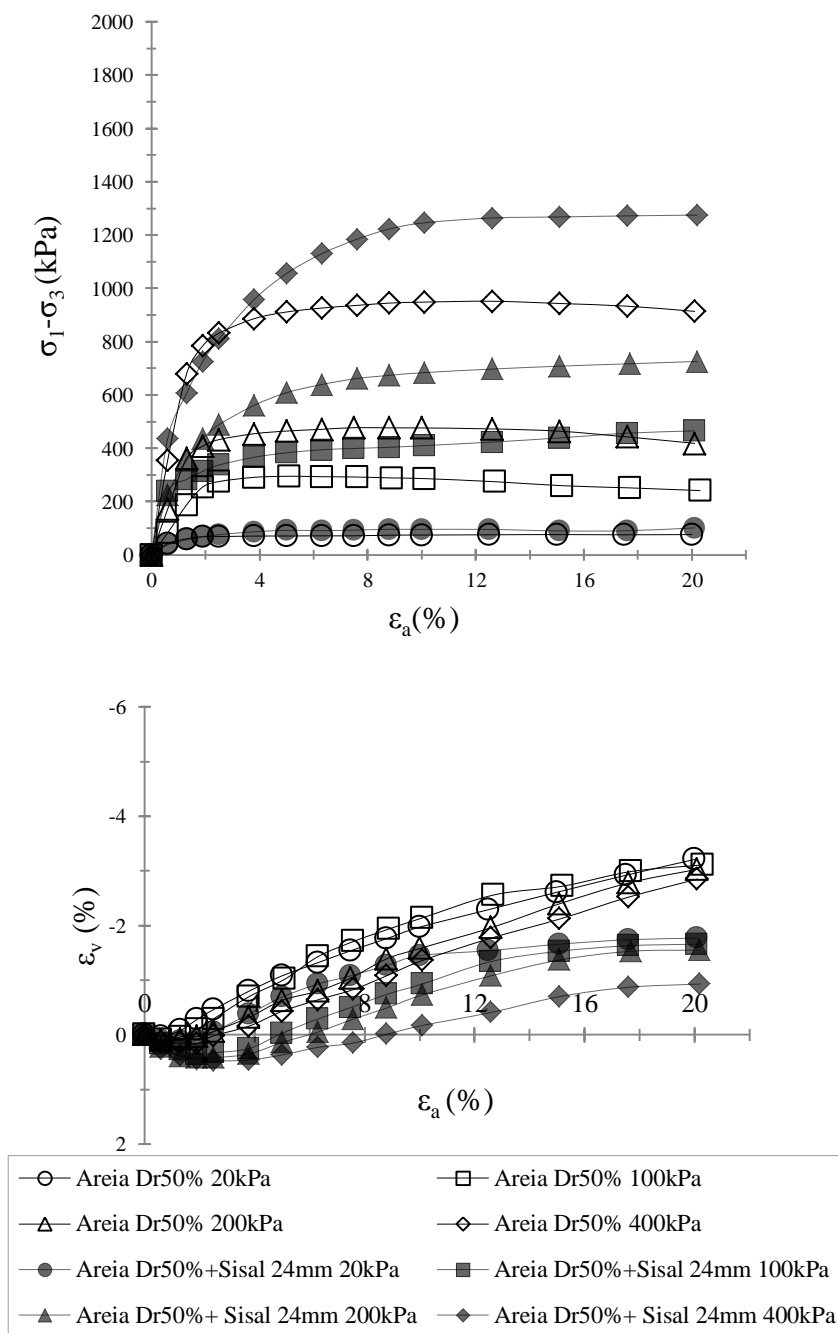




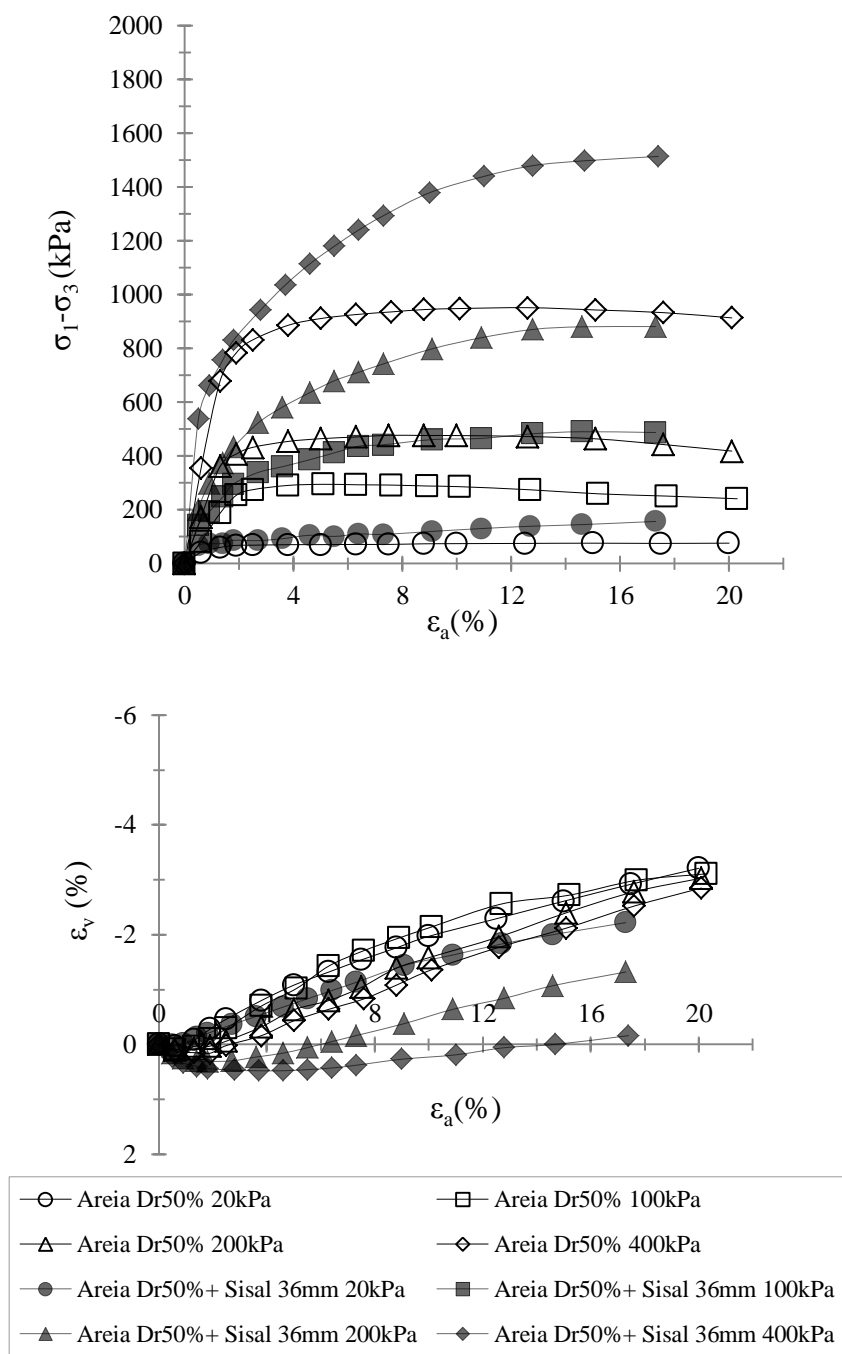
**Figura 5.7:** Curvas tensão *versus* deformação axial e deformação volumétrica *versus* deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado (Dr=50%).

Nas Figuras 5.8 a 5.11 são apresentados os resultados dos ensaios realizados em areia reforçada com fibras naturais de curauá e sisal nos comprimentos 24mm e 36mm (Dr 50%). Da mesma forma, as curvas de resistência em função da deformação axial e de deformação volumétrica em função da deformação axial do material reforçado são definidas. Em todos os casos é verificado o nítido acréscimo de resistência ao cisalhamento, sem formação de pico, em função da adição das fibras em relação ao material não reforçado. A resistência, conforme

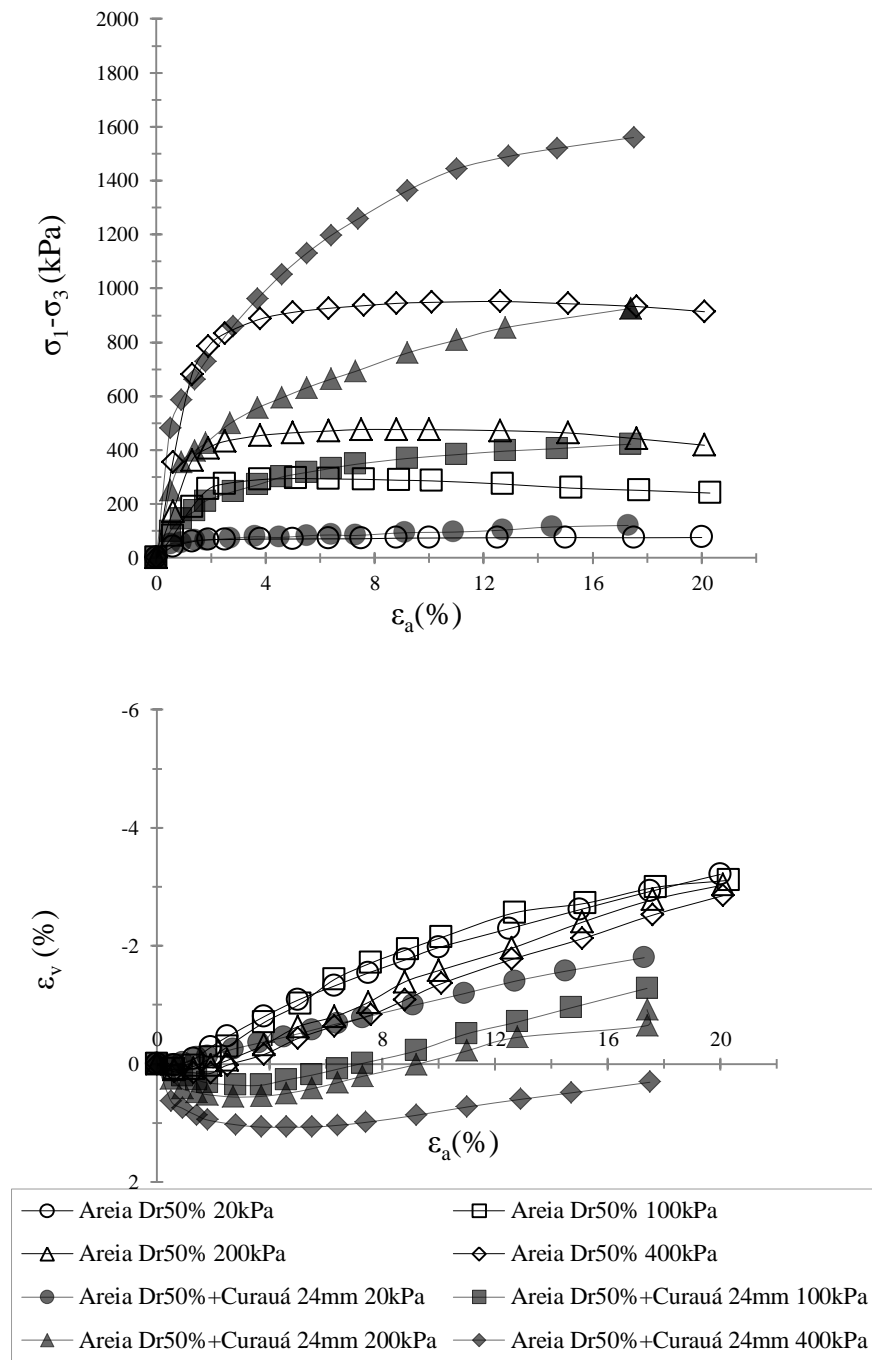
o esperado aumenta com o aumento da tensão confinante efetiva. É percebido o comportamento inicial de compressão e posterior de expansão do material reforçado, como ocorre na areia sem reforço. Os valores de deformação volumétrica indicam que as fibras conferem ao solo maior expansividade.



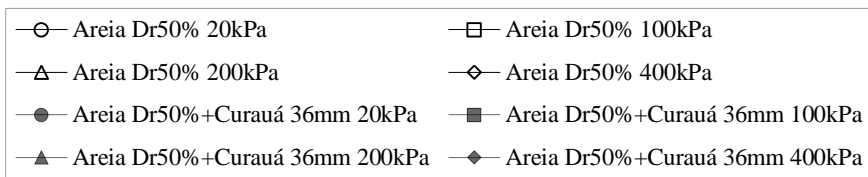
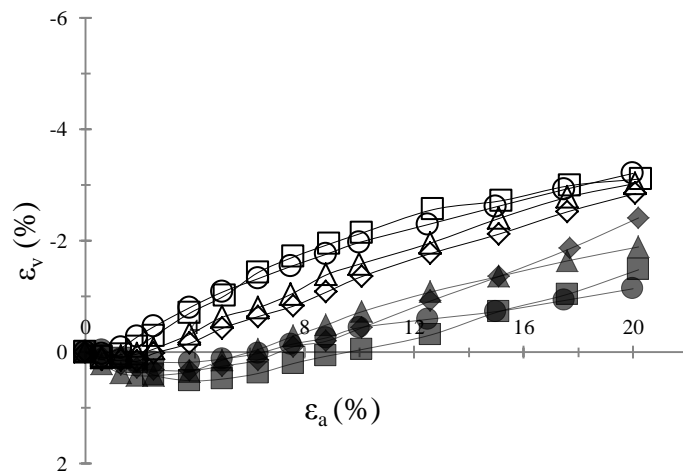
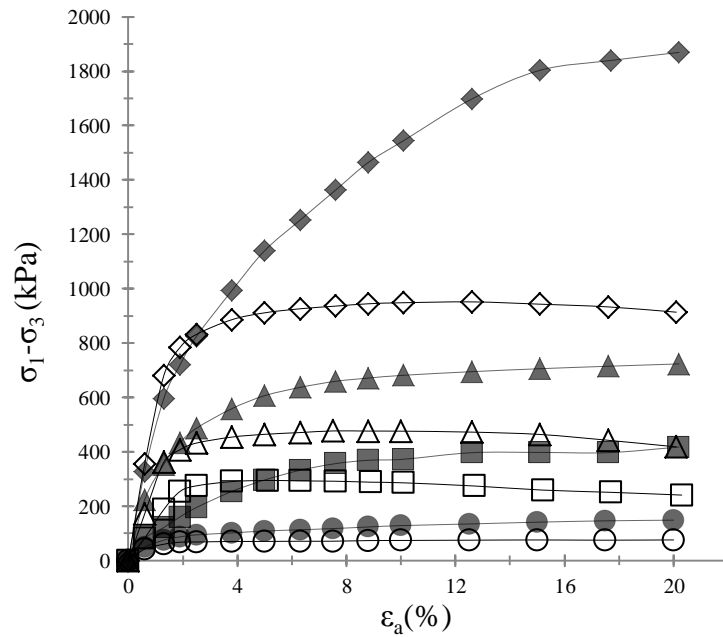
**Figura 5.8:** Curvas tensão versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado e reforçado com fibras de sisal 24mm (Dr=50%).



**Figura 5.9:** Curvas tensão versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado e reforçado com fibras de sisal 36mm (Dr=50%).



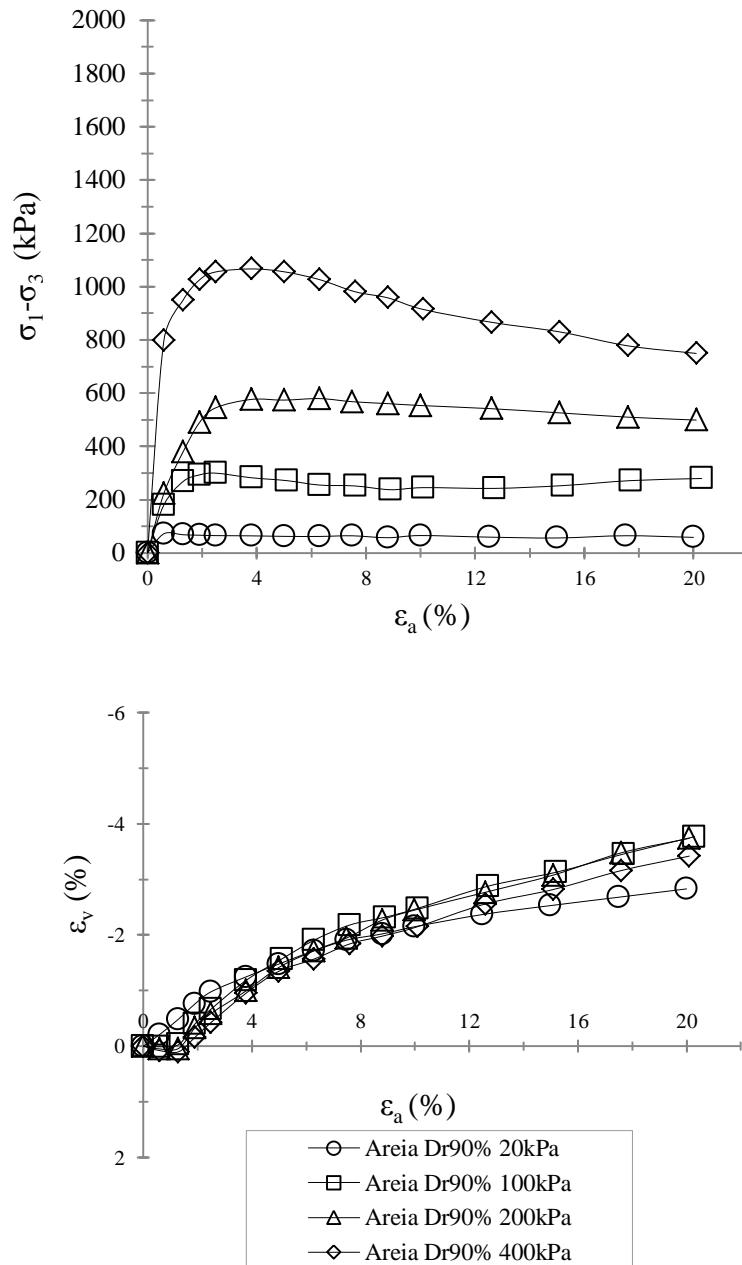
**Figura 5.10:** Curvas tensão versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado e reforçado com fibras de curauá 24mm (Dr=50%).



**Figura 5.11:** Curvas tensão versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado e reforçado com fibras de curauá 36mm (Dr=50%).

O comportamento dos compósitos estudados nesta pesquisa para Dr 50% está de acordo com aqueles reportados na literatura para areia fina reforçada com fibras de polipropileno submetida a ensaios de compressão triaxial drenados (Casagrande, 2005 e Festugato, 2008).

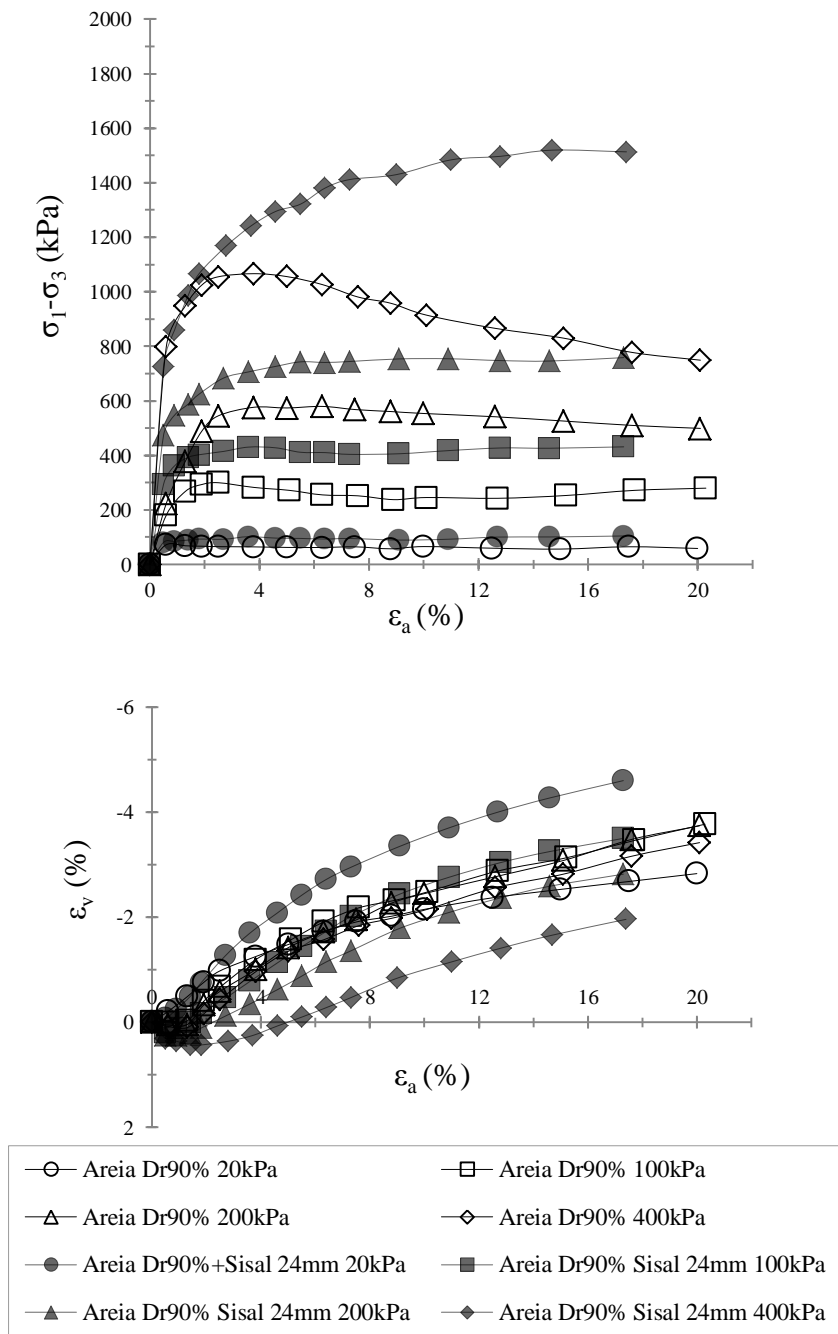
Os resultados dos ensaios realizados com a areia sem reforço na densidade relativa de 90% são apresentados na Figura 5.12, onde, para as diferentes tensões confinantes efetivas, são definidas as curvas de resistência em função da deformação axial e de deformação volumétrica em função da deformação axial do material.



**Figura 5.12:** Curvas tensão *versus* deformação axial e deformação volumétrica *versus* deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado (Dr=90%).

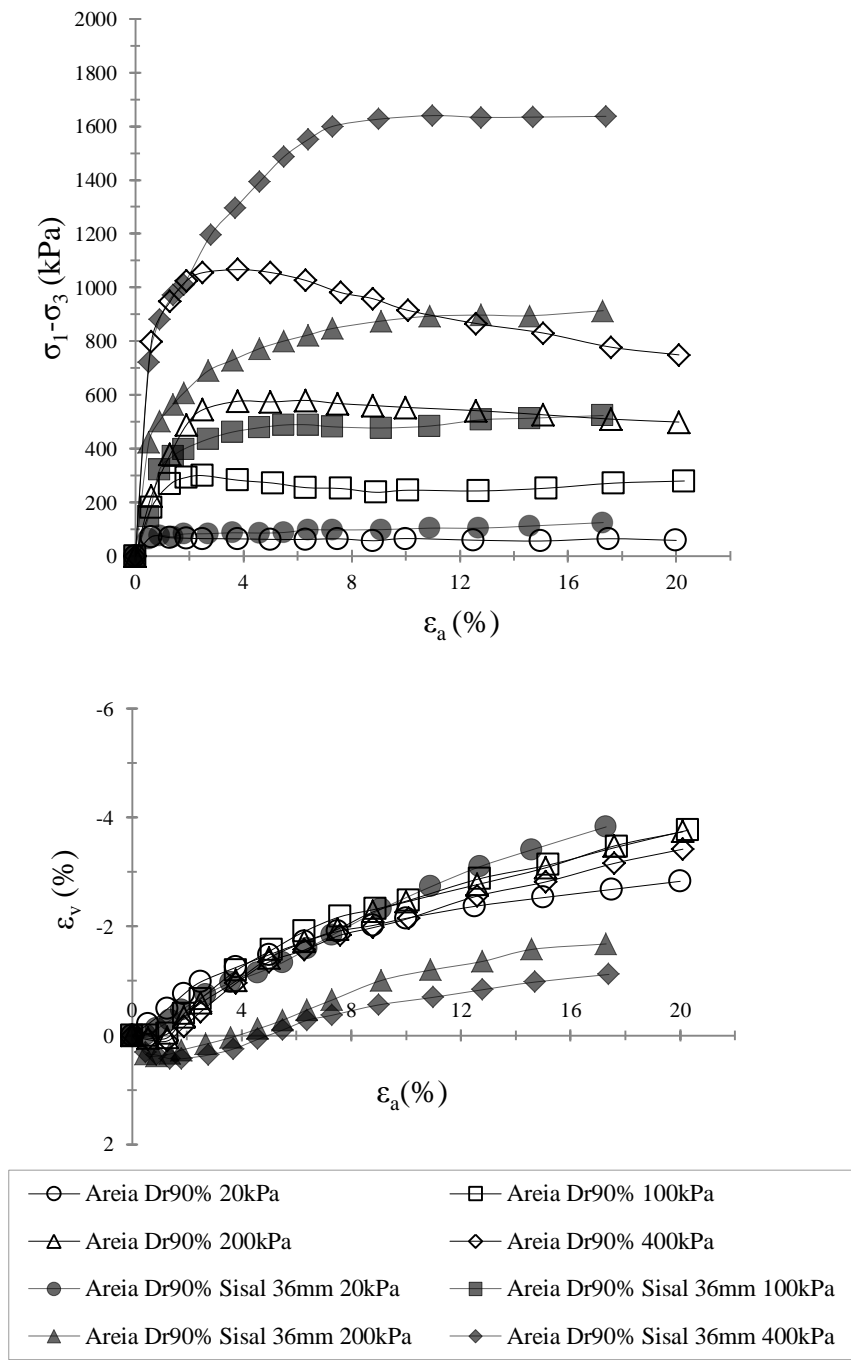
Observa-se na Figura 5.12 que a resistência da areia densa aumenta com o aumento da tensão confinante efetiva. Para cada tensão confinante é verificado que a areia compacta atinge um valor máximo de tensão desviadora, chamada tensão de pico, para menores valores de deformação axial. Deformando-se o corpo de prova após a ruptura, a curva atinge um valor constante de tensão, denominado tensão residual. Neste grau de compactidade observa-se ainda, que o cisalhamento ocorre com aumento de volume do corpo de prova (dilatância), devido ao entrosamento entre partículas. Estes resultados estão de acordo com aqueles apresentados na literatura para a areia densa submetida a ensaios de compressão triaxial consolidado drenado (CID).

Nas Figuras 5.13 a 5.16 são apresentados os resultados dos ensaios realizados em areia reforçada com fibras de curauá e de sisal com 24mm e 36 de comprimento, equivalentes a índices aspecto de 267, 400, 160 e 240, respectivamente. Da mesma forma, as curvas de resistência em função da deformação axial e de deformação volumétrica em função da deformação axial dos materiais reforçados são definidas. Em todos os casos é verificado o nítido acréscimo de resistência, sem formação de pico, em função da adição das fibras em relação ao material não reforçado. A resistência, conforme o esperado aumenta com o aumento da tensão confinante efetiva. Ainda, nestas Figuras, é percebido o comportamento de expansão do material reforçado, como ocorre na areia sem reforço.

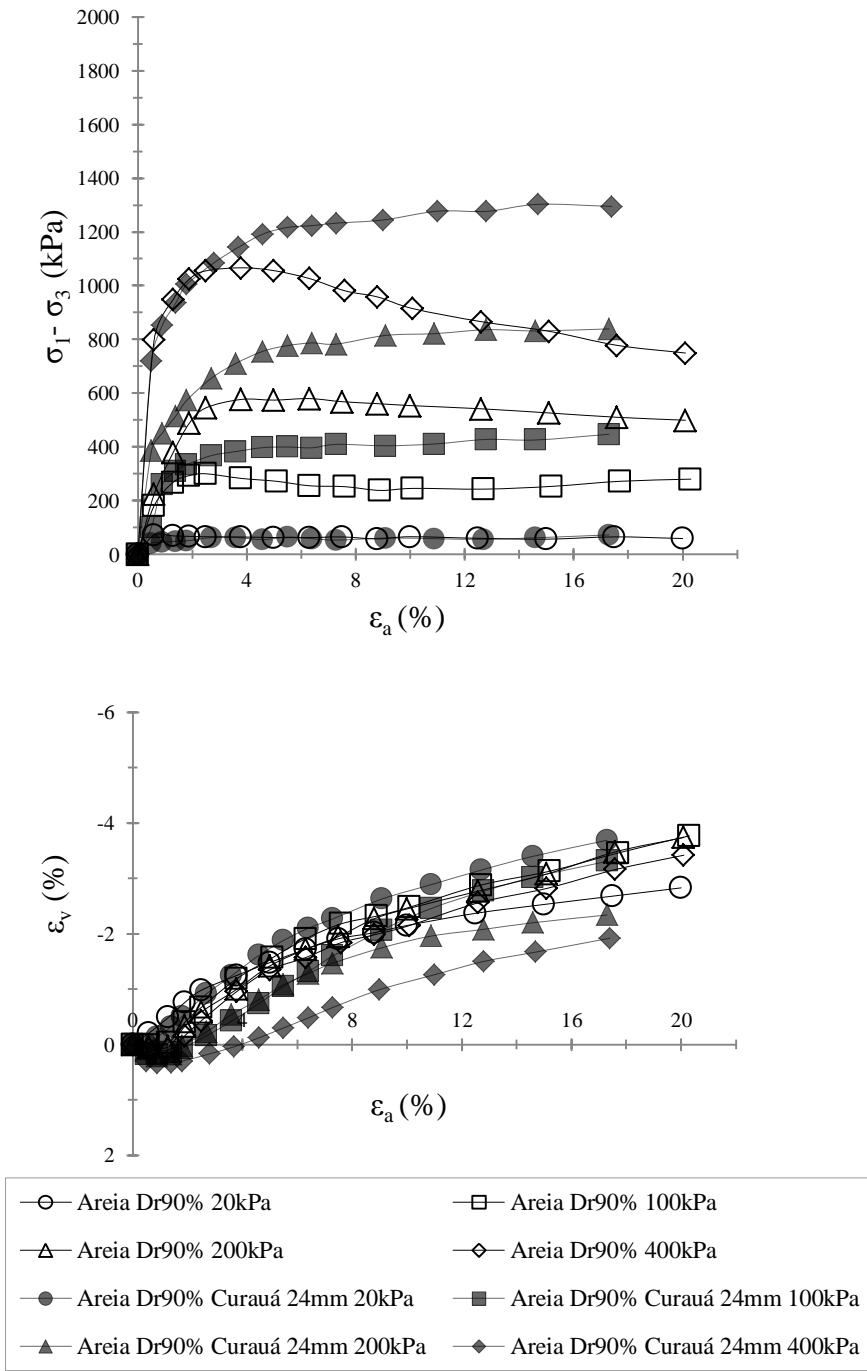


**Figura 5.13:** Curvas tensão *versus* deformação axial e deformação volumétrica *versus* deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado e reforçado com fibras de sisal 24mm (Dr=90%).

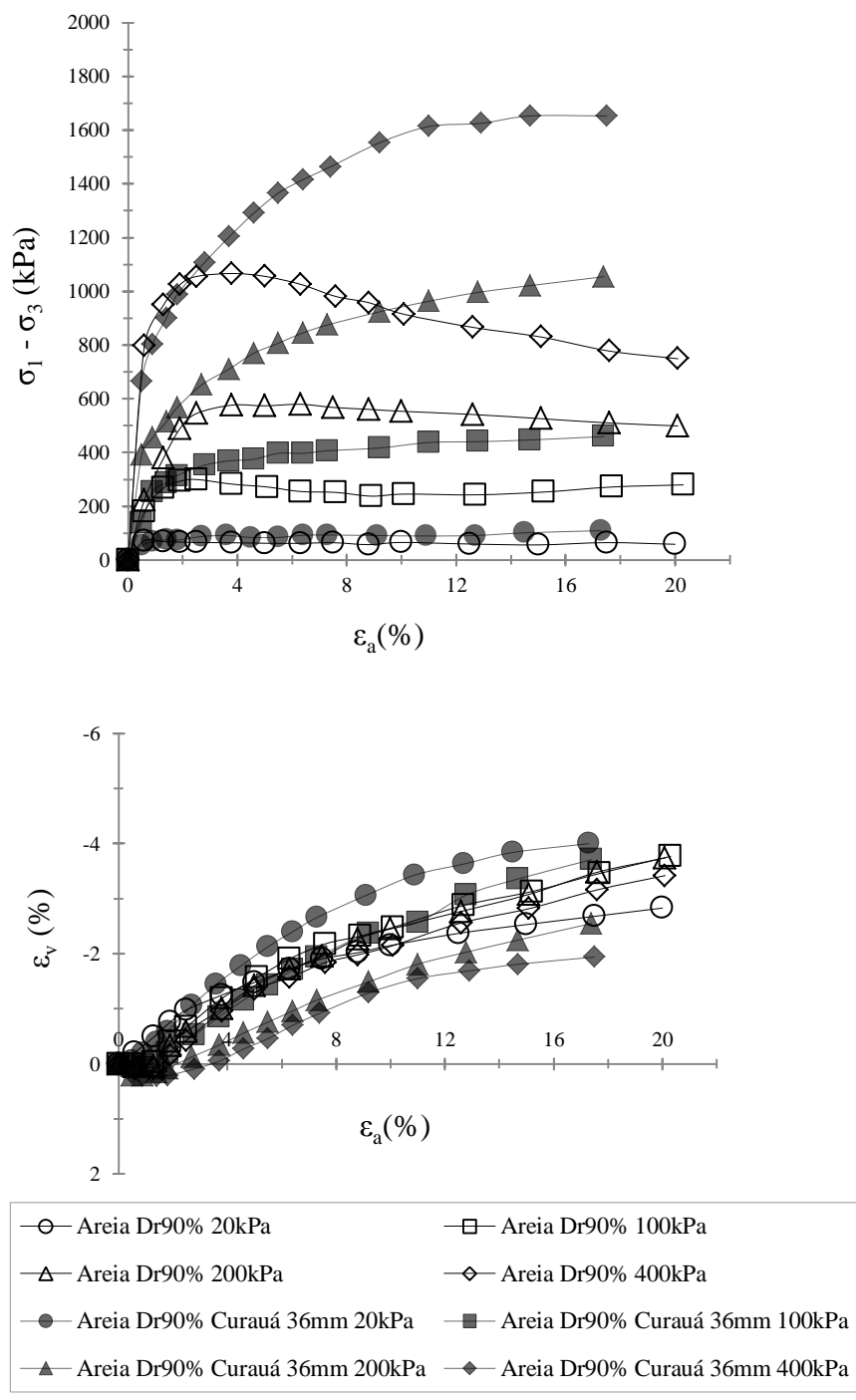




**Figura 5.14:** Curvas tensão *versus* deformação axial e deformação volumétrica *versus* deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado e reforçado com fibras de sisal 36mm (Dr=90%).

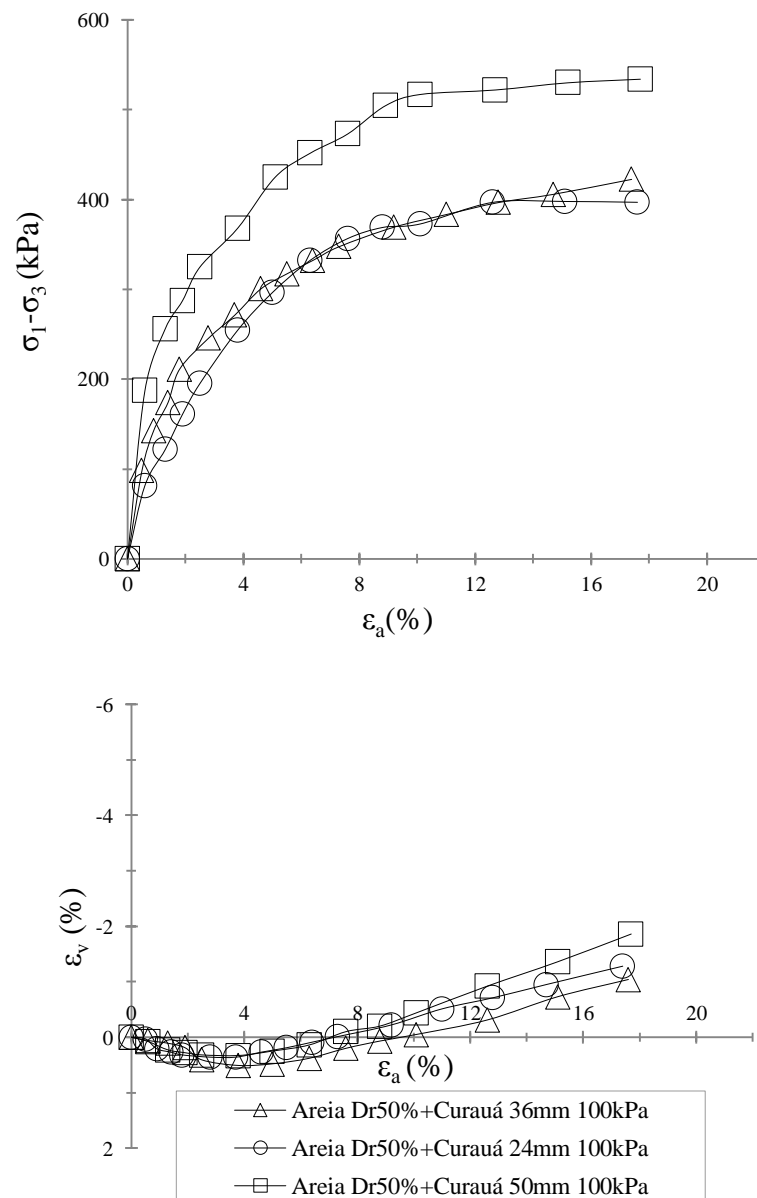


**Figura 5.15:** Curvas tensão *versus* deformação axial e deformação volumétrica *versus* deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado e reforçado com fibras de curauá 24mm (Dr=90%).

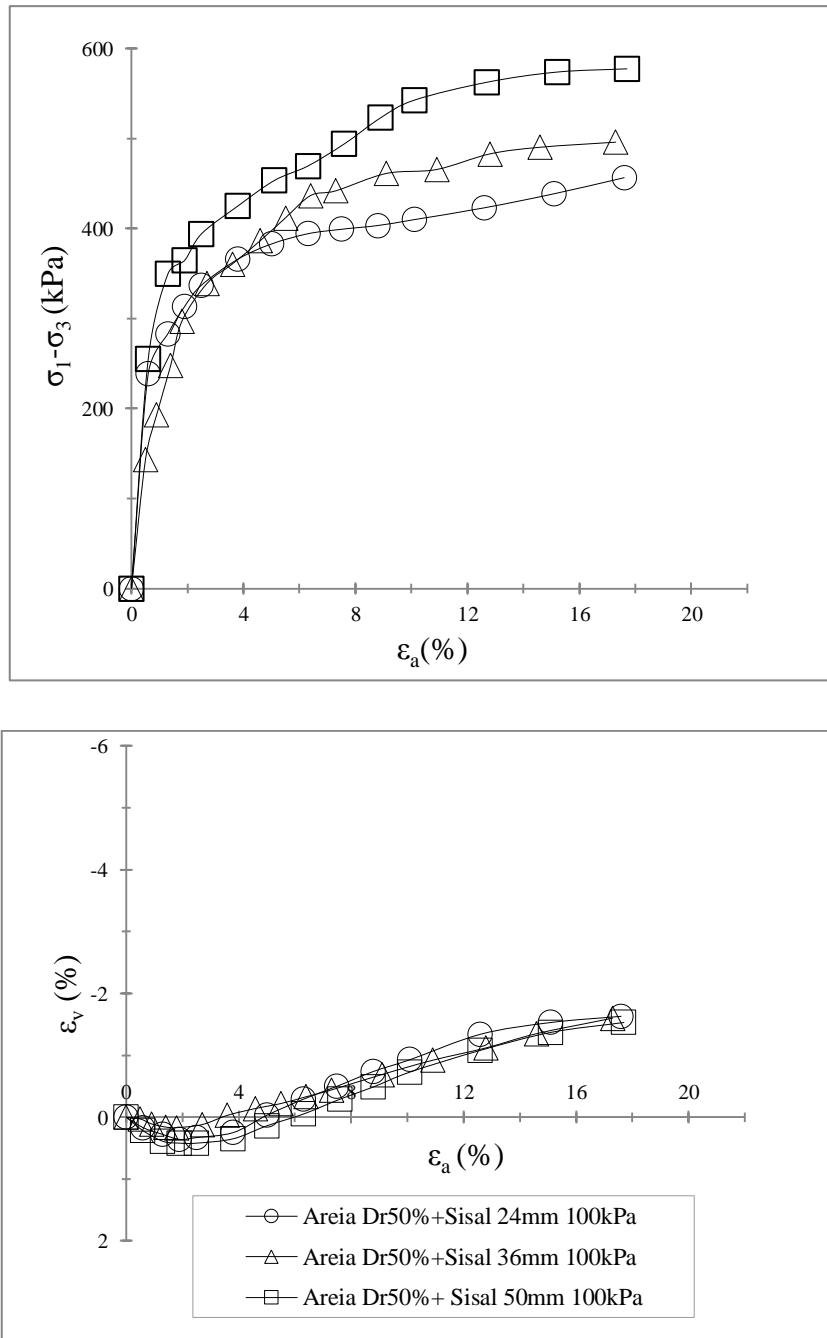


**Figura 5.16:** Curvas tensão *versus* deformação axial e deformação volumétrica *versus* deformação axial, em diferentes tensões confinantes, do material não reforçado e reforçado com fibras de curauá 36mm (Dr=90%).

Os resultados dos ensaios realizados na matriz arenosa reforçada com fibras de curauá e de sisal com 24, 36 e 50mm de comprimento, equivalentes a índices de aspecto 267, 400 e 556 para o curauá e 160, 240 e 333 para o sisal, respectivamente, são apresentados nas Figuras 5.17 e 5.18. Nestas Figuras são definidas as curvas de resistência em função da deformação axial e de deformação volumétrica em função da deformação axial do novo material, para a tensão confinante efetiva de 100kPa, na densidade relativa de 50%.



**Figura 5.17:** Curvas tensão *versus* deformação axial e deformação volumétrica *versus* deformação axial, na tensão confinante de 100kPa, do material reforçado com fibras de curauá de 24,36 e 50mm (Dr=50%).



**Figura 5.18:** Curvas tensão *versus* deformação axial e deformação volumétrica *versus* deformação axial, na tensão confinante de 100kPa, do material reforçado com fibras de sisal de 24,36 e 50mm (Dr=50%).

Os resultados dos ensaios apresentados nas Figuras 5.17 e 5.18 indicam então, a partir de qual índice de aspecto o comportamento de enrijecimento passa a ser mais nítido. Fica claro que, para o material estudado, a partir do índice de aspecto de 400 e 240, para o curauá e sisal, respectivamente, o comportamento de enrijecimento (*hardening*) é acentuado. Fica

indicado ainda, nestas Figuras, que não houve relação entre o índice de aspecto e a expansividade do material, pois as curvas deformação axial *versus* deformação volumétrica são praticamente coincidentes para os três comprimentos de fibras estudados, tanto para o curauá quanto para o sisal.

## 5.6 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A partir dos resultados dos ensaios triaxiais, realizados sob diferentes tensões confinantes efetivas, os parâmetros de resistência das misturas analisadas, ângulo de atrito interno,  $\phi'$ , e intercepto coesivo,  $c'$ , serão definidos através de suas envoltórias de ruptura.

Nos casos em que, quando cisalhadas, as amostras não evidenciarem picos pronunciados de resistência, a deformação axial de 17% será tomada como ruptura e os respectivos valores de tensões são utilizados para definição dos parâmetros de resistência dos materiais.

São agrupados e apresentados, na Tabela V.5, os parâmetros de resistência dos materiais estudados. Verifica-se para a areia não reforçada (Dr 50%) o ângulo de atrito interno de 33,0° e o intercepto coesivo nulo, conforme esperado. Estes resultados são corroborados pelos estudos realizados por Casagrande (2005) e Festugato (2008), onde ensaios triaxiais sob trajetórias de tensões convencionais com o mesmo solo (areia de Osório) não reforçado e reforçado com fibras de polipropileno são abordados. Na Tabela V.5 são agrupados também os resultados obtidos por estes autores, para efeito de comparação.

Fica clara, outra vez, a influência da adição de fibras no acréscimo de resistência ao cisalhamento da areia. São verificados um ângulo de atrito elevado e o aumento do intercepto coesivo para todos os compósitos. Os valores dos ângulos de atrito dos compósitos e os valores dos interceptos coesivos aumentam ligeiramente com o aumento do índice aspecto, para cada tipo de fibra estudada. São observados ainda, que os valores dos ângulos de atrito e os valores dos interceptos coesivos dos compósitos com as fibras vegetais estudadas nesta pesquisa são semelhantes aos valores encontrados para as fibras de polipropileno, nos estudos de Casagrande (2005) e Festugato (2008).

Para as fibras com 24mm de comprimento, Casagrande e Festugato definem um ângulo de atrito interno de 44,5° e 45,5° e um intercepto coesivo de 16,7kPa e 19,4kPa, respectivamente. O valor do ângulo de atrito de 37,5° e 35,2° definidos nesta pesquisa para as fibras de curauá e de sisal é menor do que os valores encontrados pelos autores citados. Já os valores dos interceptos coesivos de 20,3 para fibra de curauá e 16,9 para a fibra de sisal são praticamente os mesmos encontrados por Casagrande e Festugato, respectivamente.

Não é observada nenhuma relação destes valores com o índice de aspecto destas fibras, pois elas apresentam propriedades mecânicas e superfícies bem diferentes. É importante constatar que para um mesmo comprimento de fibra, os compósitos constituídos por areia e fibras de curauá e areia e fibras de sisal apresentam parâmetros de resistência ao cisalhamento, praticamente idênticos aos parâmetros de resistência dos compósitos com areia e fibras de polipropileno. Esta constatação é importante para validar o uso das fibras vegetais como elemento de reforço em matriz de solo, permitindo que estas possam competir com as fibras sintéticas e até mesmo substituí-las.

**Tabela V.5:** Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais estudados nesta pesquisa e dos materiais estudados por Casagrande (2005) e Festugato (2008), na Dr 50%.

Compósito	Dr (%)	Fibras			c' (kPa)	φ' (°)
		Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Índice aspecto		
Areia	50	-	-	-	0	33,0
Areia (Festugato, 2008)	50	-	-	-	0	37,0
Areia (Casagrande, 2005)	50	-	-	-	0	33,4
Areia-fibra de curauá	50	24	0,09	267	20,3	37,5
Areia-fibra de curauá	50	36	0,09	400	20,7	39,0
Areia-fibra de sisal	50	24	0,15	160	16,9	37,2
Areia-fibra de sisal	50	36	0,15	240	23,8	40,0
Areia-fibra (Festugato, 2008)	50	24	0,100	240	19,4	45,5
Areia-fibra (Casagrande, 2005)	50	24	0,023	1043	16,7	44,5

São agrupados e apresentados, na Tabela V.6, os parâmetros de resistência dos materiais estudados na  $D_r$  90%. Verifica-se para a areia não reforçada o ângulo de atrito interno de  $39,0^\circ$  e o intercepto coesivo nulo. O valor do ângulo de atrito interno é maior daquele encontrado para a areia na densidade intermediária, conforme esperado.

Para os compósitos com fibras de sisal e de curauá, os valores dos ângulos de atrito e os valores dos interceptos coesivos aumentam ligeiramente com o aumento do índice aspecto, para cada tipo de fibra estudada. Em todos os casos estudados observou-se o aumento do intercepto coesivo e do ângulo de atrito interno comparativamente ao material sem reforço, significando, portanto, um aumento na resistência ao cisalhamento do solo com a inclusão das fibras.

**Tabela V.6:** Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais estudados na  $D_r$ 90%.

Compósito	$D_r$ (%)	Fibras			$c'$ (kPa)	$\phi'$ ( $^\circ$ )
		Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Índice aspecto		
Areia	90	-	-	-	0	39,0
Areia-fibra de curauá	90	24	0,09	267	23,9	40,5
Areia-fibra de curauá	90	36	0,09	400	24,4	41,2
Areia-fibra de sisal	90	24	0,15	160	23,6	40,4
Areia-fibra de sisal	90	36	0,15	240	27,2	41,6

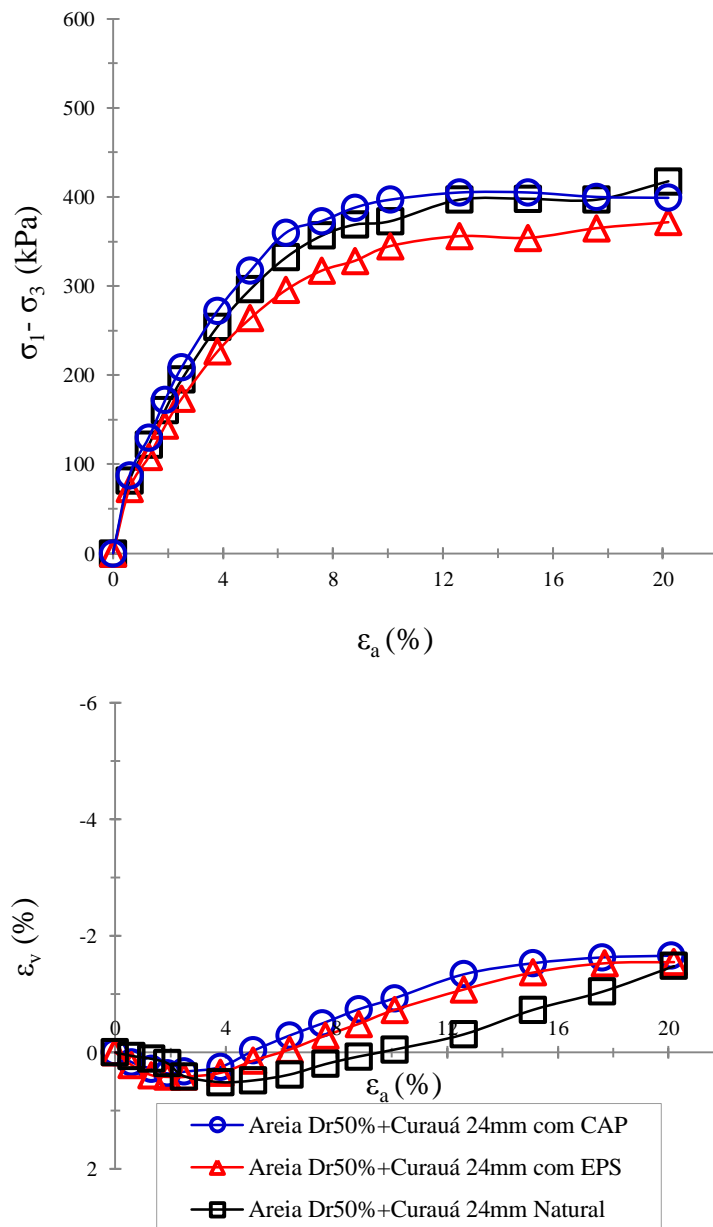
## 5.7 Análise da Influência dos Tratamentos das Fibras no Comportamento Tensão-Deformação dos Compósitos

Nas Figuras 5.19 a 5.26 são apresentados os resultados dos ensaios realizados em areia reforçada com fibras naturais de curauá e sisal e impermeabilizadas com soluções de EPS e CAP, nos comprimentos 24mm e 36mm. As curvas de resistência em função da deformação axial e de deformação volumétrica em função da deformação axial do material reforçado nas

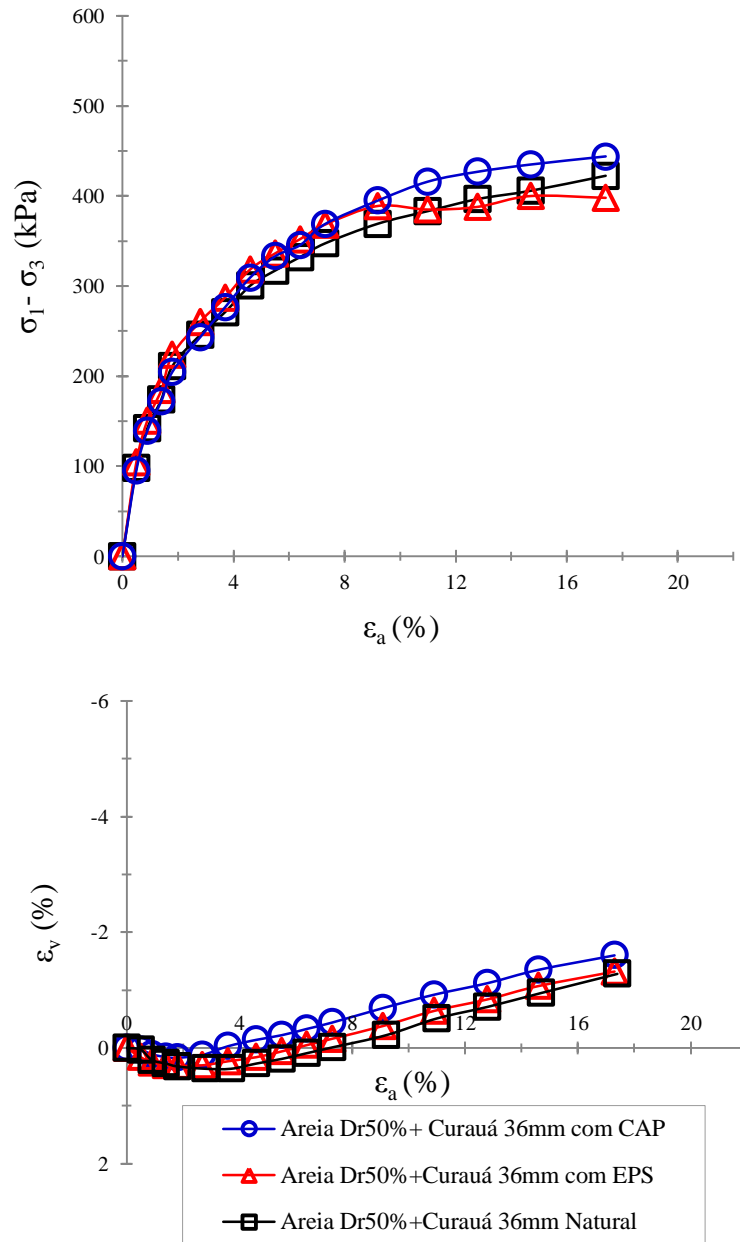


densidades relativas estudadas ( $Dr$  50% e  $Dr$ 90%) são definidas para tensão de confinamento de 100kPa.

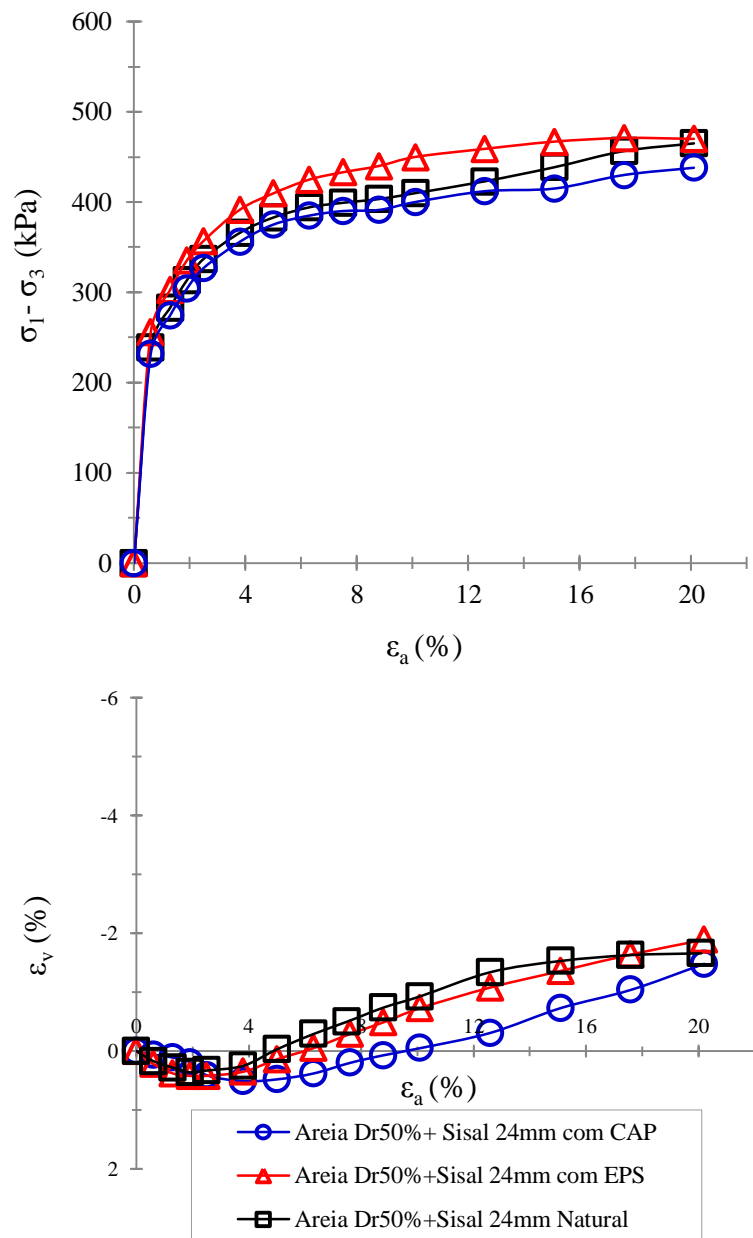
Em todos os casos é verificado que não houve influência dos tratamentos dados às fibras quanto à resistência ao cisalhamento dos compósitos estudados, pois as curvas de deformação axial *versus* tensão desvio são praticamente coincidentes para as fibras impermeabilizadas com soluções de EPS e de CAP, tanto para o curauá quanto para o sisal, comparativamente às estas fibras sem tratamento. É percebido também, o comportamento inicial de compressão e posterior de expansão do material reforçado com fibras tratadas na densidade intermediária e expansão no material denso, como ocorre para os compósitos com fibras naturais.



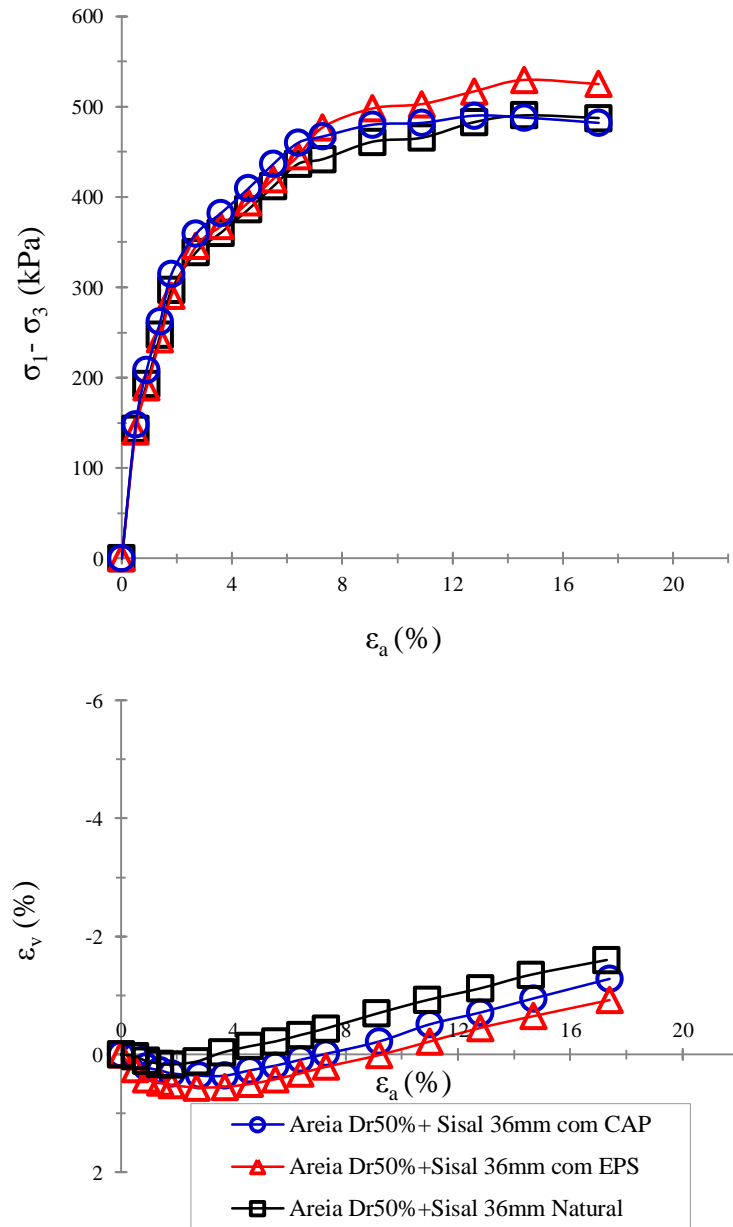
**Figura 5.19:** Curvas tensão versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial, do material reforçado com fibras de curauá 24mm naturais e impermeabilizadas com soluções de EPS e CAP(Dr=50%).



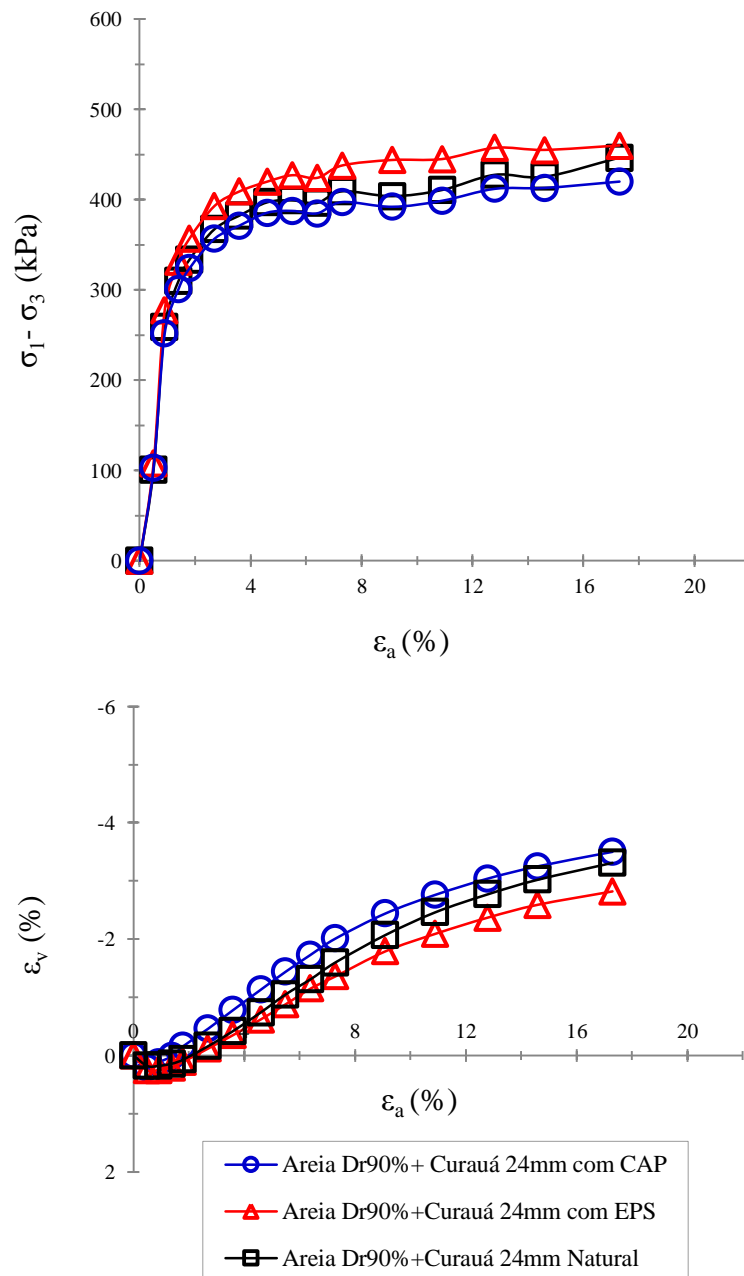
**Figura 5.20:** Curvas tensão versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial, do material reforçado com fibras de curauá 36mm naturais e impermeabilizadas com soluções de EPS e CAP(Dr=50%).



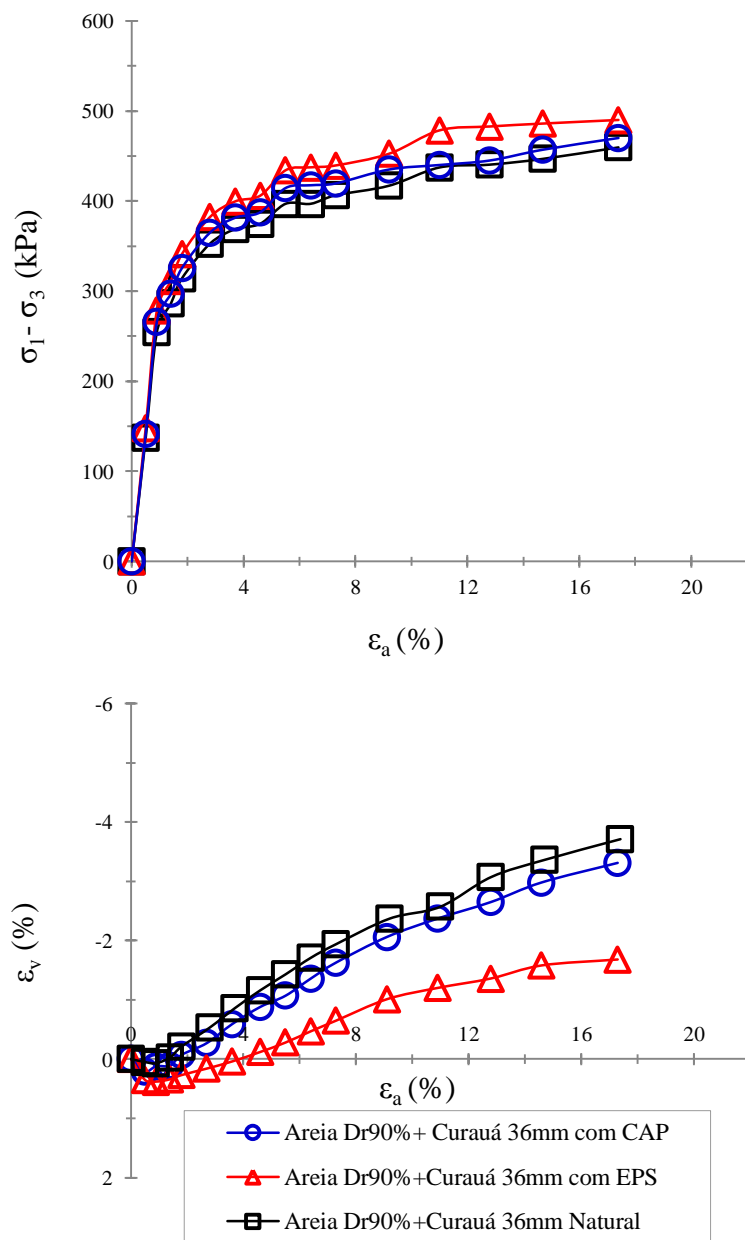
**Figura 5.21:** Curvas tensão versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial, do material reforçado com fibras de sisal 24mm naturais e impermeabilizadas com soluções de EPS e CAP(Dr=50%).



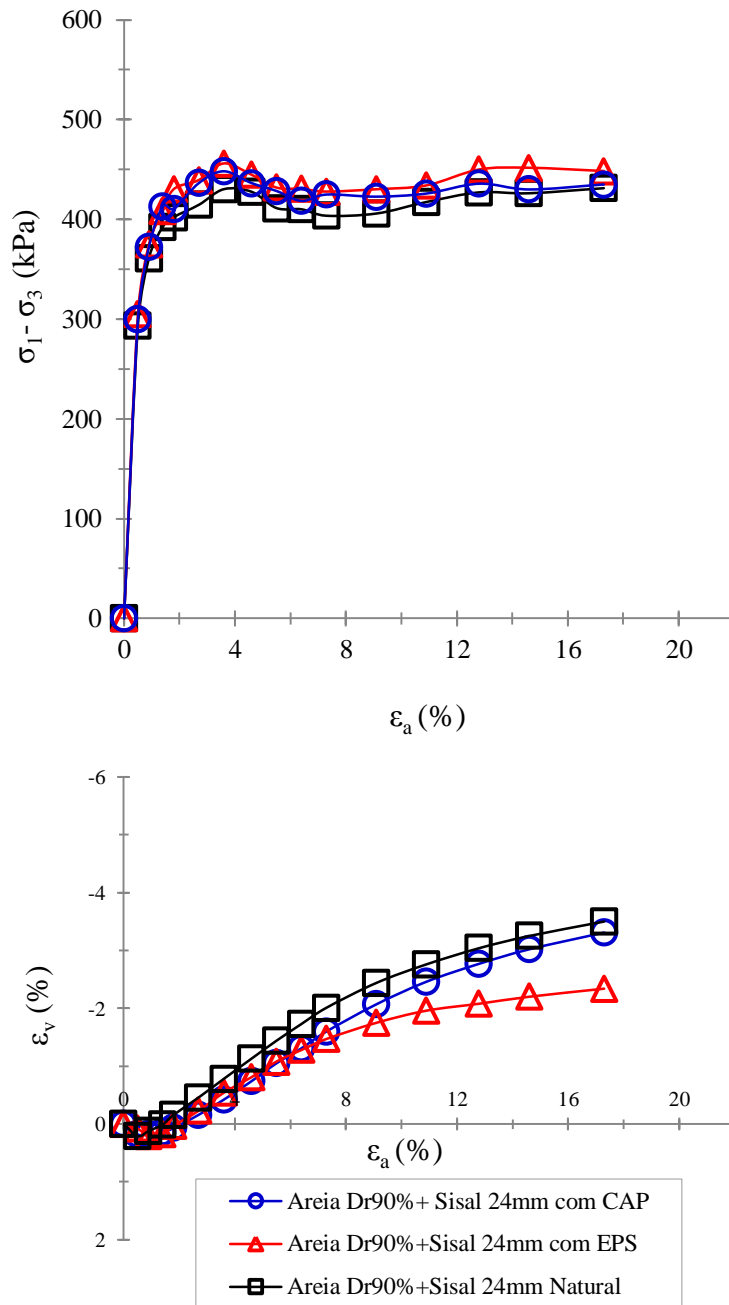
**Figura 5.22:** Curvas tensão versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial, do material reforçado com fibras de sisal 36mm naturais e impermeabilizadas com soluções de EPS e CAP(Dr=50%).



**Figura 5.23:** Curvas tensão *versus* deformação axial e deformação volumétrica *versus* deformação axial, do material reforçado com fibras de curauá 24mm naturais e impermeabilizadas com soluções de EPS e CAP (Dr=90%).

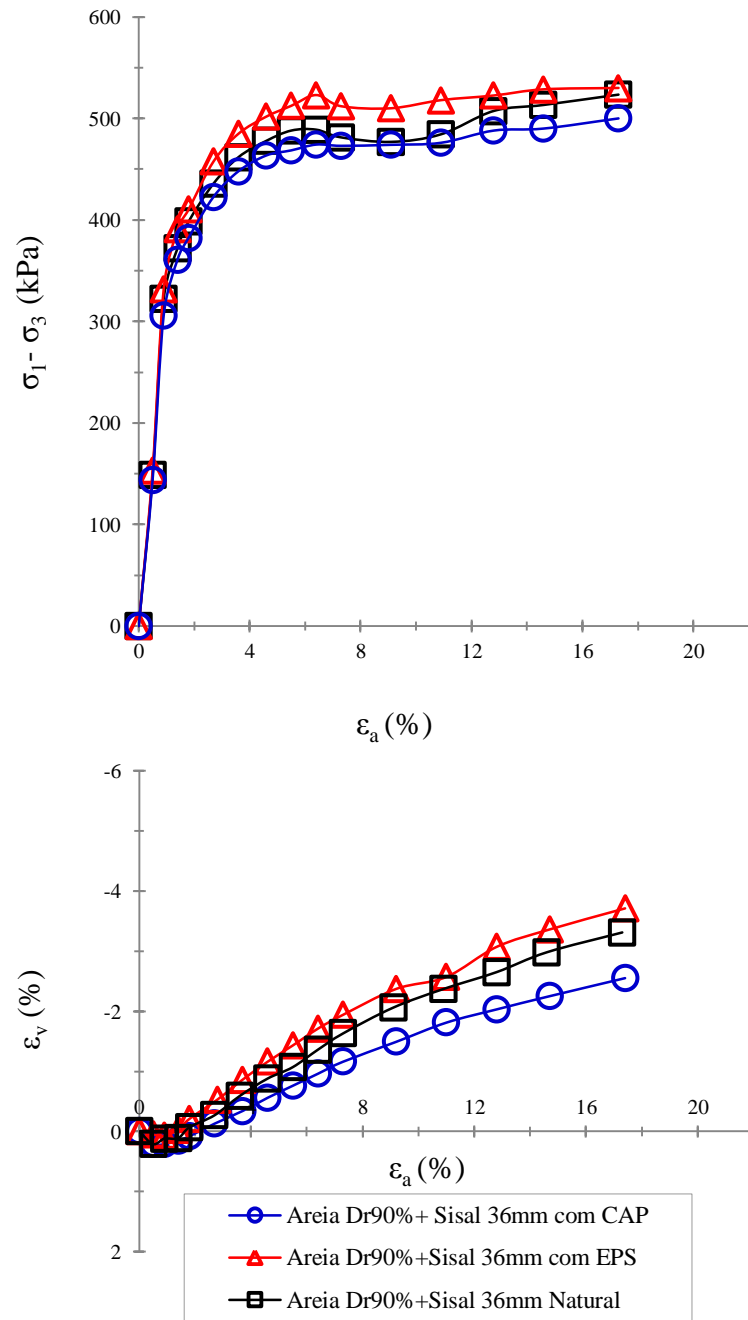


**Figura 5.24:** Curvas tensão *versus* deformação axial e deformação volumétrica *versus* deformação axial, do material reforçado com fibras de curauá 36mm naturais e Impermeabilizadas com soluções de EPS e CAP (Dr=90%).



**Figura 5.25:** Curvas tensão versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial, do material reforçado com fibras de sisal 24mm naturais e Impermeabilizadas com soluções de EPS e CAP(Dr=90%).





**Figura 5.26:** Curvas tensão versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial, do material reforçado com fibras de sisal 36mm naturais e Impermeabilizadas com soluções de EPS e CAP(Dr=90%).

## 5.8 ANÁLISE DA DEFORMABILIDADE

Neste trabalho, o módulo de deformabilidade do solo arenoso reforçado e não reforçado com fibras de curauá e de sisal naturais foi determinado a partir das curvas tensão desviadora *versus* deformação axial apresentadas nas figuras 5.7 a 5.16. A análise da deformabilidade do solo, com e sem reforço, foi realizada através da determinação do módulo de deformabilidade secante à origem para todos os pontos experimentais. As Tabelas V.7 e V.8 apresentam os valores dos módulos de deformabilidade secante ( $E_s$ ) a pequenas deformações axiais (0,005e 0,01), para as tensões confinantes de 20, 100, 200 e 400kPa, nas densidades relativas de 50% e 90%, respectivamente.

**Tabela V.7:** Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais estudados na Dr50%.

Composto (Dr50%)	$\epsilon_a$	Módulo de Deformabilidade Secante – $E_s$ (GPa)			
		20kPa	100kPa	200kPa	400kPa
Areia	0,005	4,57	14,45	27,82	52,14
	0,01	1,99	7,27	15,41	23,38
Areia + Curauá 24mm	0,005	5,73	19,21	26,96	45,58
	0,01	2,96	9,27	16,22	19,11
Areia + Curauá 36mm	0,005	6,35	15,98	39,82	66,20
	0,01	3,23	8,32	15,98	19,94
Areia +Sisal 24mm	0,005	6,29	21,35	27,05	45,98
	0,01	2,39	9,74	16,28	22,33
Areia + Sisal 36mm	0,005	8,38	23,74	33,39	75,07
	0,01	2,67	11,58	19,24	24,19

**Tabela V.8:** Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais estudados na Dr90%.

Compósito (Dr90%)	$\epsilon_a$	Módulo de Deformabilidade Secante – $E_s$ (GPa)			
		20kPa	100kPa	200kPa	400kPa
Areia	0,005	5,10	20,40	28,97	71,57
	0,01	0,54	8,75	13,83	17,53
Areia + Curauá 24mm	0,005	6,08	28,43	51,25	96,70
	0,01	0,76	8,37	14,39	23,68
Areia + Curauá 36mm	0,005	7,78	28,26	51,63	91,05
	0,01	0,96	8,21	13,62	25,87
Areia +Sisal 24mm	0,005	9,69	40,89	62,18	97,53
	0,01	0,95	10,79	12,49	28,73
Areia + Sisal 36mm	0,005	8,75	35,52	57,71	99,83
	0,01	0,86	8,56	15,53	27,49

Pode-se notar nas tabelas acima, o grande aumento do módulo de deformabilidade com a tensão confinante para a deformação axial de 0,005. Para a deformação específica de 0,01, o aumento do módulo com a tensão confinante não é muito pronunciado, indicando a evolução da desestruturação do material. Para a faixa de deformação axial analisada observou-se uma queda do módulo de deformabilidade secante com o aumento da deformação axial. Foi possível verificar também, que houve aumento significativo dos valores do módulo de deformabilidade para o material reforçado comparativamente ao material sem reforço.

## 5.9 FIBRAS MEDIDAS

Para análise das características de alongamento e ruptura, ou não, dos reforços, após serem submetidos ao ensaio de compressão triaxial no interior da massa de solo, como já mencionado, foram exumadas fibras de curauá e de sisal naturais e impermeabilizadas, ao término de cada ensaio, das regiões do topo, intermediária e da base das amostras e seus

comprimentos foram então medidos. Para adequada comparação dos resultados e para compreensão dos mecanismos de interação solo-fibra, amostras de fibras não ensaiadas são também medidas. Em nenhum dos casos estudados foi observada variação nos comprimentos finais dos reforços, não havendo, portanto necessidade de representação gráfica destes dados.

Os resultados indicam que nenhuma fibra analisada sofreu ruptura por tração e que não houve alongamento destas fibras. Este fato se justifica pela baixa deformação na ruptura das fibras de curauá e de sisal 2,5% e 3,3%, respectivamente. Diante destes resultados, pode ser sugerido que a interação entre a matriz de solo e as fibras se dá através do deslizamento das fibras.

## 6 CONCLUSÕES

Conforme os resultados e as análises apresentadas no capítulo anterior, algumas conclusões foram estabelecidas, sendo que algumas já apresentadas no decorrer de todo o trabalho.

Os resultados dos ensaios mecânicos das fibras mostram que a fibra de curauá apresenta cerca do dobro do valor de resistência à tração e do módulo de elasticidade comparada à fibra de sisal, parâmetro que reflete na resistência mecânica da fibra. Já a variação de deformação na ruptura não é tão significativa.

As micrografias obtidas por MEV das superfícies das fibras de curauá e de sisal impermeabilizadas com EPS e CAP mostram claramente a impregnação dos polímeros nas superfícies destas fibras e evidenciam a eficiência da impermeabilização.

Os resultados da avaliação da atividade celulolítica fúngica sobre as fibras naturais e impermeabilizadas, mostram que o revestimento com EPS e com CAP protegeu tanto a fibra de sisal como a fibra de curauá do ataque do fungo celulolítico padrão *Trichoderma viride* QM 9414, comprovando a eficiência da impermeabilização e atestando a durabilidade das fibras vegetais impermeabilizadas.

A partir das curvas de resistência em função da deformação axial e de deformação volumétrica em função da deformação axial, algumas conclusões são definidas:

- Há acréscimo de resistência ao cisalhamento, em relação ao solo sem reforço, no material reforçado, para todos os tipos de fibra adicionados.
- A taxa de ganho de resistência do solo reforçado, a partir de uma certa deformação, em torno de 2% neste estudo, é constante e tende a aumentar com o aumento da tensão confinante efetiva.
- Os micro-reforços proporcionam ao solo um comportamento de enrijecimento (*hardening*), que passa a ser mais pronunciado a partir de um dado valor de índice aspecto das fibras de curauá e de sisal (400 e 240, respectivamente).
- O valor do índice aspecto das fibras exerce influência no comportamento dos compósitos. Quanto maior o índice aspecto da fibra, maior a taxa de ganho e o

ganho de resistência. Isto não é observado quando se compara as fibras de curauá e de sisal, pois embora as fibras de curauá apresentem maior índice de aspecto e melhores propriedades mecânicas, não foi observado maior ganho de resistência para o material reforçado com estas fibras. Acredita-se que isto se deve ao fato das fibras de sisal serem mais trabalháveis, permitindo, portanto, uma melhor homogeneização da mistura solo-fibra.

- A dilatância da areia não é sensivelmente alterada pela inclusão de fibras vegetais em todos os casos estudados.
- Em todos os casos é verificado que não houve influência dos tratamentos dados às fibras quanto à resistência ao cisalhamento dos compósitos estudados, pois as curvas deformação axial *versus* tensão desvio são praticamente coincidentes para as fibras impermeabilizadas com soluções de EPS e de CAP, tanto para o curauá quanto para o sisal, comparativamente às estas fibras sem tratamento.

Com base nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, determinados a partir dos resultados dos ensaios triaxiais, as seguintes conclusões são estabelecidas:

- Em relação ao solo sem reforço, há sensível melhora nos parâmetros de resistência do material reforçado, independentemente do tipo de fibra adicionado.
- Para os compósitos com fibras de sisal e de curauá, os valores dos ângulos de atrito e os valores dos interceptos coesivos aumentam ligeiramente com o aumento do índice aspecto, para cada tipo de fibra estudada. Em todos os casos estudados observou-se o aumento do intercepto coesivo e do ângulo de atrito interno comparativamente ao material sem reforço, significando, portanto, um aumento na resistência ao cisalhamento do solo com a inclusão das fibras.
- Os materiais densos apresentaram valores de parâmetros de resistência maiores daqueles observados para os materiais na densidade intermediária, para todos os casos estudados.
- Constatou-se, para um mesmo comprimento de fibra, que os compósitos constituídos por areia e fibras de curauá e areia e fibras de sisal apresentam

parâmetros de resistência ao cisalhamento próximo aos parâmetros de resistência dos compósitos com a mesma areia e fibras de polipropileno, estudados por Casagrande (2005) e Festugato (2008). Esta constatação é importante para validar o uso das fibras vegetais como elemento de reforço em matriz de solo, permitindo que estas possam competir com as fibras sintéticas e até mesmo substituí-las.

Baseado na análise do módulo de deformabilidade secante determinado a partir das curvas tensão desviadora *versus* deformação axial do material reforçado e não reforçado com fibras de curauá e de sisal, pode-se observar o aumento do módulo de deformabilidade com a tensão confinante. Para a faixa de deformação axial analisada observou-se uma queda do módulo de deformabilidade secante com o aumento da deformação axial. Foi possível verificar também, que houve aumento significativo dos valores do módulo de deformabilidade para o material reforçado comparativamente ao material sem reforço.

A medida dos comprimentos das fibras antes e após a realização dos ensaios permite afirmar que, sob condições de compressão triaxial no interior da massa de solo, as fibras não rompem por tração. Quando a ruptura do compósito ocorre e como não há o alongamento dos reforços, a interação entre a matriz de solo e as fibras se dá através do deslizamento das fibras. A deformação necessária para causar a ruptura das fibras não é alcançada sob condições de compressão triaxial no nível de deformações estudado.

Finalmente, pode-se concluir que a inclusão de fibras de curauá e de sisal impermeabilizadas ao solo proporciona o desenvolvimento de novos materiais compósitos com características próprias, observado pela melhoria das propriedades mecânicas do solo, transformando-o num produto de melhor qualificação para aplicação em obras geotécnicas. O sucesso da impermeabilização das fibras vegetais aliado ao bom desempenho do solo reforçado por estas fibras comprovam que elas podem substituir com sucesso com as fibras sintéticas.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer da pesquisa, surgiram várias hipóteses para realização de trabalhos futuros e que não foram realizados devido a prazos e dificuldade de equipamentos. Abaixo são citadas algumas sugestões para a ampliação do conhecimento e o prosseguimento dos estudos sobre o reforço de solos com fibras vegetais em futuros trabalhos:

- Estudo da aderência interfacial com a matriz de solo, além de observações e análises em nível microscópico de interação fibra-matriz.
- Estudos da influência da estabilização química através da adição de cal e cimento aos compósitos solos-fibras vegetais impermeabilizadas com EPS e CAP.
- Estudos da influência da estabilização química por polímeros naturais como óleo de mamona, linhaça, babosa e palma, em compósitos solos-fibras vegetais naturais e impermeabilizadas com EPS e CAP.
- Desenvolvimento de modelos constitutivos para análise numérica, através de programas embasados no método dos elementos finitos, que reproduzam o comportamento de solos reforçados com fibras vegetais.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL WAHAB, R.M.; AL-QURNA, H.H. Fiber Reinforced cohesive soils for application in compacted earth structures. In: GEOSYNTHETICS'95 CONFERENCE. 1995, Nashville. Proceedings ... v.2, p.433-466, 1995.

AL WAHAB, R. M.; EL-KEDRAH, M. A. Using fibers to reduce tension cracks and shrink/swell in a compacted clay. In: GEOENVIRONMENT – CHARACTERIZATION, CONTAINMENT, REMEDIATION AND PERFORMANCE IN ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 1995, New Orleans. Proceedings... ASTM STP n. 46, ASTM, v.1, 2v, p.791-805, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for measuring the Dynamic Mechanical Properties of Plastics Using Three Point Bending. ASTM D5023-99.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Classification of Soils for Engineering Purposes: D 2487. Philadelphia, p.11, 1993.

ASHOUR, T.; GEORG, H.; WU W. An experimental investigation on equilibrium moisture content of earth plaster with natural reinforcement fibres for straw bale buildings. Applied Thermal Engineering, Volume 31, Issues 2-3, p. 293-303, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (ABRAPEX). Mercado de EPS disponível em: <<http://www.abrapex.com.br>>. acesso em: 15 de março 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. SOLO – DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE liquidez: NBR 6459. Rio de Janeiro,1984-a, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Grãos de Solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica: NBR 6508. Rio de Janeiro,1984-c, 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo – Determinação do limite de plasticidade: NBR 7180. Rio de Janeiro,1984-d, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo – Análise granulométrica: NBR 7181. Rio de Janeiro, 1984-e, 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: NBR 6457. Rio de Janeiro, 1986-a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo - Ensaio de Compactação: NBR 7182. Rio de Janeiro, 1986-b, 10p. Origem: Projeto NBR 7182/84.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação da Umidade por Secagem em Estufa: NBR 9656. Rio de Janeiro, 1986, 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solos – determinação do índice de vazios máximo de solos não-coesivos: NBR 12004. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solos – determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos: NBR 12051. Rio de Janeiro, 1991-b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rochas e solos – Terminologia: NBR 6502. Rio de Janeiro, 1995.

BISHOP, A.W.; HENCKEL, D.J. The measurements of soil properties in triaxial test. London: Edward Arnold, 2ed., 277p., 1962.

BOTARO, V.R. Deslignificação organossolve de bagaço de cana de açúcar: fracionamento e benzilação das ligninas obtidas. Tese de Doutorado – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

BUENO, B.S.; LIMA, D.C.; TEIXEIRA, S.H.C.; RIBEIRO N.J. Soil fiber reinforcement: basic understanding. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY, 1996, San Diego. Anais v.1, p. 878-884, 1996.

CALDERONI, S. A viabilidade econômica da Reciclagem do Lixo. Ciência & Ambiente. Vol. 18. Santa Maria: UFSM, 1999.

CASAGRANDE, M.D.T. Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações. Porto Alegre, 2005, 217p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

CASAGRANDE, M.D.T; CONSOLI, N. Estudo do comportamento de um solo residual areno-siltoso reforçado com fibras de polipropileno. Solos e Rochas, São Paulo, ABMS/ABGE, v.25, n.3, p.223-230, 2002.

CASAGRANDE, M. D. T.; COOP, M. R.; CONSOLI, N. C. Behavior of a Fiber-Reinforced Bentonite at Large Shear Displacements. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.132, n.11, p. 1505-1508, 2006.

CONSOLI, N.C.; ULBRICH, L.A.; PRIETTO, P.D.M. Engineering behavior of randomly distributed fiber-reinforced cement soil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RECENT DEVELOPMENTS IN SOIL AND PAVEMENT MECHANICS, 1997, Rio de Janeiro. Proceedings... Rotterdam: A.A. Balkema, p.481-486, 1997.

CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M.; ULBRICH, L.A. Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.124, n.12, p. 1211-1214, 1998.

CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M.; ULBRICH, L.A. The behavior of a fiber-reinforced cemented soil. Ground Improvement, ISSMGE, v.3 n.3, p.21-30, 1999.

CONSOLI, N.C.; MONTARDO, J.P.; PRIETTO, P.D.M.; PASA, G. Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.128, n.6, p. 462-472, 2002.

CONSOLI, N.C.; VENDRUSCOLO, M.A.; PRIETTO, P.D.M. Behavior of plate load tests on soil layers improved with cement and fiber. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.129, n.1, p. 96-101, 2003-a.

CONSOLI, N.C.; CASAGRANDE, M.D.T.; PRIETTO, P.D.M.; THOMÉ, A. Plate load test on fiber-reinforced soil. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, Reston - Virginia - USA, v. 129, n. 10, p. 951-955, 2003-b.

CONSOLI, N.C., MOTARDO, J.P., DONATO, M., PRIETTO, P.D.M. Effect of material properties on the behaviour of sand-cement-fibre composites. *Ground Improvement*, ISSMGE, v.8 n.2, p.77-90, 2004.

CONSOLI, N.C., CASAGRANDE, M.D.T., COOP, M.R. The Effect of Fiber-Reinforcement on the Isotropic Compression Behavior of a Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York, v.131, 2005-b.

CONSOLI, N.C., CASAGRANDE, M.D.T., COOP, M.R. Performance of fibre-reinforced sand at large shear strains. *Géotechnique*, London, v.57, n.00, p. 1-6, 2007-a.

CONSOLI, N.C., HEINECK, C.S., CASAGRANDE, M.D.T., COOP, M.R. Shear Strength Behavior of Fiber-Reinforced Sand Considering Triaxial Tests under Distinct Stress Paths. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York, v.133, n.11, p. 1466-1469, 2007-b.

DIAMBRA, A., RUSSELL, A. R., IBRAIM, E., MUIR WOOD, D. Determination of fibre orientation distribution in reinforced sands. *Géotechnique*, London, v.57, n.7, p. 623-628, 2007.

DONATO, M.; FOPPA, D.; CERATTI, J. A. P.; CONSOLI, N. C. Fibras de polipropileno como reforço para materiais geotécnicos. *Solos e Rochas*, São Paulo, ABMS/ABGE, v.27, n.2, p. 161-179, 2004.

DONATO, M. Medidas Diretas de Tensão em Solo Reforçado com Fibras de Polipropileno. Porto Alegre, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

FATANI, M.N.; BAUER, G.E.; AL-JOULANI, N. Reinforcing soil with aligned and randomly oriented metallic. *Geotechnical Testing Journal*, Philadelphia, v.14, n.1, p. 78-87, 1991.

FESTUGATO, L. . Análise do Comportamento Mecânico de um Solo Micro-Reforçado com Fibras de Distintos Índices de. Porto Alegre, 2008, 145p. Dissertação (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS

FEUERHARMEL, M.R. Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno. Porto Alegre, 2000. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

FREITAG, D.R. Soil randomly reinforced with fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, New York, v.112, n.8, p. 823-826, 1986.

GALÁN-MARÍN, C.; RIVERA-GÓMEZ,C.; PETRIC J. Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. *Construction and Building Materials*, Volume 24, Issue 8, p. 1462-1468, 2010.

GASSAN, J., BLEDZKI, A.K. Composites reinforced with cellulose based fibres, *Progress in Polymer Science*, v. 24, p. 221 – 274, 1999b.

GIRARDELLO, V. Ensaio de placa em areia não saturada reforçada com fibras 2010. 121p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre, 2010.

GRAY, D.H.; AL-REFEAI, T. Behavior of fabric versus fiber-reinforced sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, New York, v.112, n.8, p. 804-820, 1986.

GRAY, D.H.; OHASHI, H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, New York, v.109, n.3, p. 335-353, 1983.

GRAY, D.H.; MAHER, M.H. Admixture stabilization of sands with random fibers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION

ENGINEERING, 12., 1989, Rio de Janeiro, Proceedings... Rotterdam: A.A. Balkema, v.2, p.1363-1366, 1989.

GUELBERT, T.F; GUELBERT, M; CORREA, M; LESZCZYNSKI, S A.C; GUERRA, J.C. A embalagem pet e a reciclagem: uma visão econômica sustentável para o planeta. Enegep 2007.

HANNANT, L. Polymers and polymers composities. In: J.M. ILLSTON. Construction materials: their nature and behavior. 2ed., London: J.M. Illston/E & FN Spon, p.359-403, 1994.

HEAD, K. H. Manual of Soil Laboratory Testing, Vol 1, Soil Classification and Compaction Tests. London: Prentech Press, 339 p., 1980-a.

HEAD, K. H. Manual of Soil Laboratory Testing, Vol 2, Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests. London: Prentech Press, 402 p., 1980-b.

HEAD, K. H. Manual of Soil Laboratory Testing, Vol 3, Effective Stress Tests. London: Prentech Press, 495 p., 1980-c.

HEINECK, K.S. Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais. Porto Alegre, 2002. 251p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

HEINECK, K. S., CONSOLI, N. C., BICA, A., CASAGRANDE, M. D. T. Comportamento de Solos Micro-Reforçados a Pequeníssimas e Grandes Deformações Cisalhantes. Solos e Rochas. São Paulo - SP, ABMS/ABGE, v.26, n.1, p.3-17, 2003-a.

HEINECK, K. S.; CONSOLI, N. C. Discussion to Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil. Géotechnique, London, v.54, n.1, p.72-73, 2004.

HEINECK, K. S.; COOP, M.R.; CONSOLI, N.C. Effect of micro-reinforcement of soils from very small to large shear strains. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. New York, v.131, 2005.

HOARE, D.J. Laboratory study of granular soils reinforced with randomly oriented discrete fibres. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL REINFORCEMENT, 1979, Paris. Proceedings ... v.1, p.47-52, 1979.

HOLLAWAY, L. Polymers and polymer composites. In: Construction Materials; their nature and behavior. London: J. M. Illston/E. & F.N. Spon, 2ed., p.321-358, 1994.

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

LA ROCHELLE, P.; LEROUÉIL, S.; TRAK, B.; BLAIS-LEROUX, L. TAVENAS, F. Observational approach to membrane and area corrections in triaxial tests. In: SYMPOSIUM ON ADVANCED TRIAXIAL TESTING OF SOIL AND ROCK, 1988.

LADD, R. S. Preparing test specimens using undercompaction. *Geotechnical Testing Journal*, Philadelphia, v.1, n.1, p.16-23, 1978.

LI, Y.; MAI, YIU-WING; YE, LIN. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments, *Composites Science and Technology*, v. 60, p. 2037 – 2055, 2000.

LI, L.; MITCHELL, R. Effects of reinforcing elements on the behavior of weakly cemented sands. *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, v.25, n.2, p.389-395, 1988.

LINARDI, V.R. Produção de celulases pelo *Trichoderma viride* QM9414 (*T. reesei*, *simmons*, 1977) frente à variação de meios de cultura, substratos celulósicos e pH. Dissertação de Mestrado – Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1979.

MAHER, M.H.; GRAY, D.H. Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, New York, v.116, n.11, p.1661-1677, 1990.

MAHER, M.H.; HO, Y.C. Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads. *Geotechnical Testing Journal*, Philadelphia, v.16, n.3, p.330-338, 1993.

MAHER, M.H.; HO, Y.C. Mechanical properties of Kaolinite/fiber soil composite. *Journal of Geotechnical Engineering*, New York, v.120, n.8, p. 1381-1393, 1994.

MCGOWN, A.; ANDRAWES, K.Z.; AL-HASANI, M.M. Effect of inclusion properties on the behavior of sand. *Géotechnique*, London, v.28, n.3, p.327-346, 1978.

MCGOWN, A.; ANDRAWES, K.Z.; HYTIRIS, N. MERCER, F.B. Soil strengthening using randomly distributed mesh elements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 11., São Francisco, Proceedings... v.3, p.1735-1738, 1988.

METHACANON, P. WEERAWATSOPHON, U.; SUMRANSIN, N.; PRAHSARN,C.; BERGADO D.T. Properties and potential application of the selected natural fibers as limited life geotextiles. *Carbohydrate Polymers*, Volume 82, Issue 4, 11, p. 1090-1096, 2010.

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

MONTARDO, J.P. Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes. Porto Alegre, 1999. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

MONTARDO, J.P.; CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M. Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes. *Solos e Rochas*, São Paulo, ABMS/ABGE, v.24, n.3, p.191-209, 2002.

MOREL, J.C.; GOURC, J.P. Mechanical behaviour of sand reinforced with mesh elements. *Geosynthetics International*, Minnesota, v.4, n. 5, p.481-508, 1997.

MURRAY, J.J.; FROST, J.D.; WANG, Y. Behavior of a sandy silt reinforced with discontinuous recycled fiber inclusions. In: PROC. OF THE 79<sup>TH</sup> ANNUAL MEETING TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, Washington. 29p., 2000.



NATARAJ, M.S.; ADDULA, H.R.; MCMANIS, K.L. Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY, 3., San Diego, 1996. Proceedings... Pennsylvania: Technomic Publishing Co., Inc, v.1, p.826-835, 1996.

OLIVEIRA A.F. Avaliação de desempenho de fibras lignocelulósicas na sorção de óleos diesel e biodiesel. Botucatu, 2010, 123p. Tese - Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp.

OMINE, K.; OCHIAI, H.; YASUFUKU, N.; KATO, T. Effect of plastic wastes in improving cemented-treated soils. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY. Proceedings... Rotterdam, Balkema, p.875-880, 1996.

PALMEIRA, E.M. Evolução dos geossintéticos no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS. Geossintéticos 95... Palestras especiais, p.5-15, 1995.

PINTO, A.R.A.G. Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo. 2008. 103p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2008.

RANJAN, G.R.; CHARAN, H.D. Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.122, n.6, p.419-426, 1996.

RIBAS, F., Reciclagem de lixo – uma questão de sustentabilidade. Revista Científica. Ano I Vol. 01 N° 02 – janeiro-junho/2007.

RUDNIK, E.; BRIASSOULIS D. Degradation behaviour of poly(lactic acid) films and fibres in soil under Mediterranean field conditions and laboratory simulations testing. Industrial Crops and Products, Volume 33, Issue 3, p. 648-658, 2011

SANTONI, R.L.; TINGLE, J.S.; WEBSTER, S.L. Engineering Properties of sand-fiber mixtures for road construction. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.127, n.3, p.258-268, 2001.

SANTOS, A.P.S. Comportamento de misturas solo-cimento-fibra sob compressão confinada com medição de tensão lateral. Porto Alegre, 2004. 125p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

SANTOS, P.A. Efeito da Forma de Processamento e do Tratamento da Fibra de Curauá nas Propriedades de Compósitos com Poliamida-6. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 19, n. 1, p. 31-39, 2009.

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

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

SILVA, M.A.; BUENO, B.S.; LIMA, D.C. Estabilização de solos com inclusões curtas aleatórias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS, 2., 1995. *Geossintéticos 95...* p.327-335, 1995.

SIQUEIRA, G.A.F. Produção e Caracterização de Compósitos Fenólicos com Fibras de Sisal Modificadas. 2006. 92p. Dissertação de Mestrado – REDEMAT/Universidade federal de Ouro Preto, Ouro preto, 2006.

SKEMPTON, A.W. The pore-pressure coefficients A and B. *Géotechnique*, London, v.4, p.143-147, 1954.

SPECHT, L.P. Comportamento de misturas de solo-cimento-fibra submetidos a carregamentos estáticos visando à pavimentação. Porto Alegre, 2000. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

SPECHT, L.P.; HEINECK, K.S.; CERATTI, J.A.P.; CONSOLI, N.C. Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos. *Solos e Rochas*, São Paulo, ABMS/ABGE, v.25, n.1, p.15-34, 2002.

SPINACÉ M.A.S.; JANEIRO, L.G.; BERNARDINO F.C.; DE PAOLI M.A. Caracterização das fibras de sisal e de curauá visando aplicação em compósitos poliméricos. In: 32<sup>a</sup> Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, Fortaleza, 2009.

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

STAUFFER, S.D.; HOLTZ, R.D. Stress-strain and strength behavior of staple fiber and continuous filament-reinforced sand. Transportation Research Record, Washington, D.C., n.1474, p.82-95, 1996.

TANG, C.; SHI, B.; ZHAO L. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. Geotextiles and Geomembranes, Volume 28, Issue 1, p. 54-62, 2010.

TAPPI (Technical Association of Pulp and Paper Industry) Standard Method T212 om-98 – Tappi Test Methods, 1998.

TAPPI (Technical Association of Pulp and Paper Industry) Standard Method T13m-54 – Tappi Test Methods, 1991.

TAPPI (Technical Association of Pulp and Paper Industry) Standard Method T207 om-93 – Tappi Test Methods, 1993.

TAPPI (Technical Association of Pulp and Paper Industry) Standard Method T211om-93 – Tappi Test Methods, 1993.

TAPPI (Technical Association of Pulp and Paper Industry) Standard Method T222- om88 – Tappi Test Methods, 1988.

TAPPI (Technical Association of Pulp and Paper Industry) Standard Method T257- om85 – Tappi Test Methods, 1985

TAYLOR, G.D. Materials in construction. 2ed. London: Longman Scientific & Technical, 284p., 1994.

TEODORO, J.M.; BUENO, B.S. Estudo do comportamento dos solos reforçados com fibras plásticas de polipropileno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11, Brasília, 1998. Anais... v.2., p.1093-1100, 1998.

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

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

VAN IMPE, W.F.V. Soil improvement techniques and their evolution. Rotterdam, A.A. Balkema, 125p., 1989.

VENDRUSCOLO M.A. Análise numérica e experimental do comportamento de fundações superficiais assentes em solo melhorado. Porto Alegre, 1996. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

VENDRUSCOLO, M.A. Comportamento de ensaios de placa em camadas de solo melhoradas com cimento e fibras de polipropileno. 2003. 224p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre, 2003.

VIDAL, H. The principle of reinforced earth. Highway Research Record. Washington, D.C., NCR-HRB, n.282, p.1-16, 1969.

ZORNBERG, J.G. Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil. Géotechnique, London, v.52, n.8, p.593-604, 2002.