

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**MELHORIA DE SOLOS POR INCLUSÃO DE FIBRAS  
NATURAIS**

**KALIANA CRISTINA DOS SANTOS SALES**

**ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD**

**DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA**

**BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO/2011**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**MELHORIA DE SOLOS POR INCLUSÃO DE FIBRAS  
NATURAIS**

**KALIANA CRISTINA DOS SANTOS SALES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**ADRIANO ELÍSIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, DSc. (UFCG)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**BRASÍLIA/DF, 19 de DEZEMBRO de 2011.**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

SALES, KALIANA CRISTINA DOS SANTOS

Melhoria de Solos por inclusão de Fibras Naturais [Distrito Federal] 2011

xiv, 97p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2011)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil

1. Solos Tropicais

2. Fibras Naturais

3. Pavimentação

4. Cabelo Humano

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

SALES, K.C.S. (2011). Melhoria de Solos Por Inclusão de Fibras Naturais. Dissertação de Mestrado, Publicação GDM-203/2011, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97 p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Kaliana Cristina dos Santos Sales

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Melhoria de Solos por Inclusão de Fibras Naturais

GRAU / ANO: Mestre / 2011

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Kaliana Cristina dos Santos Sales

Rua Santa Rita, 178

CEP – 58.397-000 - Areia/PB – Brasil

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho ao que Deus me deu de mais precioso: minha família.*

*Aos meus pais Genival e Ana Lucia pela educação oferecida com muito esforço e por ensinar o real valor do amor, as minhas irmãs Ana Karla e Giovana exemplos de amizade e companheirismo, aos meus tios Leo e Gilda pelo apoio e abrigo, ao meu avô Manoel pelas palavras sábias e sinceras. Aos meus sobrinhos (as), cunhado, tios (as), avós e primos (as).*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me permitir chegar aonde cheguei, mesmo com todos os medos e insegurança não me deixou faltar à fé para continuar a perseguir os meus sonhos.

Aos meus pais Ana Lucia e Genival (Vavá), que diante das dificuldades financeiras me ensinaram o valor da educação, do respeito e do amor. De nada valeria cada obstáculo que passei se não existissem pais tão maravilhosos como vocês.

Agradeço as minhas irmãs Ana Karla e Giovana, por serem exemplos de vida e amizade e por acreditarem em minha vitória. Aos meus sobrinhos Pedrinho e Mariana, que nunca reclamaram da ausência de sua tia. E ao meu cunhado Douglas pelos fatos cômicos durante as discussões trágicas em família.

Ao meu orientador José Camapum de Carvalho, por ter sido mais que um professor, um exemplo de vida. Apesar de todos os meus erros, que não foram poucos, fui sempre recebida em sua sala com uma palavra positiva e com ensinamentos dignos de alguém com grande experiência, tenho certeza de que cada palavra ficará guardada em minha memória para sempre.

Ao Professor Gregório pelas palavras de confiança e determinação e principalmente por acreditar que eu chegaria ao final.

Aos laboratoristas Tiago, Vanílson e Ricardo pelo apoio e ajuda durante os ensaios.

Ao meu amigo de graduação Marcondes que às vésperas de seu casamento dedicou parte de seu tempo a me acompanhar ao laboratório e mesmo em lua de mel, me ajudou a corrigir e formatar minha redação, obrigado meu grande e eterno amigo.

A minha amiga Ivonne, por me emprestar seus ouvidos durante minhas crises de abandono e por estar do meu lado em todos os momentos desta pesquisa.

Aos meus companheiros de trabalho: Siglia, Tiago e Rogério que sempre estiveram dispostos a cobrir minha ausência durante as fugidas para ir à Universidade e por suas palavras de conforto e apoio nos momentos em que precisei decidir o melhor caminho, e a Isabelly por permitir que eu me ausentasse mesmo quando nosso departamento estava repleto de trabalhos acumulados.

Agradeço aos meus tios Léo e Gilda que me acolheram em sua casa durante um longo período quando cheguei à Brasília com uma mala cheia de sonhos e saudades. Aos meus primos, Tália, Danilo e Felipe por me emprestarem sua família para que não sentisse falta da minha. Aos meus tios Josy e Billy pelo carinho. Ao meu afilhado, João Luís, aos meus primos Lara, Caio e Ana Julia pelos sorrisos arrancados de mim.

Aos meus amigos Robinson, Bianka, Shirley, Georgia, Mauricio, Leandro, Pe. Adauto, Andreliza, Renata, Mylane, Lorena Dias, Marcio e Paula pela amizade e força nos momentos mais duros de minha vida.

Agradeço ao amigo e confidente, Guigo, pela paciência durante esses anos que me ausentei de nosso relacionamento, mas a distância só nos ensinou que o verdadeiro amor não acaba ele se renova a cada dificuldade.

Enfim, agradeço a todos que de forma direta e indireta contribuíram para que eu pudesse alcançar o sonho de me tornar mestre.

## RESUMO

A utilização de solos finos, mesmo os mais laterizados, muitas vezes não apresenta um comportamento necessário ao bom desempenho das estruturas de pavimento. Uma solução apresentada para a melhoria da resistência a tração do solo é a inclusão de fibras sintéticas ou vegetais. A incorporação de fibras pode ser considerada uma boa técnica de melhoria, dependendo da interação entre o solo e as fibras. Esta pesquisa propõe a realização de uma análise da melhoria do comportamento de uma argila profundamente intemperizada submetida a uma correção textural, para uso em estruturas de pavimento, através da inclusão de fibra natural (cabelo humano), substituindo o uso de fibras sintéticas ou vegetais. Para caracterização das fibras avaliou-se a geometria das fibras, o teor de umidade, a massa específica, seu índice de absorção e a resistência a tração. A produção das misturas de solo, areia e fibra foram compactadas em equipamento miniatura e submetidas a ensaios de sucção, mini-CBR, resistência a tração por compressão diametral, resistência a compressão simples e módulo resiliente. De uma forma geral a pesquisa permitiu avaliar que a adição da fibra natural utilizada como elemento de reforço para os solos tropicais corrigidos texturalmente, aumentou significativamente a resistência a tração dos solos, podendo estas misturas serem utilizadas em camadas de pavimentos.

## **ABSTRACT**

The use of fine soil, even the most lateritics, often does not present a behavior necessary for the good performance of pavement structures. One solution proposed to improve the tensile strength of soil is the inclusion of synthetic or vegetable fibers. The incorporation of fibers can be considered a good technique of improvement, depending of the interaction between the soil and the fibers. This research proposes the realization of an analysis of the performance improvement of deeply weathered clay submitted to a correct texture for use in pavement structures, through the inclusion of human hair, natural fiber, replacing the use of synthetic or vegetable fibers. For characterization of fibers was evaluate the geometry of the fiber, moisture content, density, absorption rate and the tensile strength. The production of mixtures of soil, sand and fiber have been compacted in the miniature equipment and submitted to test suction, mini-CBR, tensile strength by diametrical compression, resistance to simple compression and module resilient. In general, the research allowed to evaluate the addition of natural fiber used as reinforcement element for tropical soils texturally corrected, increased significantly the tensile strength of the soils, these mixtures can be used in layers of pavements.



## LISTA DE SIMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACOES

AAUQ – Areia Asfalto usinada a quente

CBR – California Bearing Ratio

D – Diâmetro (m)

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

FT – Resistência à tração

FS – Resistência de Aderência

GPa – Gigapascal

Iabs - Índice de Absorção

Kpa – Kilopascal

MP – Mistura Pura

MPa – Megapascal

MR – Módulo de Deformação Resiliente

Ms – Massa dos grãos

NBR - Norma Brasileira

P – Carga de Ruptura

Par – Peso ao ar

Pest – Peso seco em estufa

PET – Polietileno Tereftalato

PS – Peso seco do papel filtro

Pum- Peso úmido (após imersão)

PW- Peso úmido do papel filtro

SMA – Stone Matrix Asphalt (Matriz Pétreas Asfálticas)

T – Espessura (m)

Vs – Volume dos grãos

$\rho_s$  – massa específica real dos grãos

$\sigma_3$  – Tensão de confinamento

$\sigma_d$  – Tensão desvio

$\epsilon_r$  = deformação específica axial resiliente correspondente a um valor particular da tensão-desvio.

## INDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.1.1 OBJETIVOS GERAIS .....	2
1.1.2 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	2
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	3
2.1 PAVIMENTOS .....	3
2.1.1 MECANISMOS DE RUPTURA EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	4
2.1.2 DETERIORAÇÃO DAS CAMADAS DE PAVIMENTOS .....	5
2.1.2.1 TRINCAMENTO POR FADIGA .....	6
2.1.2.2 TRINCAMENTO POR CONSOLIDAÇÃO DAS CAMADAS INFERIORES.....	7
2.1.2.3 TRINCAMENTO LONGITUDINAL.....	7
2.1.2.4 TRINCAMENTO TRANSVERSAL .....	8
2.1.2.5 TRINCAS EM BLOCOS .....	8
2.1.2.6 TRINCAS POR FLEXÃO .....	8
2.2 SOLOS TROPICAIS.....	8
2.2.1 USO DE SOLOS TROPICAIS EM PAVIMENTAÇÃO.....	10
2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	11
2.3.1 ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA .....	11
2.4 CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCCÃO DE SOLOS .....	12
2.5 SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS.....	13
2.5.1 TECNOLOGIA DOS MATERIAIS COMPÓSITOS .....	14
2.5.2 INFLUÊNCIA DA INCLUSÃO DE FIBRAS NO SOLO.....	17
2.5.3 CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS.....	19
2.5.3.1 FIBRAS POLIMÉRICAS .....	19
2.5.3.2 FIBRAS MINERAIS.....	21
2.5.3.3 FIBRAS METÁLICAS .....	22
2.6 FIBRAS NATURAIS .....	22
2.6.1 CABELO HUMANO .....	24
2.6.1.1 TIPOS E FORMA DO CABELO HUMANO.....	26
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	28
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....	28
3.1.1 SOLO ARGILOSO .....	29

3.1.2	AREIA.....	29
3.1.3	FIBRAS.....	30
3.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	31
3.2.1	CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS.....	31
3.2.1.1	GEOMETRIA DAS FIBRAS .....	31
3.2.1.2	TEOR DE UMIDADE .....	32
3.2.1.3	MASSA ESPECÍFICA.....	32
3.2.1.4	ABSORÇÃO DO CABELO .....	33
3.2.1.5	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DAS FIBRAS .....	34
3.2.1.6	TENSÃO DE SORÇÃO.....	34
3.2.2	MISTURAS SOLO x FIBRAS .....	35
3.2.2.1	CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS MISTURAS.....	36
3.2.2.2	MINI- COMPACTAÇÃO.....	40
3.2.2.3	MINI - CBR .....	41
3.2.2.4	SUCÇÃO.....	43
3.2.2.5	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	46
3.2.2.6	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES.....	47
3.2.2.7	MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR).....	47
<b>4.</b>	<b>ANÁLISES DOS RESULTADOS.....</b>	<b>50</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS.....	50
4.2	MINI-COMPACTAÇÃO.....	55
4.3	CURVA CARACTERÍSTICA.....	59
4.4	MINI-CBR .....	62
4.4.1	MISTURA 1 (25% Areia + 75% Argila) - MP1 .....	62
4.4.2	MISTURA 2 (75% Areia + 25% Argila) - MP2 .....	64
4.4.3	MISTURA 3 (50% Areia + 50% Argila) - MP3 .....	66
4.5	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	69
4.6	MÓDULO RESILIENTE.....	80
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>91</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>93</b>

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1- Definição das misturas de solo.....	36
Tabela 4.1 - Resistência a Tração dos fios de Cabelo.....	50
Tabela 4.2 – Resultados obtidos no ensaio de compactação.....	55
Tabela 4.3 – Valores obtidos no ensaio triaxial cíclico da mistura MP1 .....	81
Tabela 4.4 – Valores obtidos no ensaio triaxial cíclico da mistura MP1+0,25.....	82
Tabela 4.5– Valores obtidos no ensaio triaxial cíclico da mistura MP1+0,50.....	82
Tabela 4.6 – Valores obtidos no ensaio triaxial cíclico da mistura MP2.....	85
Tabela 4.7 – Valores obtidos no ensaio triaxial cíclico da mistura MP3 .....	87
Tabela 4.8 – Valores obtidos no ensaio triaxial cíclico da mistura MP3+0,25.....	88

## LISTA DE FIGURA

Figura 2.1 – Seção transversal típica de um pavimento flexível.....	3
Figura 2.2 – Trincamento por fadiga.....	6
Figura 2.3 - Grau de severidade de trincas longitudinais: A- Baixo: trincas com abertura média inferior a 5 mm; B – Médio: trincas com abertura média entre 5 e 20 mm; C – Alto: trincas com abertura média superior a 20 mm (Matte, 2006). ....	7
Figura 2.4 – Trincas transversais (Matte, 2006).....	8
Figura 2.5 – Curvas características típicas (Gerscovich, 2001). ....	13
Figura 2.6 – Ruptura de uma matriz reforçada com fibras (Ferrante, 1996).....	15
Figura 2.7 – Disposição fibra/fissura (Taylor, 1994). ....	16
Figura 2.8 - Acréscimo da resistência em função da inclinação da fibra (modificado - Gray e Ohashi,1983 apud Specht, 2000).....	18
Figura 2.9 – Fibras de polipropileno. ....	20
Figura 2.10 - Fibras de amianto (Fonte: <a href="http://www.cgu.unicamp.br">www.cgu.unicamp.br</a> ).....	22
Figura 2.11 - Classificação das fibras (modificado - Person et al., 1984). ....	23
Figura 2.12 – Fibras vegetais. ....	24
Figura 2.13 – Esquema representativo da estrutura do cabelo e os componentes da cutícula e do córtex (Nogueira, 2003). ....	25
Figura 2.14 – Curva tensão x deformação típica de fibra de queratina. (A-B) região hookeana; (B-C) região de reconstituição; (C-D) região pós-reconstituição; (E) ponto de ruptura. (Bendit, 1967 apud Tucci, 1989).....	26
Figura 3.1 – Etapas da pesquisa. ....	28
Figura 3.2 – Local de Extração do Material Argiloso (Google Earth, 2010).....	29
Figura 3.3 – Curva Granulométrica da Areia. ....	30
Figura 3.4 - Corte dos fios de cabelo para incorporação nas amostras. ....	31
Figura 3.5 – Procedimento Experimental desenvolvido. a) corte das fibras; b) papel filtro umedecido com água; c) colocação do anel metálico para facilitar o contato entre o cabelo e o papel filtro úmido; d) amostras embaladas por um período de 15 dias até o final do ensaio. ..	33
Figura 3.6 – Determinação de Resistência a Tração dos Fios de Cabelo.....	34
Figura 3.7 – Determinação da Tensão de Sorção.....	35
Figura 3.8 – (a) Obtenção da Curva Granulométrica utilizando o granulômetro a laser; (b) Identificação e descrição de solos. ....	36
Figura 3.9 – Curva granulométrica do solo MP1. ....	37
Figura 3.10– Curva granulométrica do Solo MP2. ....	38
Figura 3.11 – Curva granulométrica do Solo MP3. ....	38
Figura 3.12 – Curvas granulométricas sem defloculante das misturas de solo estudadas. ....	38
Figura 3.13 – Curvas granulométricas com defloculante das misturas de solo estudadas.....	39
Figura 3.14 – Localização das Misturas no Gráfico pelo Método das Pastilhas.....	39
Figura 3.15 – Compactador da Metodologia MCT pertencente à Universidade de Brasília - UNB. ....	40
Figura 3.16 – Ensaio de miniCBR. ....	42

Figura 3.17 – MiniCBR com imersão. ....	43
Figura 3.18 – Tipos de fluxo do solo para o papel filtro (Marinho, 1995a).....	44
Figura 3.19 – Procedimentos utilizados no ensaio de sucção. ....	45
Figura 3.20 – Prensas automáticas e aplicação de tensões no ensaio de tração.....	46
Figura 3.21 – Ensaio de resistência a compressão simples .....	47
Figura 3.22 – Equipamento utilizado no Ensaio de Resiliência.....	49
Figura 4.1– Comportamento das fibras utilizadas.....	51
Figura 4.2 – Curva tensão-deformação das fibras.....	52
Figura 4.3 – Curva tensão-diâmetro das fibras. ....	52
Figura 4.4 – a) Tensão versus diâmetro do cabelo; b) força de tração versus diâmetro do fio de cabelo .....	53
Figura 4.5 – a) Força de tração versus tensão de sorção; b) força de tração versus peso específico úmido dos fios de cabelo.....	54
Figura 4.6 – a) Tensão de tração versus tensão de sorção; b) tensão de tração versus peso específico úmido dos fios de cabelo.....	54
Figura 4.7 – Curva de compactação da mistura MP1. ....	56
Figura 4.8 – Curva de compactação da mistura MP2. ....	56
Figura 4.9 – Curva de Compactação da Mistura MP3. ....	56
Figura 4.10 – Sucção versus Grau de Saturação – MP1. ....	57
Figura 4.11 – Sucção versus Grau de Saturação – MP2. ....	57
Figura 4.12 – Sucção versus Grau de Saturação – MP3. ....	58
Figura 4.13 – Sucção versus Grau de Saturação. ....	58
Figura 4.14 – Curvas Características Modificadas de (a) e (b) MP1 com e sem adição de fibras.....	60
Figura 4.15 – Curvas Características Modificadas de (a) e (b) MP2 com e sem adição de fibras.....	61
Figura 4.16 – Curvas Características Modificadas de (a) e (b) MP3 com e sem adição de fibras.....	61
Figura 4.17 – Mini-CBR com imersão (CI) para as misturas MP1 com e sem adição de fibras. ....	62
Figura 4.18 – Influência do peso específico da mistura MP1 com e sem adição de fibras nos resultados de miniCBR obtidos.....	63
Figura 4.19 – Mini-CBR sem imersão (SI) para as misturas MP1 com e sem adição de fibras em função de: (a) Teor de Umidade (%); (b) Peso Específico (KN/m <sup>3</sup> ); (c) pF; (d) pF/e. ....	64
Figura 4.20 – Mini-CBR com imersão (CI) para as misturas MP2 com e sem adição de fibras. ....	65
Figura 4.21 – Influência do peso específico da mistura MP2 com e sem adição de fibras nos resultados de miniCBR obtidos.....	65
Figura 4.22 – Mini-CBR sem imersão (SI) para as misturas MP2 com e sem adição de fibras em função de: (a) Teor de Umidade (%); (b) Peso Específico (KN/m <sup>3</sup> ); (c) pF; (d) pF/e. ....	66
Figura 4.23 – Mini-CBR com imersão (CI) para as misturas MP3 com e sem adição de fibras. ....	67

Figura 4.24 – Influência do peso específico da mistura MP3 com e sem adição de fibras nos resultados de miniCBR obtidos.....	67
Figura 4.25 – Mini-CBR sem imersão (SI) para as misturas MP3 com e sem adição de fibras em função de: (a) Teor de Umidade (%); (b) Peso Específico (KN/m <sup>3</sup> ); (c) pF; (d) pF/e. ....	68
Figura 4.26 – Resistência a Tração por Compressão Diametral das misturas (a)MP1; (b) MP1 +0,25% de fibra; (c) MP1 +0,50% de fibra.....	70
Figura 4.27 – Resistência a Tração por Compressão Diametral das misturas (a) MP2; (b) MP2 + 0,25% de fibra; (c) MP2 + 0,50% de fibra.....	71
Figura 4.28 – Resistência a Tração por Compressão Diametral das misturas (a) MP3; (b) MP3 + 0,25% de fibra; (c) MP3 + 0,50% de fibra.....	72
Figura 4.29 – Fase 1- Primeira resistência de pico; Fase 2 – Esforços sendo transferidos para as fibras; Fase 3- A tensão limite é atingida e o corpo de prova se rompe. ....	73
Figura 4.30 – Efeito das variáveis da mistura MP1 na resistência a tração da matriz de solo reforçada – (a) Tensão x umidade; (b) Tensão x e; (c) Tensão x pF; (d) Tensão x pF/e; (e) Deformação x pF; (f) Deformação x pF/e.....	74
Figura 4.31 – Efeito das variáveis da mistura MP2 na resistência a tração da matriz de solo reforçada – (a) Tensão x umidade; (b) Tensão x e; (c) Tensão x pF; (d) Tensão x pF/e; (e) Deformação x pF; (f) Deformação x pF/e.....	75
Figura 4.32 – Efeito das variáveis da mistura MP3 na resistência a tração da matriz de solo reforçada – (a) Tensão x umidade; (b) Tensão x e; (c) Tensão x pF; (d) Tensão x pF/e; (e) Deformação x pF; (f) Deformação x pF/e.....	76
Figura 4.33 – Recuperação da resistência a tração das misturas com adição de fibras em função de : (a) pF; (b)pF/e.....	77
Figura 4.34 – Resistência a tração das misturas com e sem adição de fibras em função de pF/e.....	77
Figura 4.35 – Resistência a Compressão Simples da mistura MP1 com e sem adição de fibras. ....	78
Figura 4.36 – Resistência a Compressão Simples da mistura MP2 com e sem adição de fibras. ....	78
Figura 4.37 – Resistência a Compressão Simples da mistura MP3 com e sem adição de fibras. ....	79
Figura 4.38 – Efeito das variáveis da mistura MP1 na resistência a compressão simples da matriz de solo reforçada – (a) Tensão x umidade; (b) Tensão x e; (c) Tensão x pF; (d) Tensão x pF/e.....	80
Figura 4.39– Variação do módulo resiliente com a tensão desvio da mistura MP1 com e sem adição de fibras.....	83
Figura 4.40 – Variação do módulo resiliente com a tensão confinante da mistura MP1 com e sem adição de fibras. ....	84
Figura 4.41 – Variação do módulo resiliente obtido no ensaio triaxial cíclico VS modelo universal da mistura MP1 com e sem adição de fibras. ....	84
Figura 4.42 – Ruptura das amostras MP2 com adição de fibras.....	85
Figura 4.43 – Variação do módulo resiliente com a tensão desvio da mistura MP2. ....	86

Figura 4.44 – Variação do módulo resiliente com a tensão confinante da mistura MP2.....	86
Figura 4.45 – Variação do módulo resiliente obtido no ensaio triaxial cíclico VS modelo universal da mistura MP2.....	87
Figura 4.46 – Variação do módulo resiliente com a tensão Confinante da mistura MP3 com e sem adição de fibras. ....	88
Figura 4.47 – Variação do módulo resiliente com a tensão desvio da mistura MP3 com e sem adição de fibras.....	89
Figura 4.48 – Variação do módulo resiliente obtido no ensaio triaxial cíclico VS modelo universal da mistura MP3 com e sem adição de fibras. ....	89
Figura 4.49 – Correlação entre o módulo resiliente e $pF/e$ . ....	90



A utilização de solos finos em estruturas de pavimento é uma alternativa técnica e economicamente viável e vem sendo utilizada desde a década de 50. Os solos lateríticos de granulação fina, principalmente os arenosos, passaram a serem utilizados em camadas de pavimentos, como reforço do subleito, sub-base e até mesmo base. Os solos finos, dependendo do nível de intemperização pelos quais passaram, podem apresentar baixa capacidade de suporte, elevada retração e expansão devido às variações de umidade, o que contribui para uma rápida deterioração da estrutura de pavimento. Quanto menor o grau de alteração sofrido pelo solo, mais propenso ele é a este tipo de comportamento. A laterização geralmente conduz o solo à maior estabilidade estrutural diante das variações de umidade, seja devido às alterações químico-mineralógicas, ou às próprias modificações estruturais geradas.

Os solos finos, mesmo os mais laterizados, em muitos casos não apresentam o comportamento necessário ao bom desempenho das estruturas de pavimento, surgindo assim a necessidade de melhorar a capacidade de suporte desses solos. Com esta finalidade, geralmente faz-se o uso da estabilização química por meio da incorporação de cal e/ou cimento como tratamento auxiliar no aumento da capacidade de suporte e na redução das variações volumétricas desses solos. Porém, apesar dos avanços, existe a dificuldade na homogeneização das misturas solo-cal e solo-cimento, além das mesmas não apresentarem uma significativa melhora na resistência à tração desses solos.

Uma solução apresentada para a melhoria da resistência a tração é a inclusão de fibras sintéticas ou vegetais que vem sendo estudada por diversos autores.

A incorporação de fibras pode ser considerada uma boa técnica de melhoria, dependendo da interação entre o solo e as fibras, visto que esta pode possibilitar a redução da fissuração, assim como o aumento da ductilidade do solo. Para a atuação das fibras faz-se necessário geralmente a presença de certa fração granular.

Esta pesquisa propõe a realização de uma análise da melhoria do comportamento dos solos para uso em estruturas de pavimento com a incorporação de cabelo humano ao solo substituindo o uso de fibras sintéticas ou vegetais. Com o uso da técnica pretende-se

minimizar os problemas de surgimento de trincas retardando a degradação das estruturas de pavimentos.

O uso dessa alternativa em estruturas de pavimento além de torná-las mais duráveis, contribui positivamente para a redução do processo de degradação ambiental, considerando que esses rejeitos apresentam hoje baixo índice de aproveitamento no Brasil,

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 OBJETIVOS GERAIS**

- Avaliar a utilização de fibras naturais como elemento de reforço em solos tropicais profundamente intemperizados utilizados na construção de estruturas de pavimento

### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Aumentar a resistência à tração dos solos, buscando a redução do processo de fadiga dos pavimentos;

- Analisar o efeito da correção textural dos solos por meio da incorporação de areia, de modo a permitir a atuação mais eficiente das fibras.

## **1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

A Dissertação segue estruturada em 5 capítulos incluída a introdução, conforme descrição sucinta a seguir:

No CAPÍTULO 2 apresenta-se a revisão bibliográfica que abrange os conceitos sobre pavimentação, mecanismos de ruptura e deterioração de suas camadas, bem como o uso de solos tropicais em pavimentação, estabilização e reforço de solos, tecnologia dos materiais compósitos, classificação e efeito da inclusão de fibras como reforço de solos e uma breve revisão sobre o uso de cabelo humano como fibra natural;

No CAPÍTULO 3 descreve-se os materiais utilizados e as metodologias utilizadas nos ensaios de laboratório;

No CAPÍTULO 4 são apresentados e discutidos os resultados das características das fibras utilizadas e propriedades mecânicas das misturas reforçadas com as fibras.

No CAPÍTULO 5 são registradas as conclusões quanto aos resultados obtidos e recomendações para estudos futuros nesta linha de pesquisa.

### 2.1 PAVIMENTOS

É uma estrutura que tem como principais funções favorecer uma superfície de rolamento capaz de atender os requisitos de conforto e segurança para o tráfego, nas diferentes velocidades operacionais das vias e ainda manter essas características acima de limites admissíveis (Gonçalves, 1999).

Segundo o DNER (Departamento Nacional de Estradas e Rodagem) atual DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de trânsito), o pavimento é uma estrutura construída por uma ou mais camadas destinada a ser econômica, resistir e distribuir os esforços verticais oriundos das cargas transmitidas pelos veículos, melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança dos usuários e resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável a superfície do rolamento.

Os pavimentos são divididos nas seguintes camadas (Fig. 2.1):

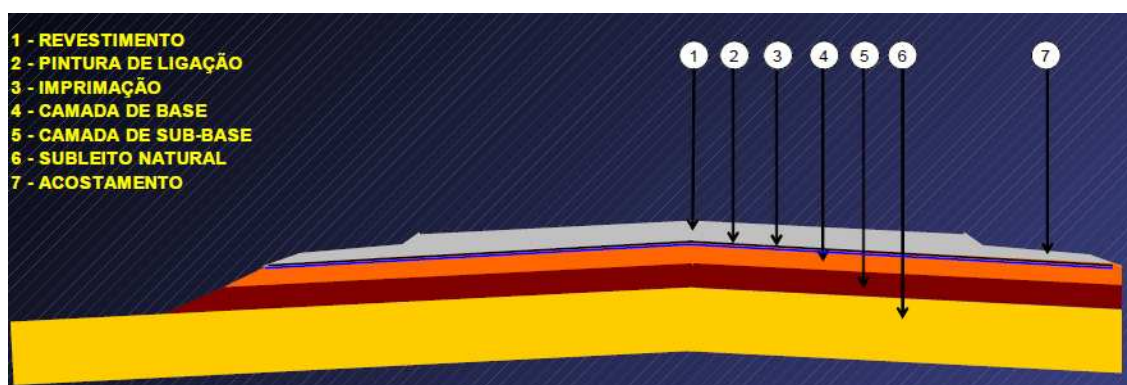


Figura 2.1 – Seção transversal típica de um pavimento flexível.

Considerando que diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o uso de fibras, sejam elas naturais ou sintéticas, com o objetivo de melhorar o desempenho das camadas dos pavimentos, serão abordados mais detalhadamente os conceitos das camadas citadas abaixo:

- a) Subleito: Terreno de fundação do pavimento;
- b) Regularização do Subleito: Operação destinada a conformar o leito estradal, transversal e longitudinalmente, obedecendo às larguras, cotas constantes no projeto de terraplenagem, compreendendo cortes ou aterros com até 20 cm de espessura (NORMA DNIT 137/2010- ES);
- c) Reforço do Subleito: Camada estabilizada granulometricamente, executada sobre o subleito devidamente compactado e regularizado, utilizada quando se torna necessário

reduzir espessuras elevadas da camada de sub-base, originadas pela baixa capacidade de suporte do subleito (NORMA DNIT 138/2010 – ES);

d) Sub-base: Camada de pavimentação, complementar à base e com as mesmas funções desta, executada sobre o subleito ou reforço do subleito, devidamente compactado e regularizado (NORMA DNIT 139/2010-ES);

e) Base: Camada de pavimentação destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os adequadamente à camada subjacente, executada sobre a sub-base, subleito ou reforço do subleito devidamente regularizado e compactado (NORMA DNIT 141/2010-ES);

f) Revestimento: Camada destinada a receber e a resistir aos esforços verticais e tangenciais do tráfego, escoar adequadamente as águas precipitadas sobre o pavimento e proporcionar conforto e segurança aos usuários.

Os pavimentos não são concebidos para durarem eternamente, mas para um determinado período de tempo ou “ciclo de vida”. Durante este ciclo o pavimento inicia sua vida em uma condição perfeita até alcançar uma condição ruim (Nakahara, 2005).

### **2.1.1 MECANISMOS DE RUPTURA EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Geralmente aponta-se como principal mecanismo de ruptura de pavimentos flexíveis, a fadiga do revestimento asfáltico sob a ação das cargas repetidas de tráfego, que se manifesta por meio do aparecimento de trincas longitudinais nas trilhas de roda e propaga-se pela superfície do pavimento na forma de trincas interligadas tipo couro de jacaré.

Victorino *et. al.*, (2004) assegura que o fenômeno da fadiga é definido como um processo de deterioração estrutural, que sofre um material quando submetido a um estado de tensões e de deformações repetidas do carregamento, ou seja, é a perda de resistência que o material sofre, quando solicitado repetidamente por uma carga.

De acordo com Souza (2004), os defeitos encontrados nos pavimentos podem ser classificados em dois tipos: defeito estrutural e defeito funcional. Sendo o primeiro definido como aquele que compromete a capacidade do pavimento de suportar as cargas oriundas do tráfego, ou seja, a estrutura do pavimento. Já o segundo é definido como aquele que compromete as boas condições de rolamento da via, ou seja, o conforto do usuário e a segurança quanto à derrapagem.

Os fissuramentos que ocorrem em pavimentos flexíveis podem ser apontados como exemplos de defeito estrutural. A maioria deles ocorre por falha de construção, de estrutura ou

de suporte, os quais contribuem para a destruição do pavimento por inteiro ou em pontos isolados. As fissuras que surgem em pavimentos são geralmente causadas por excesso de finos no revestimento asfáltico, má dosagem do ligante betuminoso e compactação excessiva e/ou com mistura muito quente (Matte, 2006) e muito fria.

O pavimento, enquanto estrutura, está sujeito às intempéries, e sofre com a sua ação. A precipitação e a radiação solar são dois elementos do clima que podem influir no desempenho do pavimento.

Medina (1997) afirma que o clima pode influenciar o comportamento do subleito quando: a água da chuva atinge o subleito pelos acostamentos, principalmente se não são revestidos, por meio de infiltração interceptada por drenos, de trincas e juntas não vedadas e de poros na superfície envelhecida; ocorre a oscilação do lençol freático, podendo promover variações da umidade do subleito; há movimento de água na forma de vapor, devido a gradientes de temperaturas diários e sazonais.

Em regiões tropicais, as variações climáticas diárias e sazonais bem como o uso de solos argilosos e siltosos nas camadas de base e sub-base constituem-se muitas vezes em causas de fissuras e trincas transversais e longitudinais em estruturas de pavimento apontando para o uso de fibras como uma das soluções a serem estudadas (Camapum de Carvalho, 2006 e Camapum de Carvalho e Gitirana, 2006).

## **2.1.2 DETERIORAÇÃO DAS CAMADAS DE PAVIMENTOS**

Devido à ação de cargas repetitivas do tráfego, as fissuras e/ou trincas existentes originalmente na base, são refletidas na camada do revestimento que, geralmente, é de Concreto Betuminoso Usinado a Quente. Ao longo do tempo estas fissuras sofrem alargamentos e erosão acentuada de suas bordas pelas intempéries e tráfego. A rápida evolução da erosão é explicada pela presença de água nas trincas e pela ação do sol na superfície das mesmas. Este fato produz, ao longo das trincas, uma rápida oxidação do ligante que, aliada ao efeito do tráfego, acelera o alargamento pelo “arrancamento” progressivo da parte superior das suas bordas (Villibor et al., 2005).

Existem vários tipos de defeitos que podem ser encontrados em pavimentos deteriorados como, por exemplo, as trincas, os afundamentos, a ondulação ou corrugação, o escorregamento, a exsudação, o desgaste, a panela ou buraco, entre outros. Nesta pesquisa as trincas serão abordadas de forma mais aprofundada que os demais defeitos encontrados nos

pavimentos, visto que as fibras utilizadas tendem a retardar o processo de trincamento das camadas do pavimento.

### 2.1.2.1 TRINCAMENTO POR FADIGA

Estas trincas ocorrem em áreas submetidas a cargas repetidas do tráfego ao ultrapassar a estimativa de projeto. Elas podem apresentar formas semelhantes a “couro de jacaré” ou “tela de galinheiro”, e apresentam distância inferior a 30 cm entre elas.

As principais causas de trincas por fadiga (Fig. 2.2) estão relacionadas a problemas estruturais (subleito, sub-base, base ou revestimento), ao comprometimento estrutural durante período de chuvas, espessura insuficiente do revestimento para suportar as cargas solicitantes e a contração da capa asfáltica em função da variação negativa da temperatura e aumento da rigidez do revestimento.

Segundo Villibor et al. (2005), este trincamento ocorre após o fenômeno do trincamento inicial. As cargas geradas pelo tráfego originam tensões de tração nas fibras inferiores dos blocos da base as quais, após certo número de repetições produzem, por fadiga, pequenas fissuras naqueles locais. Com o passar do tempo, as fissuras evoluem para trincas que, se propagando ao longo da espessura da camada de base, causam trincamento repetitivo na mesma. Este efeito de trincamento é devido às cargas repetitivas do tráfego, se propaga até a superfície do revestimento.



Figura 2.2 – Trincamento por fadiga.

### 2.1.2.2 TRICAMENTO POR CONSOLIDAÇÃO DAS CAMADAS INFERIORES

As cargas do tráfego e o aumento do teor de umidade em decorrência da água que infiltra pelas trincas pré-existentes no revestimento e na base pelas laterais, devido a trincas e/ou falhas no acostamento e pela elevação do nível do lençol freático nos períodos chuvosos, provocam nas camadas inferiores, pequenas consolidações que causam deformações permanentes nas mesmas. Em alguns subleitos, constituídos de solos colapsíveis, este fenômeno é mais acentuado e preocupante, pois causa consolidações que refletem, na superfície do pavimento, como afundamento nas rodeiras, com flexas que podem superar dois centímetros (Villibor et al, 2005).

### 2.1.2.3 TRINCAMENTO LONGITUDINAL

São as trincas predominantemente paralelas ao eixo da via e são diferenciadas através das trilhas de roda. Quanto maior a abertura, maior será o grau de severidade da trinca como mostra a Figura 2.3. Normalmente estas trincas são causadas por má execução das juntas entre duas superfícies de lançamento de concreto asfáltico ou devido a movimentos de contração e expansão do revestimento. As trincas longitudinais também podem ser atribuídas ao movimento de maciços terrosos ao longo do tempo, vertical ou horizontalmente, como a consolidação de aterros, adensamento de solos de fundação ou o escorregamento de encostas e morros.

Camapum de Carvalho (2006) e Camapum de Carvalho e Gitirana (2006) apresentam a expansão dos materiais de base, sub-base e subleito como a origem dessas trincas em revestimentos em AAUQ (Areia Asfalto Usinado a Quente) na Região Amazônica.

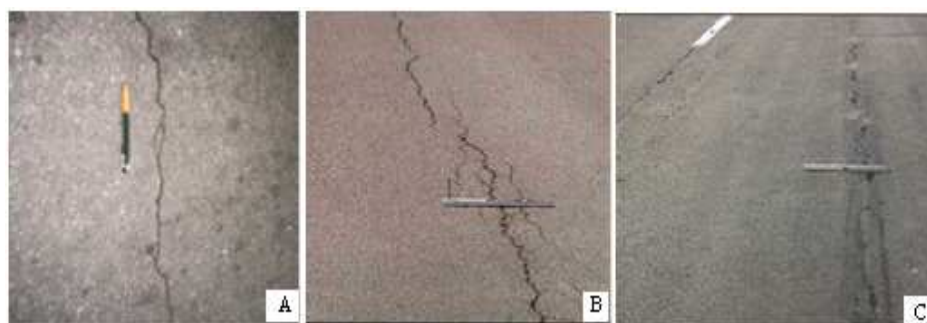


Figura 2.3 - Grau de severidade de trincas longitudinais: A- Baixo: trincas com abertura média inferior a 5 mm; B – Médio: trincas com abertura média entre 5 e 20 mm; C – Alto: trincas com abertura média superior a 20 mm (Matte, 2006).

#### **2.1.2.4 TRINCAMENTO TRANSVERSAL**

São trincas (Fig. 2.4) predominantemente perpendiculares ao eixo da via causadas por contração térmica do revestimento e contração hidráulica das outras camadas.



Figura 2.4 – Trincas transversais (Matte, 2006).

#### **2.1.2.5 TRINCAS EM BLOCOS**

São trincas que dividem o pavimento em blocos aproximadamente retangulares causadas por envelhecimento e contração térmica do revestimento asfáltico, bem como por contração de bases tratadas com cimento ou com utilização de solos tropicais.

#### **2.1.2.6 TRINCAS POR FLEXÃO**

São trincas isoladas não atribuídas aos fenômenos de fadiga e sim aos fenômenos de retração térmica ou do material do revestimento, ou ainda do material de base rígida ou semi-rígida subjacentes ao revestimento trincado.

### **2.2 SOLOS TROPICAIS**

De acordo com a conceituação proposta pelo Committee on Tropical Soils da International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering (1982-1985), os solos tropicais são aqueles que apresentam peculiaridades de propriedades e de comportamento, relativamente aos solos não tropicais, em decorrência de processos geológicos e/ou pedológicos, típicos das regiões tropicais úmidas. Conseqüentemente, para que um solo possa ser considerado como tropical não basta que sua formação seja da faixa astronômica tropical ou em região de clima tropical úmido. É indispensável que possua peculiaridades de interesse geotécnico (Nogami e Villibor, 1995).

Conforme Nogami e Villibor (1995), as diversas dificuldades em se abordar as peculiaridades dos solos tropicais reside na ausência de uma terminologia consagrada para



estes solos e a frequente utilização de metodologias de investigação oriundas de países com diferentes características do meio físico.

Na intenção de aprofundar os estudos referentes aos solos lateríticos para fins rodoviários e fundamentar uma metodologia de investigação para os solos tropicais Nogami e Villibor (1995), apresentaram várias peculiaridades dos solos tropicais, dentre elas:

a) Os solos lateríticos apresentam uma mineralogia relativamente simples, sendo o quartzo um mineral encontrado com muita frequência e, quase sempre, de maneira predominante nas frações de areia e pedregulho desses solos. O quartzo imprime ao solo propriedades e comportamentos decorrentes de suas peculiaridades, tais como o elevado módulo de elasticidade, elevada resistência à compressão e à estabilidade química. Outro mineral frequentemente encontrado nos solos superficiais lateríticos, sobretudo na fração pedregulho, é a laterita ou concreção laterítica, constituída essencialmente de óxidos hidratados de ferro e alumínio. A fração argila dos solos lateríticos caracteriza-se por apresentar elevada porcentagem de óxidos e hidróxidos de Ferro e Alumínio. O argilomineral geralmente presente na fração argila dos solos lateríticos é a caulinita.

b) Entendendo-se por fábrica a disposição espacial dos constituintes sólidos, dos vazios e das superfícies de descontinuidade dos solos e por macrofábrica, a fábrica observável a olho nu, a peculiaridade de macrofábrica mais característica dos solos lateríticos é a sua agregação ou estruturação.

c) Os solos lateríticos, do ponto de vista geotécnico, apresentam como peculiaridade mais notável a permanência da sua resistência, mesmo depois de saturados ou umedecidos. Esta particularidade dos solos lateríticos responde pela manutenção da elevada porosidade e permeabilidade destes solos, quando submetidos ao aumento de umidade por imersão ou molhagem. Além da permanência dos agregados ou torrões na fração areia dos solos, da resistência à compressão e ao cisalhamento acima da prevista pelos índices físicos tradicionais ainda existe a possibilidade de ser misturado com relativa facilidade, contribuindo para a uniformização do teor de umidade de compactação e da mistura de aditivos estabilizantes.

d) Os solos lateríticos apresentam a sua microestrutura, ou estrutura visível a microscópio, formada por grãos pouco individualizados, com contornos arredondados e indícios de vazios internos. Esta estrutura não é totalmente destruída a partir dos processos normais de construção de pavimentos, em virtude desta agregação ser suficientemente forte, de maneira a influir nos resultados dos ensaios utilizados nas classificações tradicionais.

## 2.2.1 USO DE SOLOS TROPICAIS EM PAVIMENTAÇÃO

O principal conceito frequentemente adotado em pesquisas de pavimentação e por Nogami e Villibor (1995) diz que solos tropicais são aqueles que apresentam comportamento e peculiaridades decorrentes de processos geológicos e/ou pedológicos típicos das regiões tropicais úmidas. Para então considerar-se um solo como tropical, não basta que este tenha sido formado em regiões de clima tropical úmido, este deve também apresentar peculiaridades de interesse geotécnico.

Os solos lateríticos são solos superficiais, típicos das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas, altamente intemperizados e lixiviados, constituindo horizontes pedológicos A e B, podendo atingir espessura de mais de uma dezena de metros e possuem predominância das cores vermelho ou amarelo.

Os primeiros trabalhos publicados sobre a utilização de solos lateríticos em pavimentação analisaram o uso desses materiais como subleito, reforço de subleito, sub-base e base, utilizando-os isoladamente ou em misturas com brita, cimento, cal, ou ainda com fibra (Dias, 2007).

Os solos finos lateríticos foram utilizados pela primeira vez em vias pavimentadas em 1967 em dois trechos como variantes de trânsito na via Washington Luís (SP-310), nas proximidades de Araraquara, no interior do estado de São Paulo (Correa et al., 1972 apud Nogami e Villibor, 1995). Essas variantes foram revestidas com tratamento superficial simples e teriam de funcionar apenas por 3 meses e meio, até a construção do trecho definitivo. Todavia após o término desse prazo, constatou-se que as variantes estavam em perfeitas condições, fato que incentivou a construção de novos trechos experimentais com uso do tipo de base considerada.

Após 30 anos, muitas destas estradas estão ainda em excelentes condições. Parte delas recebe mais de dois mil veículos por dia, sendo 30% de ônibus e caminhões.

O uso de solos lateríticos tropicais como material de construção para estradas permite mais ou menos 50% de redução no custo associado a sua utilização em camadas de bases ou sub-bases, ou mais de 25% quando é tratado com cimento. Entretanto, não são todos os tipos de solos tropicais apropriados para o uso, como base estabilizada ou sub-base. Há somente alguns tipos de solos lateríticos que têm as propriedades mecânicas e hidráulicas desejáveis, que garantem o bom desempenho e um período de vida longo (Bandeira; Merighi, Fortes, 2008).

Os materiais finos são mais sensíveis a variações de umidade, o que acarreta uma perda da capacidade de suporte devido à infiltração de água, o que pode ser considerado um problema em regiões caracterizadas por altos índices pluviométricos (Bento, 2006).

## **2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS**

Define-se estabilização dos solos como sendo o processo pelo qual se confere ao solo uma maior resistência estável às cargas, ao desgaste ou à erosão, por meio de compactação, correção da sua granulometria e de sua plasticidade, ou de adição de substâncias que lhe confirmam uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos grãos (Vargas, 1977).

Para Palmeira (1990) estabilizar ou reforçar um solo é utilizar algum meio físico ou químico com a intenção de melhorar as condições de solo. O reforço está associado a inclusões no interior da massa de solo por modificações na sua própria estrutura.

Villibor (1982) garante que a estabilização do solo pode ser compreendida como sendo a alteração de qualquer propriedade do mesmo, que melhore seu comportamento sob o ponto de vista de aplicação na engenharia.

O processo de estabilização de um solo é utilizado quando se deseja melhorar as características do mesmo. Existem vários métodos de se estabilizar um solo, entre eles podem-se citar as misturas granulométricas, o uso de geossintéticos, a inclusão de fibras naturais e/ou artificiais e o uso de aglomerantes como cimento e cal.

Segundo Bento (2006) a estabilização dos solos pode ser obtida por meio de várias técnicas, dividida em dois grupos, o primeiro grupo utiliza meios mecânicos, por meio da adição ou subtração de certas quantidades das frações constituintes, e o segundo, emprega meios químicos utilizando aditivos orgânicos ou inorgânicos, tais como os materiais betuminosos, resinas, cal, cimento e outros.

### **2.3.1 ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA**

A estabilização granulométrica ou mecânica consiste na combinação e manipulação de solos, em proporção adequada, de forma a obter um produto final de estabilidade maior que os solos de origem, e adequado para a aplicação em cada caso particular (Villibor, 1982).

Vargas (1977) afirma que muitas vezes não é possível uma simples correção de um material a ser utilizado, mas dispõe-se de solos em que predominam pedregulhos, areias ou siltes e argilas. Então é necessária a composição artificial de solo estabilizado, usando a

proporção adequada de cada um deles e sua mistura, a fim de obter a granulometria final desejada.

A estabilização granulométrica tem sua maior aplicação na área de estradas e atualmente especificamente na área de pavimentação. Uma das primeiras técnicas desenvolvidas para estabilizar os solos destinados a pavimentação foram misturas de areia com argila. Estas técnicas foram desenvolvidas com a intenção de melhorar as vias utilizadas para transporte.

Uma das maiores aplicações de estabilização granulométrica está na execução de base de pavimentos. Elas podem ser constituídas de materiais granulares diversos, tais como britas, pedregulhos, areias, etc., enquanto que as sub-bases podem ser constituídas de materiais mais pobres e mais fáceis de serem adquiridos nas imediações das obras (Villibor, 1982).

## **2.4 CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCCÃO DE SOLOS**

Define-se como curva característica a relação entre a água presente nos poros e a sucção de um solo. Este volume de água pode ser quantificado em termos de teor de umidade volumétrico ( $q$ ), definido como a relação entre o volume de água e o volume de total, e teor de umidade gravimétrico ( $w$ ), cuja magnitude é obtida em função da relação entre pesos de água e de sólidos, ou em termos do grau de saturação. Para altos valores de sucção (acima de 1500kPa) a sucção mátrica e a total podem ser consideradas equivalentes (Fredlund e Xing, 1994). A sucção mátrica é estabelecida pela diferença entre as pressões de ar e de água, e ao ser incorporada a parcela de sucção osmótica, trabalha-se com sucção total.

Dentre as diversas formas de se definir curva característica de retenção de água, a mais utilizada é aquela que relaciona teor de umidade gravimétrico com a sucção mátrica, esta geralmente representada em escala logarítmica. O formato desta depende do tipo de solo, da distribuição e tamanhos dos vazios e, conseqüentemente, da distribuição das frações granulométricas presentes no solo. Solos arenosos tendem a apresentar perda brusca de umidade quando a sucção ultrapassa um determinado valor, o valor da pressão de entrada de ar nos poros; em contrapartida, solos argilosos tendem a apresentar curvas mais suaves (Gerscovich, 2001), porém com pressões de entrada de ar mais elevadas. Estes comportamentos estão geralmente atrelados à distribuição dos poros. As distribuições de poros bem graduadas conduzem a variações gradativas da sucção com o teor de umidade. Já a distribuição de poros mais uniformes geralmente conduz a curvas mais horizontalizadas. Nos solos tropicais, porém, as curvas características fogem a estes formatos gerais e isso também se dá devido à distribuição de poros que é nestes solos marcada pela presença de macro e

microporos passando a dar origem a modelos de curva características do tipo intitulado bimodal (Camapum de Carvalho e Leroueil 2004).

O conhecimento da curva característica de um solo é de fundamental importância para as obras e projetos de engenharia, permitindo prever seu comportamento com a variação de umidade, expansão e demais parâmetros, uma vez que esses influenciam diretamente na sucção mátrica. A maioria dos autores apresenta a curva característica com os valores de unidade de pressão em função do teor de umidade gravimétrica ou volumétrica ou do grau de saturação (Bento, 2006).

O formato da curva característica depende do tipo de solo, tamanho e distribuição dos vazios e, conseqüentemente, da distribuição das frações granulométricas. Solos arenosos tendem a apresentar aumento brusco de sucção quando a umidade cai abaixo de um certo valor; em contrapartida, solos argilosos tendem a apresentar curvas mais suaves. Comportamento semelhante é observado quando se comparam curvas características de solos uniformes e solos bem graduados (Gerscovich, 2001).

A Figura 2.5 apresenta curvas características típicas para areias e argilas, além de definir os parâmetros mais importantes relativos a esta função.

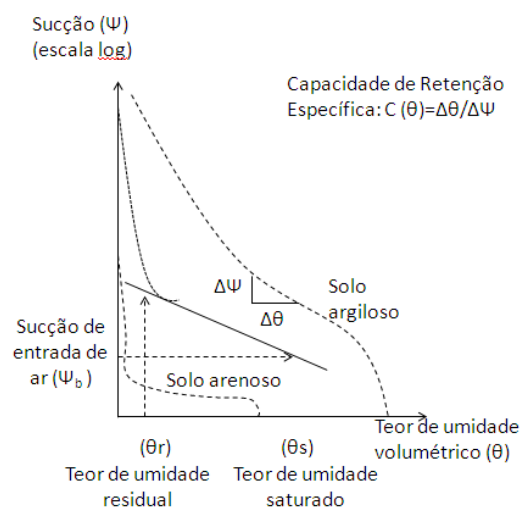


Figura 2.5 – Curvas características típicas (Gerscovich, 2001).

## 2.5 SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS

O reforço de solos com fibras é uma técnica muito conhecida e empregada pelo homem. As muralhas da Mesopotâmia (1440 a.C.), existentes ainda hoje, foram construídas empregando-se camadas intercaladas de solos e mantas de raízes. Indícios do emprego desta

técnica também são encontrados em partes da Grande Muralha da China (Figura 2.7) e em estradas construídas pelos Incas, no Peru, por meio do emprego de lã de Lhama como reforço. Uma das aplicações que mais se aproxima de um geossintético dos dias atuais foi à utilização de mantas de algodão pelo Departamento de Estradas da Carolina do Sul – EUA, em 1926, como reforço de camadas asfálticas em pavimento (Palmeira, 1992).

Segundo Gray e Ohashi (1983) (apud Casagrande 2001) a técnica do reforço de solos com fibras, nos moldes que se tem hoje, passou a ser investigada há pouco mais de três décadas. A técnica inicialmente desenvolvida enfocava o reforço de solos através de inclusões aleatoriamente distribuídas dentro de uma massa de solo, onde se procurava avaliar o efeito de raízes de plantas na resistência ao cisalhamento dos solos e na estabilidade de taludes.

Os materiais fibrosos foram desenvolvidos, produzidos e utilizados inicialmente na indústria da construção civil. Porém, seu grande desenvolvimento nas áreas de engenharia mecânica, aeroespacial, aeronáutica e bélica se deu a partir da segunda Guerra Mundial, sendo por isso a maior parte das pesquisas realizadas com base em matrizes metálicas e poliméricas (Kern, 1999 apud Bento, 2006).

Atualmente um grande número de novos materiais tem sido desenvolvido, geralmente baseado em materiais tradicionais, mas incorporando de alguma forma elementos de reforço. Para tanto é necessário que se conheçam as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais de constituição e como eles podem ser combinados. Estes novos materiais são chamados materiais compósitos (Casagrande, 2001).

Para se fazer uso da técnica de inclusão de fibras no solo é necessário conhecer a tecnologia dos materiais compósitos a qual determina a melhor interação do solo com a fibra utilizada.

### **2.5.1 TECNOLOGIA DOS MATERIAIS COMPÓSITOS**

Os materiais compósitos são aqueles formados pela combinação de dois ou mais materiais, constituindo um conjunto polifásico que apresenta duas fases básicas: as fibras e a matriz em que as mesmas estão incluídas, sendo as propriedades do conjunto superior a de seus componentes em separado. Sendo um material heterogêneo, o constituinte descontínuo, no caso as fibras, oferecem a resistência ao esforço externo, e o constituinte contínuo, no caso a matriz, oferece o meio de transferência para esse esforço (Bento, 2006).

Segundo Higgins (1982), a matriz possui três funções principais que são: proteger a superfície da fibra de danos por abrasão, os quais levariam a fratura; aderir à superfície da

fibra de tal forma que a força aplicada seja transferida a mesma; e separar as fibras entre si de maneira que as trincas transversais não possam se propagar de uma fibra para a sua vizinha.

Em materiais sem a adição de fibras, quando surge a primeira fissura, sua abertura progressiva dá origem ao colapso da matriz. Porém, em compósitos com a presença de fibras em sua composição, essa fratura é retardada. A ruptura torna-se um processo progressivo, como mostra a Figura 2.6, pois as pontes de transferências formadas pelas fibras absorvem parte das solicitações e originam uma fissuração mais distribuída.

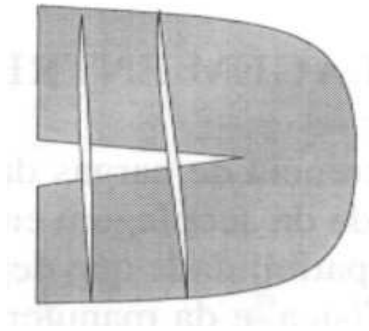


Figura 2.6 – Ruptura de uma matriz reforçada com fibras (Ferrante, 1996)

Para Taylor (1994), as fibras não impedem a formação de fissuras no compósito, mas são capazes de aumentar a resistência à tração pelo controle da propagação de fissuras.

As fibras mantêm as interfaces das fissuras juntas, beneficiando as propriedades mecânicas no estado pós-fissuração, ou seja, aumentando a ductilidade. As fibras que “atravessam” as fissuras contribuem para o aumento da resistência, da deformação de ruptura e da tenacidade dos compósitos (Hannant, 1994).

Taylor (1994) resume os principais parâmetros relacionados com o desempenho dos materiais compósitos cimentados, são eles:

- a) Teor de Fibras: para um alto teor de fibras, maior será a resistência pós fissuração e menor dimensão das fissuras;
- b) Módulo de Elasticidade da Fibra: quanto maior o módulo de elasticidade, maior será a probabilidade de ocorrer o desprendimento das fibras;
- c) Aderência entre a Fibra e a Matriz: as características de resistência, deformação e padrões de ruptura de uma grande variedade de compósitos cimentados reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz. Uma alta aderência entre a fibra e a matriz reduz o tamanho das fissuras e amplia sua distribuição pelo compósito;

d) Resistência da Fibra: a resistência necessária para um fibra dependerá, na prática, das características pós-fissuração necessárias, bem como do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz;

e) Comprimento da fibra: quanto maior o comprimento das fibras, menor será a possibilidade delas serem arrancadas. Para uma dada tensão de cisalhamento superficial aplicada à fibra, esta será melhor utilizada se o seu comprimento for suficientemente capaz de permitir que as tensões cisalhantes desenvolvam uma tensão de tração semelhante à sua resistência a tração.

Ilston (1994) e Taylor (1994) apresentaram o equacionamento do equilíbrio de forças idealizado no momento em que a fibra é solicitada no compósito, como demonstra a Figura 2.7. Nesta hipótese as fibras estariam paralelas entre si e perpendiculares a fissura. Torna-se evidente a importância não apenas do comprimento da fibra, mas também do diâmetro. A relação  $L/d$  ou índice aspecto, como é conhecido, é proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra e a resistência da aderência fibra/matriz, onde o “L” é o comprimento e o “D” é o diâmetro da fibra (Eq. 2.1).

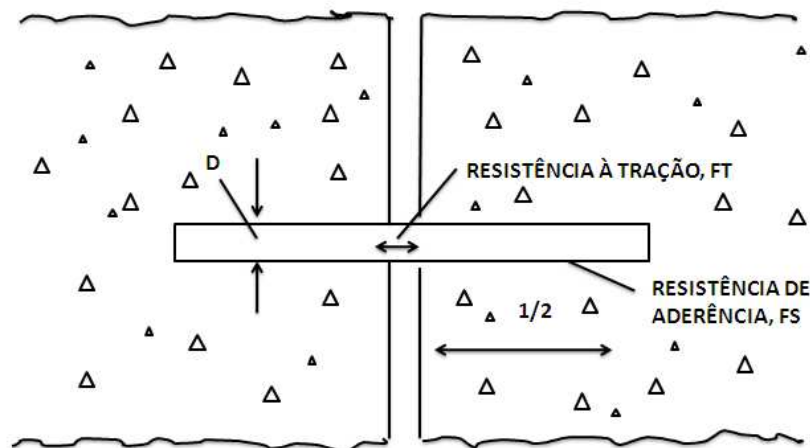


Figura 2.7 – Disposição fibra/fissura (Taylor, 1994).

$$\frac{\pi D^2}{4} \times FT = \pi D \times \frac{1}{2} \times FS \quad (2.1)$$

$$\frac{1}{D} = \frac{FT}{2FS}$$

Onde: D (diâmetro), FT (resistência à tração) e FS (resistência de aderência).

Em grande parte, a tecnologia dos materiais compósitos depende desta simples equação; se a fibra tem uma alta resistência à tração, como por exemplo, o aço, então, a



resistência de aderência necessária deverá ser alta para impedir o arrancamento antes que a resistência à tração seja totalmente mobilizada, ou fibras de alta relação L/D deverão ser atualizadas (Taylor, 1994).

Casagrande e Consoli (2006) avaliaram o comportamento das fibras dentro de uma matriz de solo arenosa e concluíram que a deformabilidade das fibras é o principal ponto que assegura o aumento de resistência quando submetido a grandes deformações. As fibras neste caso são micro-ancoradas nas partículas de solo e a sua grande deformação aumenta o ângulo de atrito.

## **2.5.2 INFLUÊNCIA DA INCLUSÃO DE FIBRAS NO SOLO**

Na fase de compactação pode ser detectado o primeiro efeito provocado pela inclusão de fibras ao solo, por meio do aumento no índice de vazios deste, mantendo-se constante a energia de compactação. Este efeito pode ser mais ou menos pronunciado dependendo do atrito desenvolvido entre solo e reforço.

Hoare (1979) demonstrou por meio de ensaios de compactação que a inclusão de fibras aleatoriamente distribuídas em um solo arenoso, mantendo-se a energia de compactação constante, ocasiona um aumento de sua porosidade, sendo este aumento proporcional à quantidade de fibras. Observou-se também que este efeito não é alterado pelo método de compactação e se dá com maior ou menor intensidade dependendo do tipo de fibra. Sob essas condições, o autor classifica a interação entre o solo e o reforço como um fator muito importante na fase de compactação da mistura. Isto inclui fatores tais como a distribuição granulométrica, o formato das partículas do solo, a textura superficial do reforço e sua superfície específica. Esta última controla a área efetiva do reforço sobre a qual se desenvolvem os esforços de adesão com a matriz (Casagrande, 2001).

As fibras somente passam a exercer uma ação efetiva dentro da massa de solo quando ele é submetido a esforços externos e 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 (MacGown apud Casagrande 2001).

A técnica de reforço, alvo de grande parte dos trabalhos mais recentes é o emprego de fibras discretas aleatoriamente distribuídas, por possuir 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 e Gray, 1990).

As características almeçadas com a inclusão de fibras nem sempre dizem respeito a um aumento da capacidade de suporte do material. Vários outros aspectos, como maior capacidade de absorção de energia (maior resistência ao impacto), queda na redução de resistência pós-pico (para o caso de materiais mais frágeis), maior capacidade de absorver deformações até atingir a resistência última, entre outros, são exemplos disso (Fig. 2.8).

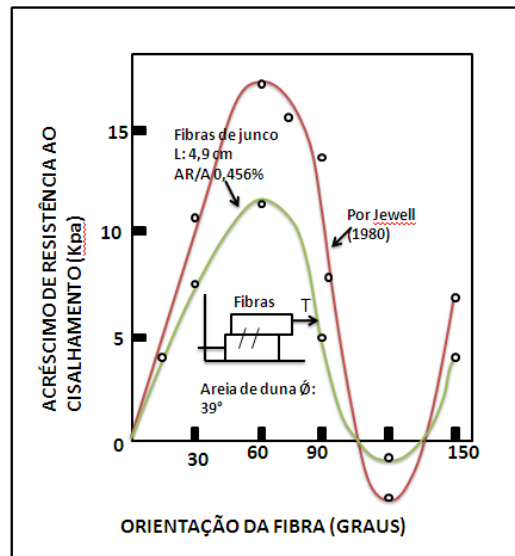


Figura 2.8 - Acréscimo da resistência em função da inclinação da fibra (modificado - Gray e Ohashi, 1983 apud Specht, 2000).

Para tensões confinantes baixas, a inclusão de fibras afeta a parcela friccional da resistência. Para tensões maiores existe um ponto que define uma clara mudança no mecanismo de interação solo-fibra a partir da qual a parcela friccional atinge o mesmo patamar do solo sem reforço, correspondendo à alteração de comportamento somente a 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 a tração da fibra. Abaixo da tensão crítica, a resistência última à tração da fibra é maior e a forma de ruptura nas zonas de cisalhamento do material compósito se dá por deslizamento entre solo e fibra (Maher e Gray, 1990).

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

Um estudo feito por Machado et al., (1998) analisou o comportamento da mistura solo-cimento reforçada com fibra sintética, com base nos ensaios de CBR e compressão simples, visando seu emprego em estradas florestais. No experimento, trabalhou-se com um solo arenoso (saprólito de gnasse), cimento Portland no teor de 2% e 4%, fibras de polipropileno no qualitativo de 0,5% e comprimento variável considerando-se as energias de compactação dos ensaios Proctor Normal e Intermediário, e concluiu que o uso da mistura solo-cimento reforçado com fibra sintética obteve um acentuado índice de CBR, e a expansibilidade da mistura e do solo natural praticamente se mantiveram inalterados, ou seja, a adição das fibras à mistura melhora as características mecânicas do solo.

### **2.5.3 CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS**

Existe uma ampla variedade de fibras utilizadas em compósitos fibrosos. As características de comportamento de cada uma delas, as propriedades físicas, químicas e mecânicas, que por sua vez irão afetar o comportamento do material compósito, estão intimamente relacionadas ao material do qual são compostas e ao seu processo de fabricação. Portanto, a compreensão do mecanismo de interação matriz-reforço e da parcela de contribuição de cada uma das fases no comportamento do material compósito como um todo é fundamental para a definição do tipo de fibra a ser empregado. Esta definição dependerá fundamentalmente das características da matriz a ser reforçada e das características desejadas do material compósito resultante (Casagrande, 2001).

As fibras podem ser classificadas em quatro grandes classes: poliméricas, minerais, metálicas e naturais. Será feita uma breve abordagem dos diferentes tipos de fibras citados anteriormente.

#### **2.5.3.1 FIBRAS POLIMÉRICAS**

Os polímeros, de acordo com sua estrutura química, apresentam diferentes denominações e comportamentos, dando origem a diferentes tipos de fibras.

Atualmente várias fibras de origem polimérica vêm sendo empregadas como reforço de solos, entre elas estão às fibras de polipropileno, fibras de polietileno, fibras de poliéster e as fibras de poliamida.

##### **a) Fibras de Polipropileno**

As fibras de polipropileno são constituídas de um tipo de material que adquire uma consistência plástica com o aumento da temperatura, denominado termoplásticos. São

constituídos por séries de longas cadeias de moléculas polimerizadas, separadas entre si de forma que podem deslizar umas sobre as outras (Hollaway, 1994).

Segundo Taylor (1994), esta característica explica a grande flexibilidade e tenacidade das fibras de polipropileno e concede substancial aumento da resistência ao impacto aos materiais a que é incorporado. O módulo de elasticidade é menor do que qualquer outra fibra comumente utilizada, aproximadamente 8 GPa. Esta propriedade não a recomenda para ser utilizada com a finalidade de aumentar a resistência pré-fissuração ou rigidez dos materiais. Fibras de polipropileno são resistentes a uma variedade de produtos químicos e aos álcalis (Fig. 2.9).



Figura 2.9 – Fibras de polipropileno.

b) Fibras de Polietileno

As fibras de polietileno de peso molecular normal têm um módulo de elasticidade baixo, é fracamente aderida à matriz cimentada e são altamente resistentes aos álcalis. Contudo, polietileno com alta densidade tem sido desenvolvido para aumentar o módulo e a aderência com a matriz. Como não sofrem variação volumétrica na presença da água, a durabilidade dos produtos é alta, mas apresentam maiores deformações de fluência quando comparadas com as fibras de polipropileno (Hannant, 1994).

c) Fibras de Poliéster

A aparência das fibras de poliéster é similar as fibras de polipropileno, mas são mais densas, mais rígidas e mais resistentes. Elas podem ser utilizadas para as mesmas aplicações que as de polipropileno, mas a melhora no desempenho justifica o seu maior custo (Taylor, 1994). O material utilizado para confecção de garrafas plásticas de refrigerantes e água é um poliéster bastante conhecido, o polietileno tereftalato (PET).

d) Fibras de Poliamida

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 estiradas e reforçadas durante o processo de manufatura, altas resistências e módulos de elasticidade podem ser alcançados, como é o caso do Kevlar (Taylor, 1994). As fibras Kevlar são fibras orgânicas comerciais que apresentam maior sucesso devido a sua alta resistência mecânica e módulo de elasticidade que varia de 64 a 300GPa, dependendo do tipo escolhido.

Apesar dos polímeros e seus derivados terem contribuído de maneira grandiosa para o desenvolvimento tecnológico mundial, o uso contínuo destes materiais tem trazido preocupações para a sociedade. Isto se deve ao fato de que estes materiais, em sua grande maioria, apresentam baixa reciclabilidade e grande poder cumulativo na biosfera, particularmente devido a sua baixa biodegradabilidade e origem não renovável (petróleo).

### **2.5.3.2 FIBRAS MINERAIS**

Dentre as fibras minerais as mais conhecidas são as de carbono, amianto e vidro.

a) Fibras de Carbono

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

b) Fibras de Vidro

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

c) Fibras de Amianto

As fibras de amianto (Fig. 2.10) apresentam resistência à tração em torno de 1000 MPa e módulo de elasticidade em torno de 160 GPa, e apresentam uma ótima aderência com

uma matriz composta por cimento. Seu diâmetro é muito pequeno, da ordem de 1  $\mu\text{m}$  (Taylor,1994).

Esta fibra quando cortada libera partículas muito pequenas, em função do seu reduzido diâmetro, que danificam os alvéolos pulmonares se aspiradas pelo homem. Em função disso a sua utilização na construção civil é proibida em muitos países (Casagrande, 2001).



Figura 2.10 - Fibras de amianto (Fonte: [www.cgu.unicamp.br](http://www.cgu.unicamp.br)).

### **2.5.3.3 FIBRAS METÁLICAS**

As fibras metálicas mais comuns são as de aço. Sua resistência a tração é de aproximadamente 200 GPa. Dependendo do meio onde estão inseridas, apresentam problemas relacionados à corrosão. Uma técnica utilizada para minimizar tal problema é o banho de níquel (Taylor, 1994).

## **2.6 FIBRAS NATURAIS**

As fibras naturais foram as primeiras a serem empregadas como reforço na história da humanidade, sendo sua maioria de origem vegetal, destacando-se o bambu, juta, coco, linho e sisal, sendo essa mais utilizada devido a sua alta tenacidade e resistência. Porém, apresentam durabilidade pequena e são afetadas pela umidade ambiente. Como possuem a característica de alta absorção de água, colaboram para que ocorra fissuração devido à retração diferencial.

Sendo as fibras naturais de grande abundância no Brasil, os esforços se direcionaram para as fibras de coco e sisal, a partir das quais foram desenvolvidos materiais tais como telhas, calhas e pequenas caixas d'água.

As fibras podem ser divididas em dois grupos principais, as fibras naturais e fibras feitas pelo homem (Fig. 2.11). As fibras naturais de origem animal compreendem o pêlo de animais, a seda e o cabelo, podendo-se incluir neste grupo as penas de pássaros.

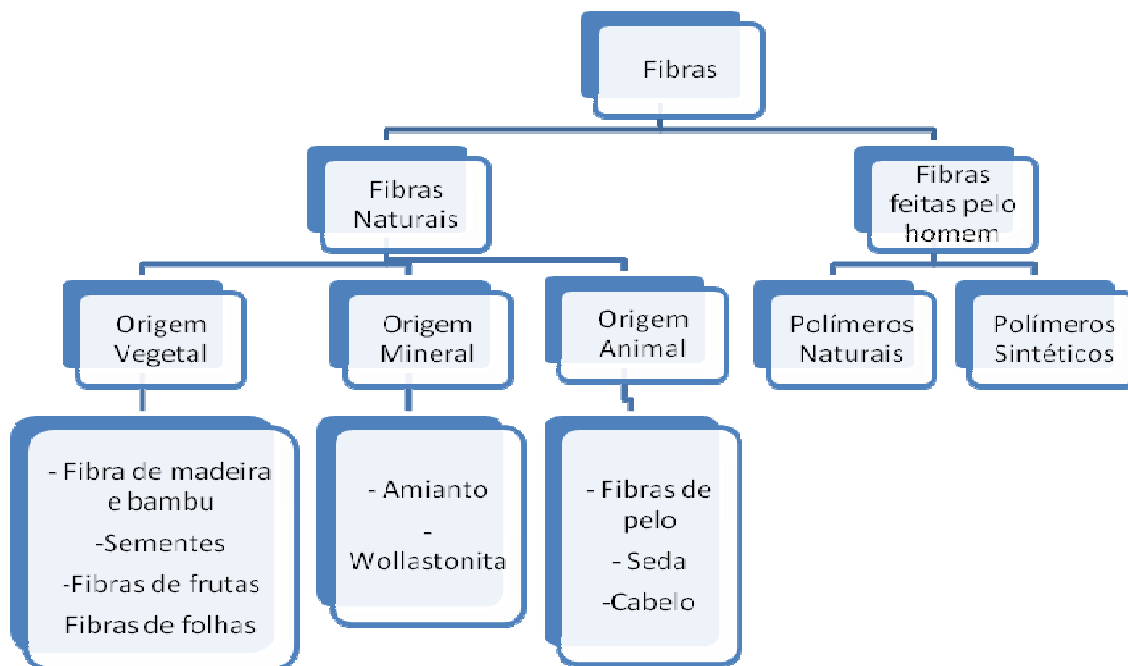


Figura 2.11 - Classificação das fibras (modificado - Person et al., 1984).

Algumas destas fibras podem atingir grandes resistências, como por exemplo, as fibras do bambu que atingem normalmente resistências acima de 100 MPa, e módulo de elasticidade entre 10 e 25 GPa.

As fibras naturais vegetais (Fig. 2.12) apresentam uma série de vantagens sobre as fibras sintéticas que podem justificar seu uso como reforço em matrizes tanto cimentícias como poliméricas, entre elas estão:

- a) Conservação de energia;
- b) Grande abundância;
- c) Baixo custo;
- d) Não é prejudicial a saúde;
- e) Possibilidade de incremento na economia agrícola;
- f) Prevenção da erosão;
- g) Baixa densidade;
- h) Biodegradáveis.

Porém, estas fibras vegetais apresentam algumas desvantagens como, por exemplo, a baixa durabilidade quando usado como reforço em matriz cimentícia, a variabilidade de propriedades e também a fraca adesão em seu estado natural a inúmeras matrizes.



Figura 2.12 – Fibras vegetais.

Devido a variabilidade de propriedades que existe no uso de diversas fibras vegetais, é importante estudar o seu comportamento como reforço em uma matriz, seja ela frágil ou dúctil.

Vale et al., (2007), propôs à incorporação de fibras de coco em misturas asfálticas tipo SMA em substituição das fibras de celulose que são atualmente incorporadas a essas misturas, com o objetivo de evitar o escorrimento do ligante asfáltico durante as operações de mistura e compactação a elevadas temperaturas, que ocorre principalmente pelas características granulométricas das misturas tipo SMA. As fibras de coco são rejeitos encontrados em abundância no Nordeste. Ensaio de escorrimento, resistência a tração, módulo de resiliência e fadiga foram realizados em misturas asfálticas tipo SMA confeccionadas com fibras de coco e comparadas à misturas confeccionadas com fibras de celulose. Os resultados encontrados mostraram que as fibras de coco atendem às exigências do ensaio de escorrimento, e não interferem nos parâmetros mecânicos da mistura. Para efeito de trabalhabilidade na confecção dos corpos de prova os autores adotaram como tamanho ideal para a fibra 20mm.

### 2.6.1 CABELO HUMANO

O cabelo humano pertence a um grupo de proteínas denominadas  $\alpha$ -queratinas (Breuer, 1981). As queratinas são formadas por cadeias polipeptídicas e se distinguem de outras proteínas por seu alto teor de pontes de dissulfeto (S-S) provenientes do aminoácido cistina (The Hair, 1984). Estas pontes formam uma rede tridimensional com alta densidade de ligações cruzadas, proporcionando ao cabelo uma alta resistência ao ataque químico. A redução destas ligações causa mudanças nas propriedades mecânicas do fio (Naito *et. al.*, 1996).



O fio do cabelo possui três componentes principais: a cutícula (cerca de 10% da fibra), o córtex (cerca de 88% da fibra) e o complexo da membrana celular (cerca de 2% da fibra) que une as células corticais e cuticulares adjacentes. Algumas vezes, um quarto componente, a medula, ainda sem função definida, também está presente no fio de cabelo. A cutícula constituída por material protéico e amorfo é a parte mais externa do fio, sendo responsável pela proteção das células corticais. Ela também exerce a função de regular o ingresso e o egresso de água, o que permite manter as propriedades físicas da fibra. O córtex é formado por microfibrilas de queratina alinhadas na direção dos fios e de grânulos de melanina cujo tipo, tamanho e quantidade são responsáveis pela cor dos cabelos e pela sua fotoproteção. Mudanças nas propriedades mecânicas do cabelo são atribuídas a mudanças na estrutura do córtex. A Figura 2.13 ilustra um diagrama esquemático da estrutura do cabelo (Nogueira, 2003).

Segundo Nogueira (2003), a cabeleira normal é constituída por cerca de  $10^5$  a  $1,5 \times 10^5$  fios de cabelo, desenvolvendo uma superfície de, aproximadamente, seis metros quadrados.

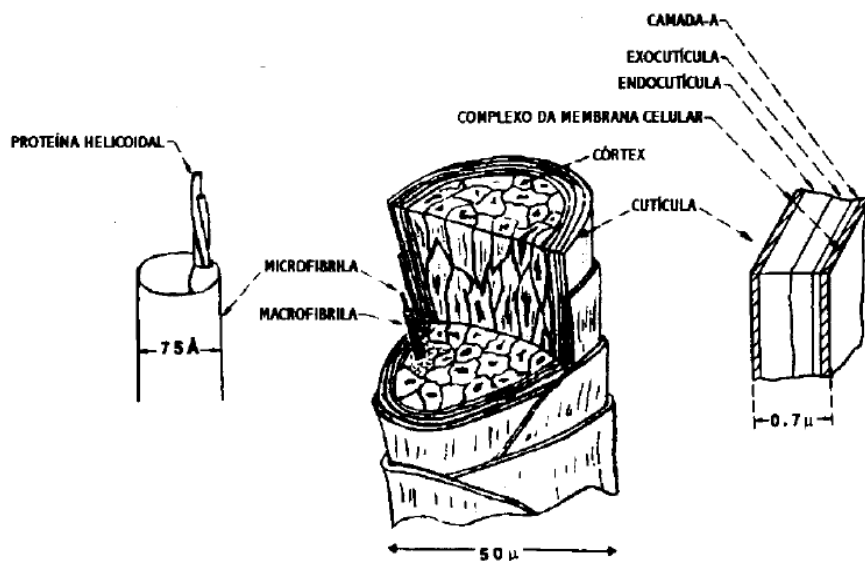


Figura 2.13 – Esquema representativo da estrutura do cabelo e os componentes da cutícula e do córtex (Nogueira, 2003).

As curvas tensão-deformação de cabelo humano apresentam três regiões características como mostra a Figura 2.14. A região hookeana se estende de 0 a 2% de deformação (A-B). O zero de deformação é considerado no ponto de interseção entre a inclinação da região hookeana e a linha de zero de tensão (ponto B). A curva é linear até aproximadamente 1% de extensão, e desvios da linearidade são muito pequenos até 2% de deformação. A razão

tensão-deformação (inclinação da região) fornece o valor do módulo elástico ou módulo de Young (Bendit, 1967 apud Tucci, 1989).

Entre 2 e 25-30% de extensão, a deformação aumenta rapidamente enquanto a tensão permanece pouco alterada. Esta é a segunda parte da curva denominada região de reconstituição (B-C). A deformação até 25-30% é reversível. Após repouso da fibra em água por uma noite ou durante uma hora a 52°C, as características originais são novamente encontradas.

Após 30% de extensão a fibra enrijece novamente com a deformação originando a região pós-reconstituição (C-D). A ruptura das fibras (Fig. 2.14) ocorre principalmente nesta região (ponto E).

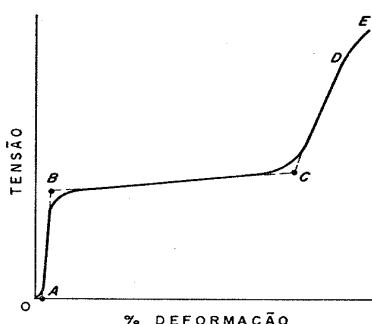


Figura 2.14 – Curva tensão x deformação típica de fibra de queratina. (A-B) região hookeana; (B-C) região de reconstituição; (C-D) região pós-reconstituição; (E) ponto de ruptura. (Bendit, 1967 apud Tucci, 1989).

### 2.6.1.1 TIPOS E FORMA DO CABELO HUMANO

O tipo e a forma dos cabelos são controlados geneticamente e variam com as raças. Ocorrem também diferenças entre cabelos de um mesmo couro cabeludo e ao longo do comprimento de uma fibra (Robinson, et al., 1985 apud Tucci, 1989).

As três maiores raças da população da Terra apresentam de modo geral, as seguintes características:

- a) Raça Caucasóide (formada por ancestrais europeus): possuem cabelos finos com diâmetro variando entre 29 a 96µm. A seção transversal é levemente elíptica. A cor varia de castanho a castanho-escuro com forma lisa ou ondulada;
- b) Raça Negróide (raças negras da África, Melanésia e Papua): possuem cabelos com diâmetro entre 46 e 120 µm com seção transversal oval ou elíptica. São cabelos castanhos escuros ou pretos com curvatura ondulada ou crespa;

c) Raça Mongolóide (chineses, mongóis, índios americanos e esquimós): a curvatura dos cabelos é lisa ou levemente ondulada com seção transversal redonda ou pouco oval. A cor varia do castanho escuro ao preto. Esta raça se divide em duas classes um com diâmetro entre 36 e 125 $\mu$ m e outra com diâmetro entre 55 e 119  $\mu$ m.

As propriedades físicas, químicas e mecânicas do cabelo humano são dependentes da idade das pessoas. O cabelo de crianças é mais solúvel que o de adultos. O diâmetro das fibras é máximo por volta dos quinze anos e então diminui gradualmente com o avanço da idade. (Nogueira, 1989).

Aguiar et al. (2009), estudou a viabilidade de incorporação de fios de cabelo, em substituição às fibras sintéticas, com o intuito de melhorar a resistência mecânica dos solos finos para uso em pavimentação. Com os resultados obtidos, estes autores puderam concluir que a incorporação dos fios de cabelo promoveu melhorias consideráveis no comportamento das amostras em termos de resistência a tração.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 3.1 apresenta as etapas desta pesquisa:

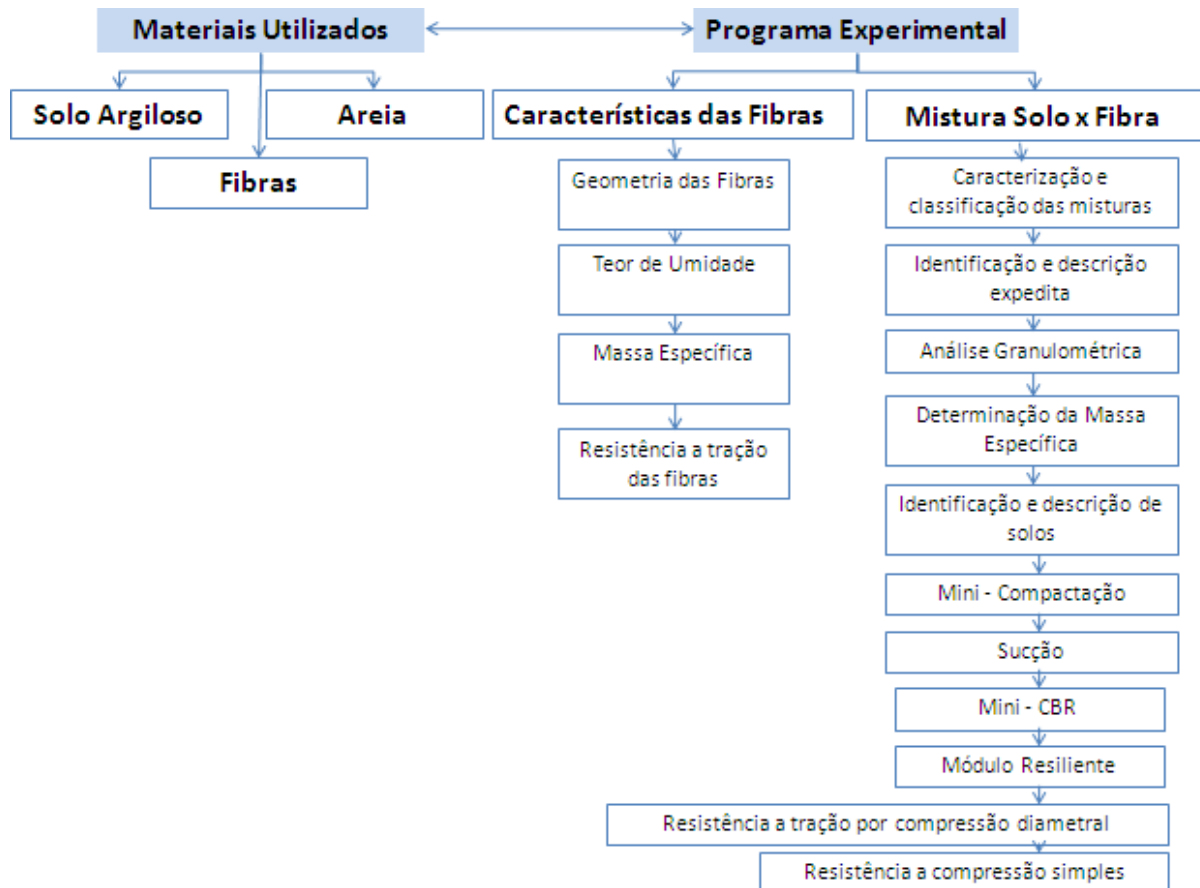


Figura 3.1 – Etapas da pesquisa.

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a produção das amostras foi utilizado um solo proveniente do Campo Experimental do Programa de Pós- Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), localizado no Campus Universitário Darcy Ribeiro, na Asa Norte do Plano Piloto de Brasília, no Distrito Federal (Fig. 3.2). A posição geográfica da área é determinada pelas coordenadas 15°45'58" S e 47°52'21" O, com altitude média de 1047 m, ocupando uma área quadrangular de aproximadamente 5000 m<sup>2</sup> (Mota, 2003).



Figura 3.2 – Local de extração do material argiloso (Google Earth, 2010).

A escolha deste local para extração do solo levou em conta o fato de que o mesmo já foi amplamente estudado e caracterizado, por estudos anteriores, sendo que a amostra no horizonte coletado (1,5m de profundidade) é classificada como sendo como um solo argiloso profundamente intemperizado.

### 3.1.1 SOLO ARGILOSO

O solo extraído foi inicialmente denominado SOLO 1, o qual apresentou peso específico de  $26,60 \text{ KN/m}^3$ . Chapelet (2010) apresentou para este solo argiloso, peso específico aparente seco entre  $16,80$  e  $17,20 \text{ KN/m}^3$  e umidade ótima compreendida entre 20 e 22% quando compactada na energia Proctor intermediário.

No estado natural o solo estudado é poroso ( $e=1,55$ ), apresenta distribuição de poros bimodal, e a fração argila encontra-se predominantemente na forma agregada constituindo textura que varia de silte a areia fina (Guimarães, 2002). Segundo Guimarães (2002) os horizontes superficiais deste perfil de solo, como é o caso da camada estudada, são ricos em gibbsita e quartzo possuindo ainda em sua composição caulinita, hematita, goethita, anastásio e rutilo. O índice de plasticidade segundo o mesmo autor varia em torno de 10% e o coeficiente de atividade de Skempton é aproximadamente igual a 0,3.

### 3.1.2 AREIA

Objetivando oferecer uma maior ancoragem das fibras à matriz de solo foram incorporadas adições de uma areia de jazida de cor rosa. A esta nova configuração de amostra denominou-se SOLO 2. As curvas granulométricas da areia utilizada obtidas com e sem o uso

de defloculante estão apresentadas na Figura 3.3. Esta areia foi adquirida em uma empresa distribuidora de areia e cascalho, sendo que as informações gerais fornecidas pelo fornecedor indicam que esta areia é proveniente de uma jazida localizada na região do entorno do Distrito Federal, em área próxima à cidade de Novo Gama, estado de Goiás.

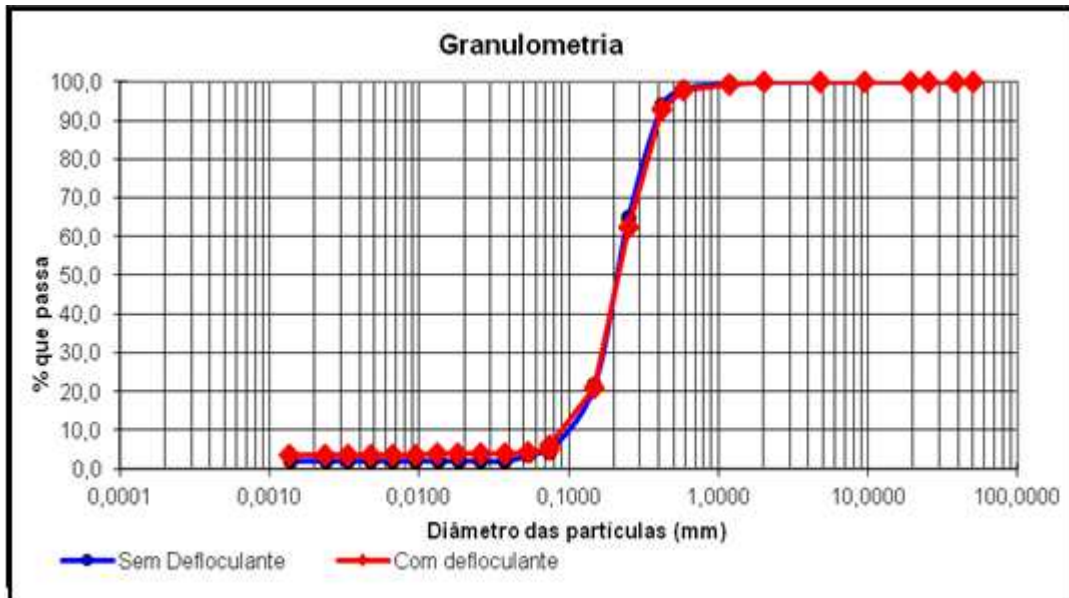


Figura 3.3 – Curva granulométrica da areia.

### 3.1.3 FIBRAS

Foi utilizada nesta pesquisa uma fibra natural, o cabelo humano, com comprimento aleatório variando entre 1,0 e 1,5 cm. As fibras foram coletadas nos seguintes locais: 1) Em uma barbearia localizada no município de Valparaíso, no estado de Goiás e; 2) Em um Salão de Beleza localizado na cidade satélite de Santa Maria no Distrito Federal. As fibras coletadas na barbearia apresentaram comprimentos dentro da faixa recomendada pela literatura, quando do uso de fibras artificiais. Trindade et al. (2004), Trindade (2005a), Tedoro (1999) e Casagrande (2001) encontraram melhores resultados usando fibras de polipropileno com comprimento variando entre 1,5 e 2,4 cm. As fibras coletadas no Salão de Beleza precisaram ser cortadas nas dimensões recomendadas, adotando-se o comprimento de 1,5 cm (Figura 3.4). É importante salientar que não houve seleção quanto à qualidade do cabelo, sendo usados desde cabelos lisos a crespos, que eram misturados e utilizados na confecção dos corpos de prova.

Um fator relevante para esta pesquisa é a degradabilidade do cabelo humano, considerando que este é um material orgânico, porém não foram encontrados registros concretos sobre a durabilidade e o processo de decomposição do cabelo.

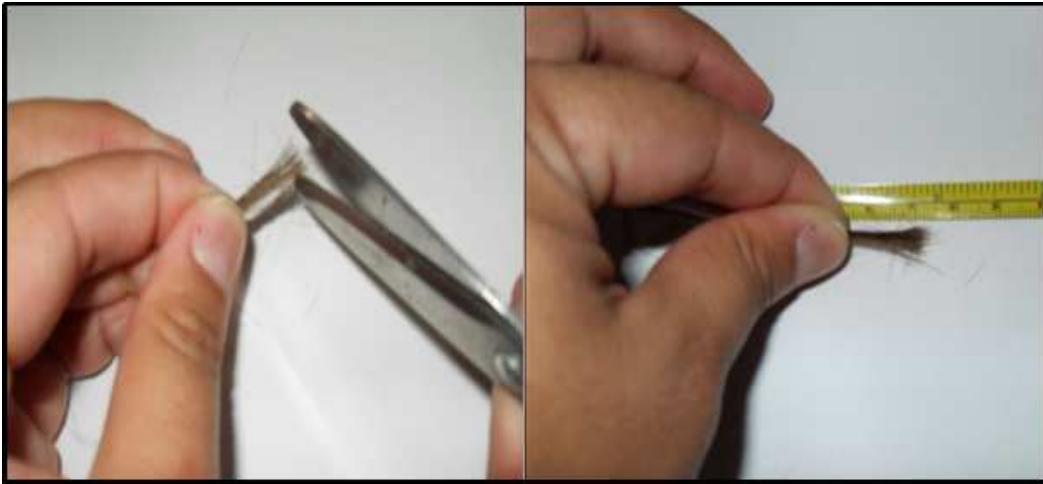


Figura 3.4 - Corte dos fios de cabelo para incorporação nas amostras.

## **3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

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

### **3.2.1 CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS**

#### **3.2.1.1 GEOMETRIA DAS FIBRAS**

A transferência de esforços da matriz para o reforço em fibras determinará o comportamento do compósito resultante sendo este influenciado, entre outros, pelo comprimento e diâmetro das fibras (Agopyan e Savastano, 2003). Dessa forma, torna-se importante e necessária a avaliação destes parâmetros. Para a determinação dos diâmetros das fibras, inicialmente, foram feitos os seguintes procedimentos: 1) a lavagem com água corrente e detergente líquido neutro e; 2) A secagem ao ar por um período aproximado de 5 dias. Após o processo de limpeza e secagem das fibras foram determinados os diâmetros utilizando uma lupa e um paquímetro. Os diâmetros obtidos foram à média de 10 medições. Com relação aos comprimentos utilizados foram aleatórios e variaram de 1,0 a 1,5 cm.

### 3.2.1.2 TEOR DE UMIDADE

A umidade natural das fibras foi determinada pelo método da estufa (NBR 9656). As fibras secas ao ar por um período de 5 dias, tiveram seus pesos secos ( $P_{ar}$ ) determinados em balança eletrônica com precisão de 0,01 g. Em seguida, as fibras foram colocadas em estufa a uma temperatura entre 105-110° C por 24 horas, e pesadas novamente ( $P_{est}$ ). A umidade natural foi estimada utilizando a Equação 3.1. Foram utilizadas nas misturas fibras secas ao ar.

$$H = \frac{P_{ar} - P_{est}}{P_{est}} \times 100\% \quad (3.1)$$

### 3.2.1.3 MASSA ESPECÍFICA

A determinação da massa específica das fibras foi realizada seguindo as recomendações da NBR 6508/84 utilizada para obter a densidade dos grãos sólidos de um solo.

Define-se massa específica dos grãos como sendo a razão entre a massa e o volume dos grãos (Eq. 3.2).

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \text{ (g / cm}^3\text{)} \quad (3.2)$$

Onde:

$\rho_s$  = massa específica dos grãos;

$M_s$  = Massa dos grãos;

$V_s$  = Volume dos grãos.

O cabelo utilizado para a determinação da massa específica passou por um processo de lavagem com detergente neutro a fim de retirar as impurezas adquiridas no processo de coleta, em seguida foram secas ao ar por um período mínimo de 5 dias. Para este ensaio utilizou-se 5 g de cabelo que foram colocados em balões volumétricos com a ajuda de funil e barra de ferro para facilitar a colocação dos fios no balão.



### 3.2.1.4 ABSORÇÃO DO CABELO

Para conhecer o índice de absorção do cabelo foi necessário desenvolver uma metodologia que permitisse avaliar a quantidade de água absorvida pelo cabelo quando em contato com outro material úmido. Assim procedeu-se ao ensaio da seguinte forma (Fig. 3.5): a) as fibras foram cortadas em comprimentos de aproximadamente 5 cm; b) estas fibras foram colocadas em cápsulas, e sobre elas um papel filtro com diâmetro de 50 mm este conjunto foi pesado em uma balança eletrônica; c) uma quantidade de água foi adicionada ao papel filtro com a ajuda de uma pipeta e pesada; d) para facilitar o contato entre o papel filtro úmido e o cabelo, utilizou-se um anel metálico sobre os materiais; e) cada conjunto (fibra + papel filtro + anel metálico + cápsula) foi envolto por um filme plástico e em seguida por papel alumínio, etiquetado e guardado em uma caixa de isopor por um período de 15 dias; f) após este período, as amostras foram pesadas em conjunto (papel filtro + cabelo) e separadamente (papel filtro e cabelo), em seguida submetidas a secagem em estufa por 24 horas a uma temperatura de 105 a 110° C; g) após a secagem em estufa as amostras foram pesadas para obtenção dos dados.

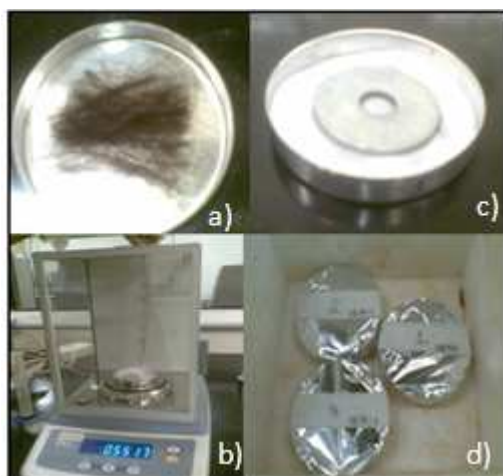


Figura 3.5 – Procedimento experimental desenvolvido. a) corte das fibras; b) papel filtro umedecido com água; c) colocação do anel metálico para facilitar o contato entre o cabelo e o papel filtro úmido; d) amostras embaladas por um período de 15 dias até o final do ensaio.

A equação utilizada para medir a capacidade de absorção d'água das fibras foi a mesma utilizada na determinação do teor de umidade sendo que no caso  $P_{est}$  representa o peso da fibra seca em estufa em g e  $P_{um}$  o peso úmido (após imersão) em g (Eq. 3.3).

$$I_{abs} = P_{um} - P_{est} / P_{est} (100\%) \quad (3.3)$$

### 3.2.1.5 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DAS FIBRAS

Para medir a resistência a tração das fibras foi realizada uma adaptação a metodologia utilizada por Aguiar et al., (2009). Para este ensaio as fibras tiveram suas extremidades fixadas a duas placas de polietileno com uso de cola de secagem instantânea, resultando em um comprimento de aproximadamente 10 cm de cabelo, estas placas eram presas a dois prendedores de papel um em cada gancho, sendo que o gancho superior permanecia fixo enquanto que o gancho inferior sustentava um pequeno recipiente onde aplicava-se o carregamento por meio da colocação de pequenas esferas metálicas (Fig. 3.6).

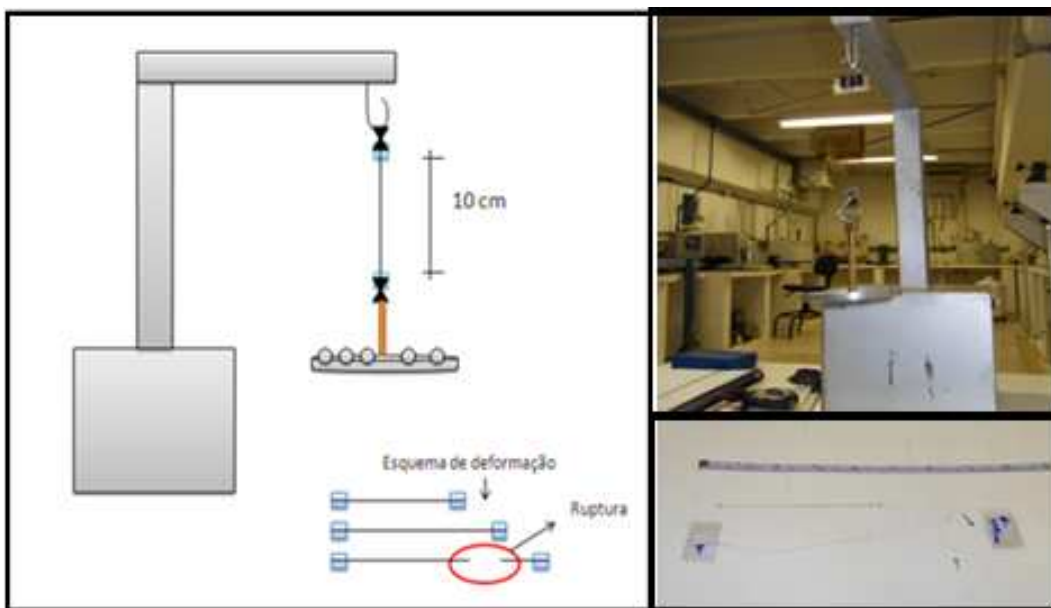


Figura 3.6 – Determinação de resistência a tração dos fios de cabelo.

Para cada esfera colocada aguardava-se 5 minutos, retirava-se o cabelo e media-se sua deformação com a ajuda de uma trena, até atingir a ruptura da fibra ensaiada. Antes do início do ensaio cada fibra teve seu diâmetro determinado com auxílio de um paquímetro digital de precisão igual a 0,01 mm. Cinco amostras de cabelo foram submetidas a este ensaio. Esta técnica objetivou não só determinar a resistência à tração das fibras como avaliar suas deformações residuais após solicitação.

### 3.2.1.6 TENSÃO DE SORÇÃO

Objetivando melhor entender o comportamento mecânico dos fios de cabelo de modo isolado, determinou-se para diferentes tensões de sorção determinadas pela técnica do papel filtro utilizada na determinação da curva característica de solos a resistência a tração de fios

de cabelo medindo aproximadamente 13 cm de comprimento. As tensões de sorção foram determinadas seguindo os seguintes procedimentos: papéis filtro foram levados à estufa por duas horas, pesados e em seguida saturados em água destilada. Os cabelos utilizados neste ensaio ficaram submersos em água destilada por um período de 36 horas.

Para cada papel filtro foram colocados 4 fios de cabelo, enrolados cuidadosamente e envolvidos por um fio de polipropileno como mostra a figura abaixo. Estas amostras foram envolvidas por um filme plástico, papel alumínio e acondicionadas em um isopor durante um período de 14 dias. Após este período, pesaram-se os fios de cabelo, mediu-se o diâmetro, o comprimento para então submetê-los ao ensaio de resistência a tração seguindo a metodologia descrita no item 3.2.1.5. Os papéis filtro úmidos foram pesados e levados à estufa para secagem por 2 horas, em seguida, pesados novamente para a determinação da umidade.

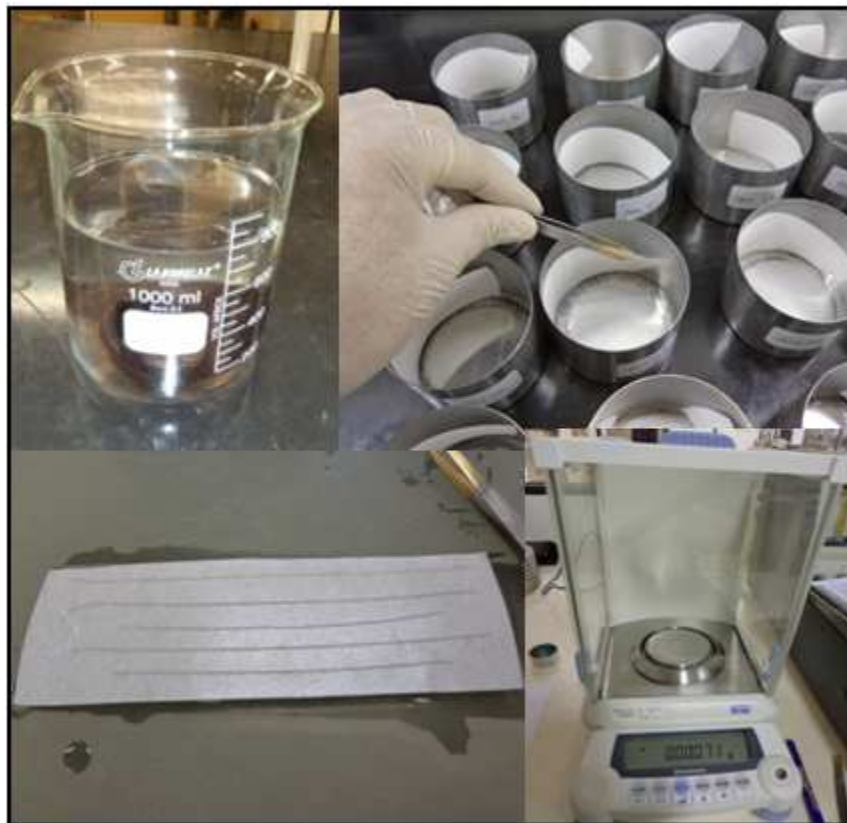


Figura 3.7 – Determinação da tensão de sorção.

### 3.2.2 MISTURAS SOLO x FIBRAS

A adição de areia representa um papel importante quando da avaliação da ancoragem das fibras ao solo. Devido a este fato variou-se a quantidade de areia incorporada à argila

como mostra a Tabela 3.1. Estas misturas foram denominadas “Mistura Pura – MP” e foram utilizadas nas misturas com fibra.

Tabela 3.1- Definição das misturas de solo

MISTURA PURA	QUANT. DE ARGILA	QUANT. DE AREIA
MP 1	75%	25%
MP 2	25%	75%
MP 3	50%	50%

### 3.2.2.1 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS MISTURAS

Os ensaios de classificação e caracterização aos quais as misturas foram submetidas seguiram as seguintes metodologias:

- Metodologia MCT – Identificação e Descrição Expedita (Visual-Tactil) de Solos;
- NBR 7181 – “ Solos – Análise Granulométrica” (Figura 3.8-a);
- NBR 6508 – “Grãos de Solo que passam na peneira 4,8mm – Determinação da Massa Específica”;
- ASTM D 2488 – 84 – Identificação e Descrição de Solos (Figura 3.8-b).

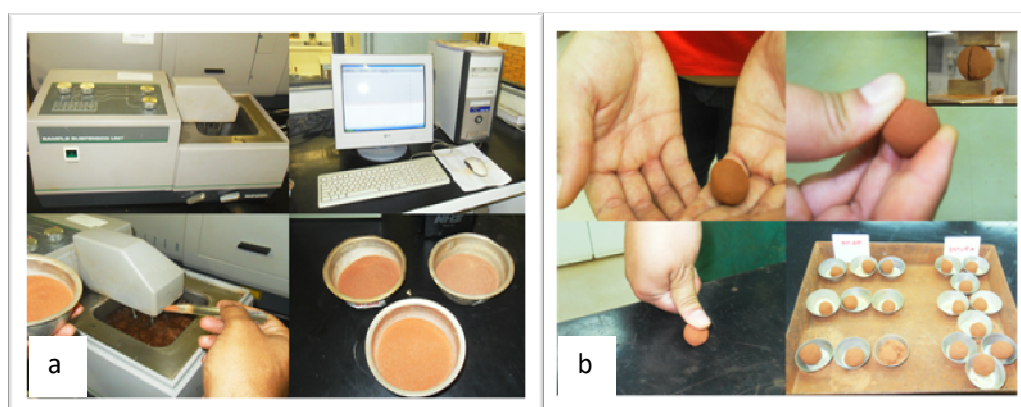


Figura 3.8 – (a) Obtenção da curva granulométrica utilizando o granulômetro a laser; (b) Identificação e descrição de solos.

Os solos foram secos ao ar, passados na peneira 4,8 mm, misturados e armazenados em sacos de nylon. As fibras foram incluídas às misturas em duas diferentes proporções, 0,25% e 0,50%, e as amostras foram misturadas totalizando 09 composições:

1. MP1 Sem adição de cabelo;
2. MP1 + 0,25% de cabelo em relação à massa de solo seco;
3. MP1 + 0,50% de cabelo em relação à massa de solo seco;
4. MP2 sem adição de cabelo;
5. MP2 + 0,25% de cabelo em relação à massa de solo seco;
6. MP2 + 0,50% de cabelo em relação à massa de solo seco;
7. MP3 sem adição de cabelo;
8. MP3 + 0,25% de cabelo em relação à massa de solo seco;
9. MP3 + 0,50% de cabelo em relação à massa de solo seco.

As Figuras 3.9, 3.10 e 3.11, apresentam as curvas granulométricas das misturas de solo sem adição de fibra (MP1, MP2 e MP3). Já as Figuras 3.12 e 3.13 apresentam as curvas granulométricas de todas as misturas. Foram realizados ensaios com e sem o uso de defloculante. A Figura 3.11 revela que nos ensaios sem o uso de defloculante a forma da curva granulométrica é muito pouco afetada pela variação do teor de areia rosa incorporada. Quando do uso de defloculante verifica-se alteração mais significativa da textura.

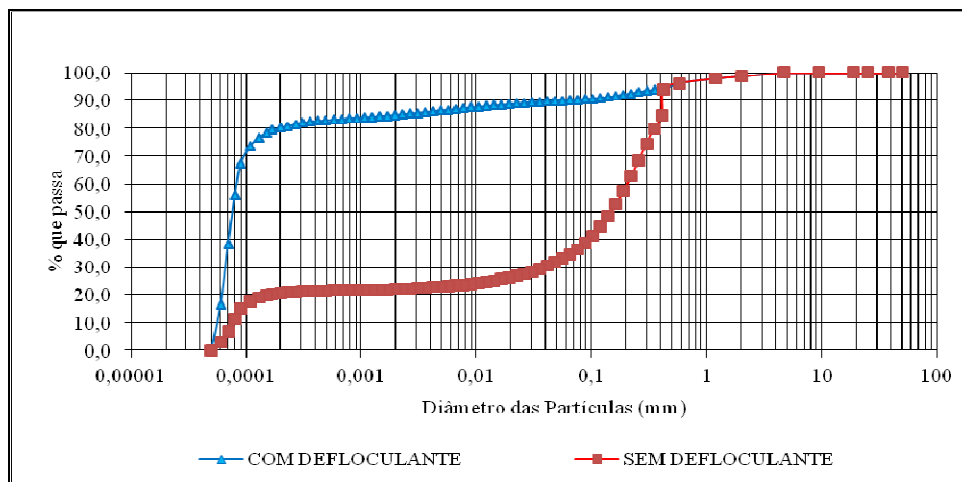


Figura 3.9 – Curva granulométrica do solo MP1.

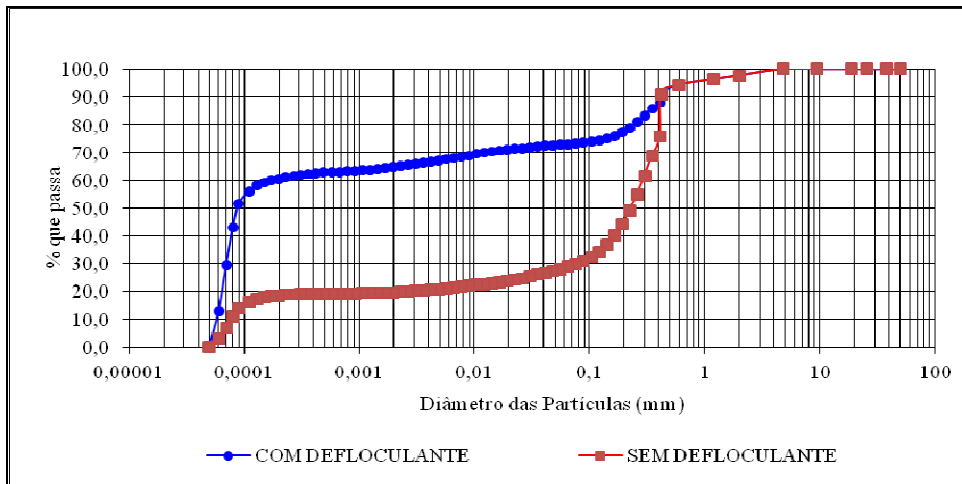


Figura 3.10– Curva granulométrica do solo MP2.

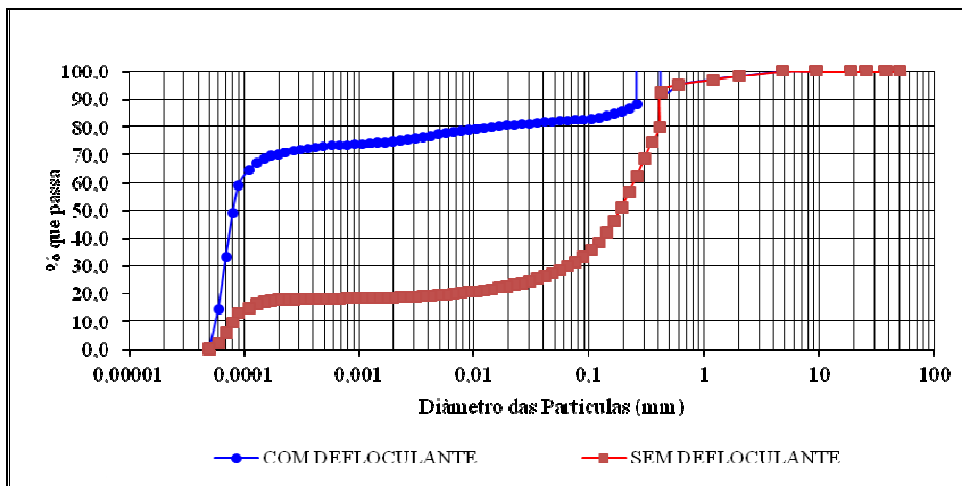


Figura 3.11 – Curva granulométrica do solo MP3.

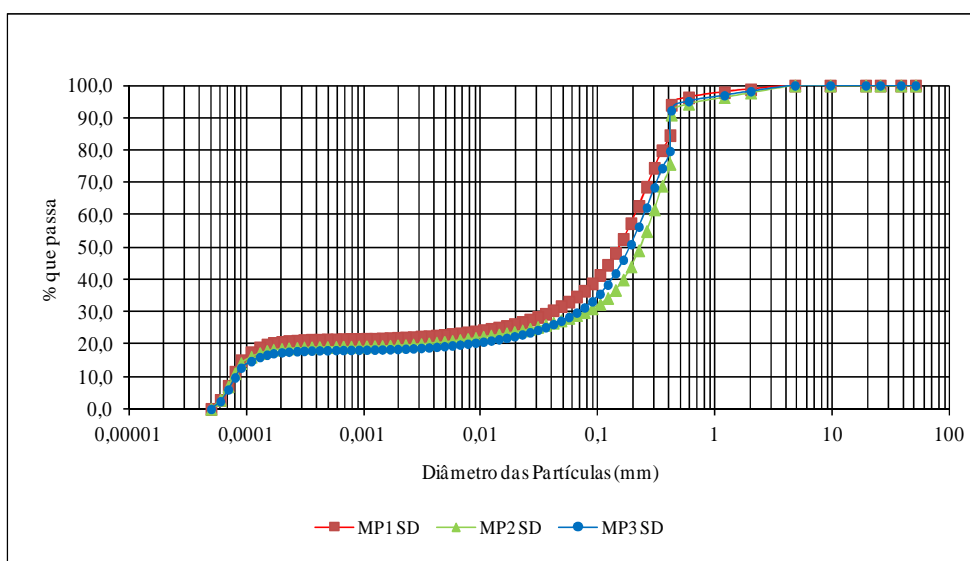


Figura 3.12 – Curvas granulométricas sem defloculante das misturas de solo estudadas.

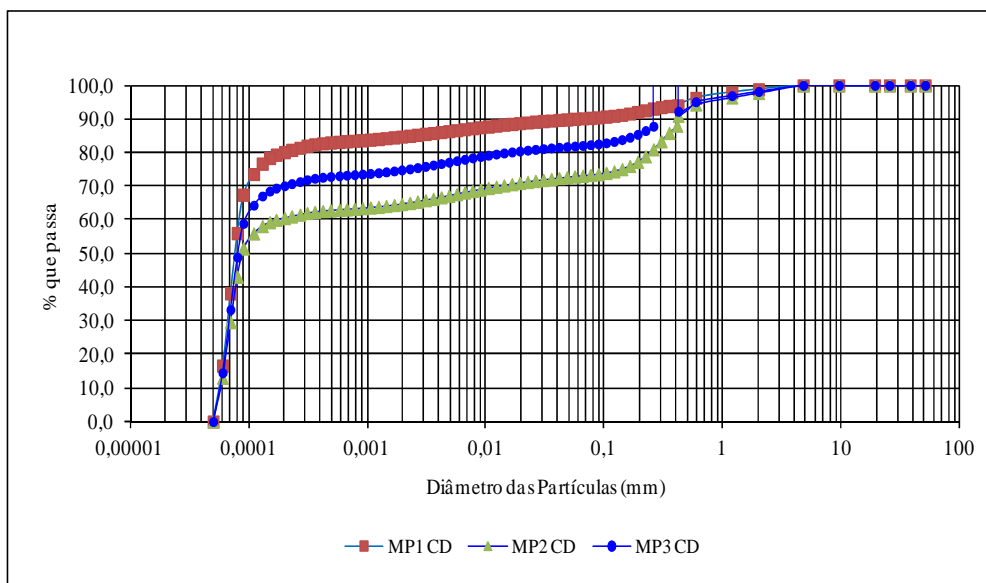


Figura 3.13 – Curvas granulométricas com defloculante das misturas de solo estudadas.

A Figura 3.14 apresenta a carta de classificação dos solos segundo o Método das Pastilhas (Nogami e Villibor, 1994) com a indicação das três misturas utilizadas neste estudo. Observa-se que o aumento do teor de areia desloca o solo do domínio argiloso (MP1) para o arenoso (MP2) mantendo-se em todos os casos a característica laterítica.

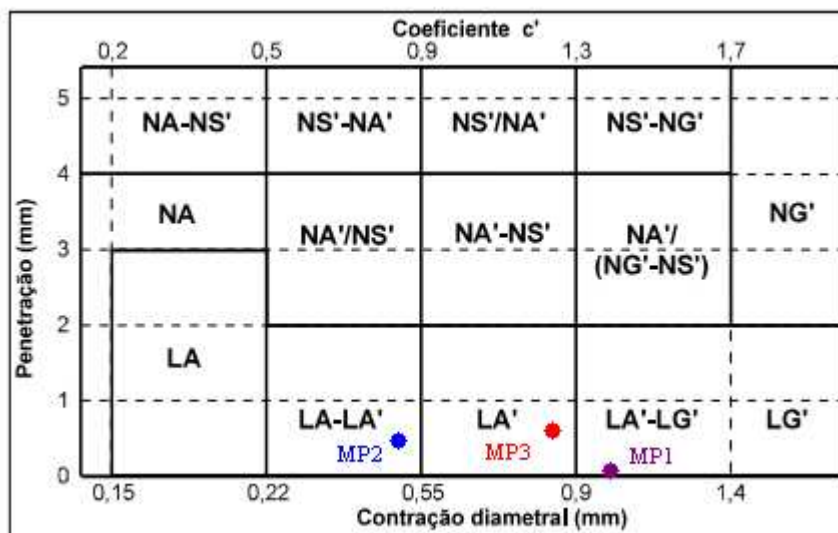


Figura 3.14 – Localização das misturas no gráfico pelo método das pastilhas.

### 3.2.2.2 MINI- COMPACTAÇÃO

As misturas solo x fibra foram submetidas a ensaios de compactação a fim de se obter a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima. A metodologia adotada seguiu os procedimentos do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT) contidos na ME -228/1994 – Solos – Compactação em Equipamento Miniatura para energia intermediária.

Os procedimentos executados foram: 1) secagem ao ar; 2) destorroamento e passagem do material na peneira 2,0 mm; 3) umedecimento e compactação dos solos sem fibras; 4) adição de cabelo, umedecimento, homogeneização e compactação dos corpos de prova.

As amostras após umidificadas e homogeneizadas foram acondicionadas em sacos plásticos durante um período de 24 horas antes da compactação a fim de permitir a uniformização da distribuição da umidade no solo. Os golpes utilizados para compactar os corpos de prova foram aplicados tanto na base como no topo. O diâmetro e a altura dos corpos de prova utilizados foram de 50 mm com variação de 1 mm, quando esta condição não era satisfeita, realizava-se uma correção na massa de solo e repetia-se o processo de compactação, caso contrário, determinava-se o teor de umidade utilizado no ensaio. A Figura 3.15 apresenta o equipamento de compactação miniatura, adotado pela metodologia MCT.



Figura 3.15 – Compactador da metodologia MCT pertencente à Universidade de Brasília - UNB.



A mesma metodologia foi utilizada para o preparo dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência a tração por compressão diametral, resistência a compressão simples e de módulo resiliente. Os corpos de prova destinados ao ensaio de tração apresentaram diâmetro de 5cm e altura final de 2,5 cm. Para compactá-los aplicaram-se 6 golpes apenas em um os lados. Já os corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão simples e de módulo resiliente foram compactados com altura final de 10 cm (+/- 1mm) e diâmetro de 5 cm. A compactação foi realizada em cinco camadas com seis golpes em cada camada.

Ao final do procedimento para obtenção das curvas de compactação, foi colocado no topo de cada corpo de prova, ainda no molde, três papéis filtro de 50 mm de diâmetro e uma lâmina circular metálica que permitiu o contato do papel filtro com o solo. As amostras foram envolvidas com filme de PVC, papel laminado e acondicionados em caixas de isopor durante 15 dias para determinação da sucção. Em seguida elas eram submetidas aos ensaios de mini-CBR (com e sem imersão).

Foi realizada também a determinação da sucção pelo mesmo método do papel filtro nos corpos de prova destinados aos ensaios de tração e de módulo resiliente.

### **3.2.2.3 MINI - CBR**

O ensaio de Mini-CBR foi desenvolvido na Iowa State University, onde eram confeccionados corpos de prova com 50 centímetros de diâmetro e pistão de penetração de 16 milímetros de diâmetro. Algumas adaptações foram realizadas por Nogami (1972) tendo em vista correlacionar os resultados deste ensaio e os resultados de CBR segundo a metodologia do DNER.

A preparação, execução e cálculo deste ensaio seguiram as normas: 1) DNER-ME-254/94 Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão; 2) DNER-ME 228/94 – Solos - compactação em equipamento miniatura (Fig. 3.16).



Figura 3.16 – Ensaio de miniCBR.

As misturas de solo x fibra anteriormente compactadas e submetidas a ensaios de sucção eram levadas diretamente a prensa onde se colocava o conjunto formado pelo molde contendo o corpo de prova e um cilindro metálico sobre o prato da prensa para impedir que a massa de solo deslizesse durante a aplicação da carga. Durante este ensaio foram efetuadas leituras no extensômetro do anel de carga correspondente a penetração do pistão da prensa de 0.25mm, 0.50 mm, 0.75mm, 1.00 mm, 1.25mm, 1,50mm, 1.75mm, 2.00mm, 2.50mm, 3.00 mm, 3.50 mm, 4.00 mm, 4.50mm e 5.00mm.

Os ensaios de Mini-CBR sem imersão eram realizados em um dos lados do corpo de prova. Para realizar os ensaios com imersão era utilizado o outro lado do corpo de prova.

Para os ensaios de Mini-CBR com imersão foram utilizados conjuntos de embebição formados por bases, hastes, discos perfurados, sobrecargas e placas superiores como mostra a Figura 3.17. A estes conjuntos eram anexados os moldes contendo os corpos de prova e extensômetros capazes de medir a expansão ou contração que apresentassem depois de imergidos em água durante aproximadamente 24h. Após esse período os corpos de prova eram retirados da imersão e mantidos em repouso por 1 hora com o intuito de dissipar as poropressões antes de submetidos às leituras durante a penetração do pistão.



Figura 3.17 – MiniCBR com imersão.

#### 3.2.2.4 SUCCÃO

Sabe-se que a sucção de um solo é a energia correspondente a sua capacidade de reter água. Quando a água livre migra para dentro de um solo, ela será retida ou adsorvida por ele. Para desprender essa água adsorvida é necessária a aplicação de uma energia externa que seja capaz de superar as forças de retenção do solo. É de grande importância caracterizar os solos por meio de sucção tendo em vista a necessidade de compreender o comportamento dos solos não saturados quando submetidos a diferentes teores de umidade.

Nesta pesquisa utilizou-se o Método do Papel Filtro. Este método consiste na medição da sucção de equilíbrio entre a amostra ensaiada e o papel filtro, esta medição pode ocorrer de duas formas: por fluxo de vapor ou por fluxo capilar como mostra a Figura 3.18. Quando ocorrem por fluxo de vapor as moléculas de água têm de escapar do poro vencendo as forças capilares do solo e eventualmente as forças osmóticas que agem devido à presença de sais. O espaço deixado entre o papel filtro e o solo oferece uma barreira para os sais, permitindo apenas o fluxo de água na forma de vapor. Quando por fluxo capilar, este ocorre estabelecendo o equilíbrio de sucção entre o solo e o papel filtro, sem que a fase água perca continuidade, implicando numa interação maior entre o papel filtro e a água do poro. No fluxo de vapor mede-se a sucção total, já no fluxo capilar mede-se a sucção matricial.

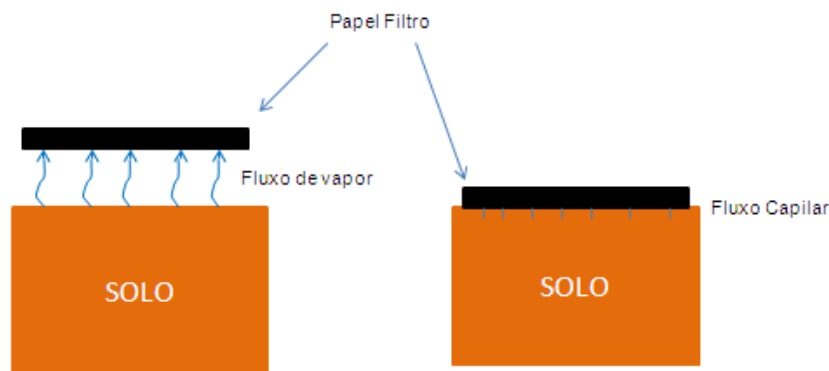


Figura 3.18 – Tipos de fluxo do solo para o papel filtro (Marinho, 1995a).

Para esta pesquisa foram realizadas apenas medidas de sucção matricial em todas as amostras exceto nas destinadas aos ensaios de resistência a compressão simples para os quais as sucções foram determinadas a partir de curvas características transformadas segundo a proposta apresentada por Camapum de Carvalho e Leroueil (2004).

Os procedimentos adotados para o referido ensaio (Fig. 3.19) foram os seguintes: 1) Após a compactação das misturas destinadas a outros ensaios colocavam-se três discos de papel filtro Whatman nº 42 com diâmetros diferentes sobre a amostra e; 2) Colocava-se um disco metálico sobre estes papéis filtro para facilitar o contato do solo com o papel filtro quando este se encontrava nos moldes, nos demais o filme plástico que envolvia o conjunto amostra e papel filtro mantinha este contato. O uso do filme plástico e papel laminado tinham como objetivo evitar a perda de umidade para o meio externo e manter a temperatura sempre constante. Uma fita envolvia as amostras depois de bem embaladas para identificação e elas eram então acondicionadas dentro de uma caixa de isopor por um período de 14 dias.

Após esses 14 dias, os corpos de prova eram retirados da caixa de isopor para serem efetuadas as pesagens do papel filtro. Com a ajuda de uma pinça, retirava-se o papel filtro do topo da amostra realizando a sua pesagem em balança de 0,0001g de precisão. Por questões de segurança, este procedimento foi adotado para o papel filtro localizado no meio e no topo da amostra, desprezando-se o papel filtro em contato com a amostra. Dessa forma, obteve-se o peso do papel úmido. Posteriormente, os discos de papel filtro eram colocados em cápsulas e levadas a uma estufa regulada com uma temperatura variando entre 105 e 110 °C, onde permaneciam por um período de 2 horas. Em seguida pesou-se o papel filtro seco.

Após a determinação dos pesos úmidos e secos, calculou-se a umidade do papel por meio da Equação 3.4:

$$w = \frac{P_w - P_s}{P_s} \quad (3.4)$$

Onde:

W = umidade do papel;

P<sub>w</sub> = Peso úmido do papel filtro;

P<sub>s</sub> = Peso seco do papel filtro.

O cálculo da sucção é realizado por meio da umidade de cada papel filtro, de acordo com as Equações (3.5 e 3.6) propostas por Chandler et al. (1992), citadas por Marinho (1995a).

$$\text{Para umidades do papel filtro} > 47\%: \text{Sucção (KPa)} = 10^{(6.05 - 2.48 * \log w)} \quad (3.5)$$

$$\text{Para umidades do papel filtro} \leq 47\%: \text{Sucção (KPa)} = 10^{(4.84 - 0.0622 * \log w)} \quad (3.6)$$

O método do papel filtro (Fig. 3.19) também pode ser utilizado para determinação da curva característica do solo, expressa num gráfico de sucção x teor de umidade ou também em função do grau de saturação da amostra. Algumas amostras foram compactadas em umidades diferentes, variando em torno da umidade ótima característica de cada material. Assim foi possível a elaboração das curvas características para as diferentes misturas de solo.



Figura 3.19 – Procedimentos utilizados no ensaio de sucção.

### 3.2.2.5 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral consiste na aplicação de uma carga de compressão uniformemente distribuída ao longo da geratriz da amostra com a geração de um estado de tensões formado por tensões de tração em consequência das tensões de compressão, na região do plano onde se aplica a carga. O ensaio realizado neste estudo teve o objetivo de determinar a resistência a tração do solo na condição não saturada e verificar qual a influência da incorporação das fibras nesta resistência.

As amostras utilizadas foram compactadas com o uso do compactador da metodologia MCT, com uma energia intermediária de compactação (Fig. 3.20).

Os procedimentos adotados para a determinação da resistência seguiram a norma ME-138/94 do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, a velocidade utilizada foi de 0,8 mm/min.



Figura 3.20 – Pressas automáticas e aplicação de tensões no ensaio de tração.

A carga de ruptura foi determinada considerando-se o pico de carga na curva carga x deslocamento ou a estabilização da carga para seguidos deslocamentos, obtendo-se o valor da resistência à tração por meio da Equação 3.7.

$$\sigma_T = \frac{2xP}{\pi x D x t} \quad (3.7)$$

Onde:

P =Carga de Ruptura (kPa);

D = diâmetro (m);

t = espessura (m).

### 3.2.2.6 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de compressão simples (Fig. 3.21) foi executado com o objetivo de determinar a resistência a compressão do solo, verificando desta forma qual a influencia da adição de fibras nesta resistência.

Os corpos de prova foram moldados utilizando a metodologia da mini-compactação. Porém, foram adotadas quatro camadas, sendo que para cada uma foi utilizado seis golpes para compactá-la. Uma escarificação da amostra era feita a cada camada compactada para facilitar a aderência com a camada subsequente.

Os corpos de prova foram moldados adotando-se uma relação 2:1, ou seja, os corpos de prova apresentavam após a compactação uma altura equivalente a duas vezes o diâmetro. Em seguida os corpos de prova eram levados à prensa automática para que fossem o rompidos. A velocidade de ruptura adotada foi a mesma utilizada no ensaio de Resistência a Tração por compressão diametral: 0,8 mm/min.



Figura 3.21 – Ensaio de resistência a compressão simples

### 3.2.2.7 MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

Até a década de 70, os métodos de dimensionamento usualmente empregados no Brasil caracterizavam-se por focar, basicamente, a capacidade de suporte dos pavimentos em termos de ruptura plástica sob carregamento estático, retratada através do valor de CBR. No entanto, observava-se que boa parte da malha rodoviária vinha apresentando uma deterioração prematura, que era atribuída à fadiga dos materiais gerada pela contínua solicitação dinâmica do tráfego atuante. Essa realidade acabou por dar ensejo à introdução de estudos da resiliência de materiais empregáveis em pavimentos,

permitindo avaliar comportamentos estruturais até então não explicáveis pelos procedimentos clássicos (DNIT, 2006; Jiménez,2011). Cabe destacar, que apesar deste quadro, em muitos casos a deterioração da estrutura de pavimento está ligada ao tipo de solo e as características climáticas regionais como mostrado por Camapum de Carvalho (2006) e Camapum de Carvalho e Gitirana (2006) para um solo da Região Amazônica.

O desempenho de pavimentos depende das características do comportamento tensão-deformação dos materiais de cada camada bem como da frequência, da intensidade de tráfego, e das condições ambientais e regionais (Rodrigues, 1997).

O termo resiliência significa energia armazenada em um corpo deformado elasticamente, que é desenvolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações; ou seja, é a energia potencial de deformação (Medina, 1997).

O módulo de deformação resiliente é determinado pela seguinte expressão (DNIT, 2006):

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (3.8)$$

MR = módulo de deformação resiliente;

$\sigma_d$ = tensão-desvio aplicada repetidamente;

$\epsilon_r$  = deformação específica axial resiliente correspondente a um número particular de repetições da tensão-desvio.

Com o objetivo de validar os resultados obtidos no ensaio triaxial cíclico, nesta pesquisa foi utilizada a equação conhecida como modelo universal (Eq. 3.9).

$$MR = k_1 p_a \left( \frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (3.9)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \left( \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \right) \quad (3.10)$$

Onde,

MR = Módulo Resiliente;

$K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  = coeficientes de regressão;

$p_a$ = pressão atmosférica;

$\sigma_1$ = tensão principal maior;

$\sigma_2$ = tensão principal intermediária;



$\sigma_3$  = Tensão principal menor;

$\theta$  = tensão volumétrica;

$\tau_{oct}$  = tensão octaédrica.

## PROCEDIMENTOS DO ENSAIO

Os ensaios foram realizados no laboratório do CFTRU na Universidade de Brasília. Os corpos de prova utilizados neste ensaio foram compactados na umidade ótima em quatro camadas seguindo os procedimentos adotados pelo Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT) - ME -228/1994 – Solos – Compactação em Equipamento Miniatura para energia intermediária. A compactação foi semelhante a adotada na confecção dos corpos de prova para os ensaios de compressão simples.

O ensaio para determinação do módulo resiliente seguiu os procedimentos descritos na norma AASHTO T307-99, utilizando-se uma prensa triaxial cíclica da ELE/IPC Global, sistema de controle e registro das deformações e um sistema pneumático de carregamento (Fig. 3.22).

O ensaio começa com o pré-condicionamento da amostra mediante a aplicação de 500 repetições de uma tensão desvio de 41,7 kPa. O tipo de onda utilizado é Haversine. Começa então uma sequência de carregamentos aplicados em estágios, de forma que tanto a tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ) quanto a tensão desvio ( $\sigma_d$ ) são variáveis. Inicialmente a tensão confinante é definida, e a tensão desvio é aumentada. Num segundo momento, a tensão de confinamento é incrementada e a tensão desvio varia. Os valores de módulo de resiliência são calculados para uma tensão desvio e uma tensão confinante específicas (Jiménez, 2011).

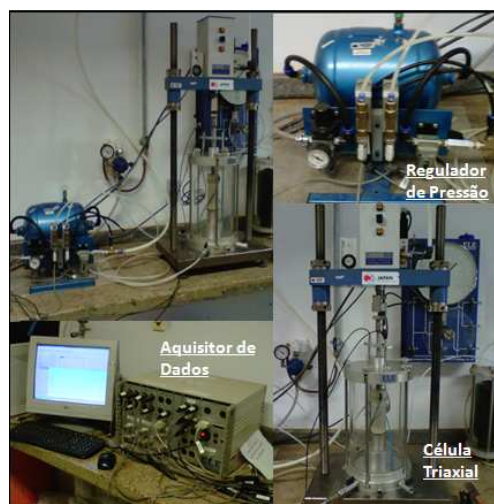


Figura 3.22 – Equipamento utilizado no ensaio de resiliência.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS

As fibras utilizadas neste estudo apresentaram diâmetro compreendido entre 0,06 e 0,08 mm, teor de umidade de 8,2%, massa específica de 1,03 g/cm<sup>3</sup> e índice de absorção de 24%. Considerando que as fibras utilizadas apresentaram comprimento entre 1,0 e 1,5 cm, o índice aspecto (L/D) médio encontrado foi de 1,79.

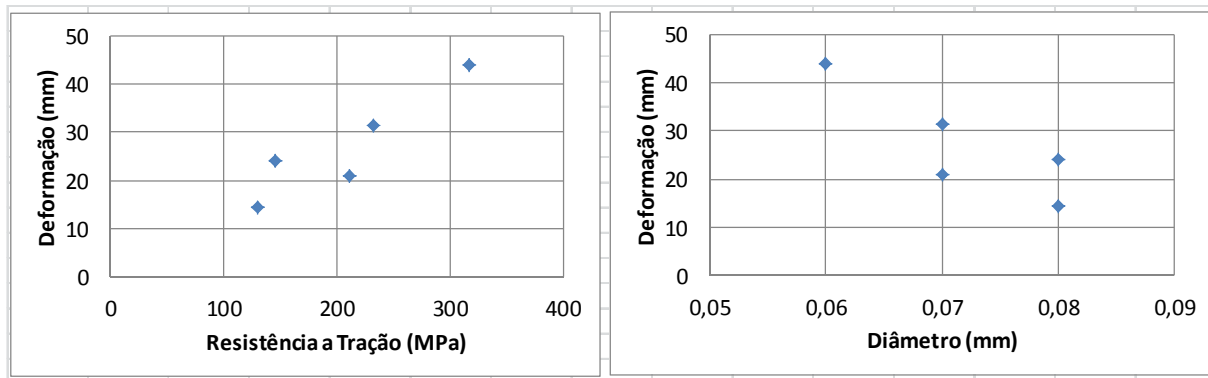
Normalmente a resistência à tração das fibras do aço comercial varia de 370 a 520 MPa, enquanto que aço SAE 1008 alcança uma resistência a tração de até 308 MPa. De acordo com este estudo, as fibras de cabelo apresentaram uma resistência a tração variando entre 129,75 e 316,80 MPa como mostra a Tabela 4.1. Segundo os estudos realizados por Silva (2003), a resistência a tração da fibra de sisal sem nenhum tipo de tratamento realizado variou entre 101 e 402 MPa, enquanto que a fibra de coco apresentou um resistência variando entre 65 e 250 MPa. Agopyan (1991) apud Silva (2010) encontrou valores de resistência a tração da fibra de sisal variando entre 347 a 348 MPa. Dessa forma pode-se observar que a resistência do cabelo pode ser comparada à fibra de sisal e pode ser maior que a resistência da fibra de coco e da fibra de alguns tipos de aço como é o caso do SAE 1008.

Tabela 4.1 - Resistência a tração dos fios de Cabelo

<b>Amostra</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Carga Máxima (g)</b>	<b>Resistência a Tração (MPa)</b>	<b>Deformação (mm)</b>
<b>1</b>	0,07	91,32	232,84	31,50
<b>2</b>	0,06	91,29	316,80	44,00
<b>3</b>	0,08	74,75	145,91	24,00
<b>4</b>	0,08	58,17	129,75	14,50
<b>5</b>	0,07	83,03	211,69	21,00
<b>MÉDIA</b>			<b>207,40</b>	<b>27,00</b>

Plotando-se o gráfico da deformação medida na ruptura em função da resistência à tração verifica-se que aquela tende a aumentar com o aumento desta (Fig. 4.1a). Ao mesmo tempo verifica-se que a deformação de ruptura medida no ensaio diminui com o aumento do diâmetro da fibra. (Fig. 4.1b). Uma hipótese inicial seria a de que o aumento do diâmetro da

fibra seria função do aumento da umidade e que para maiores umidades a fibra resistiria menos. No entanto, estas observações devem ser melhor estudadas uma vez que o comportamento pode também estar ligado à composição das fibras e à distribuição diametral desta composição.



(a)

(b)

Figura 4.1– Comportamento das fibras utilizadas.

A Figura 4.2 obtida para as cinco fibras ensaiadas mostra que elas tendem a se deformarem linearmente com a tensão aplicada. Nos resultados de interpolação linear observa-se que apenas uma das fibras, aquela cuja análise dos resultados se fundamentou em apenas um ponto, apresentou coeficiente angular significativamente diferente dos demais. Porém, plotando-se os valores da intersecção com o eixo das ordenadas em relação ao diâmetro das fibras (Fig. 4.3) verifica-se que a resistência das mesmas para deformações axiais nulas seriam inversamente proporcionais ao diâmetro. Isso aponta para a confirmação da hipótese de que a resistência das fibras depende do grau de hidratação das mesmas requerendo estudos complementares para melhor avaliar este aspecto.

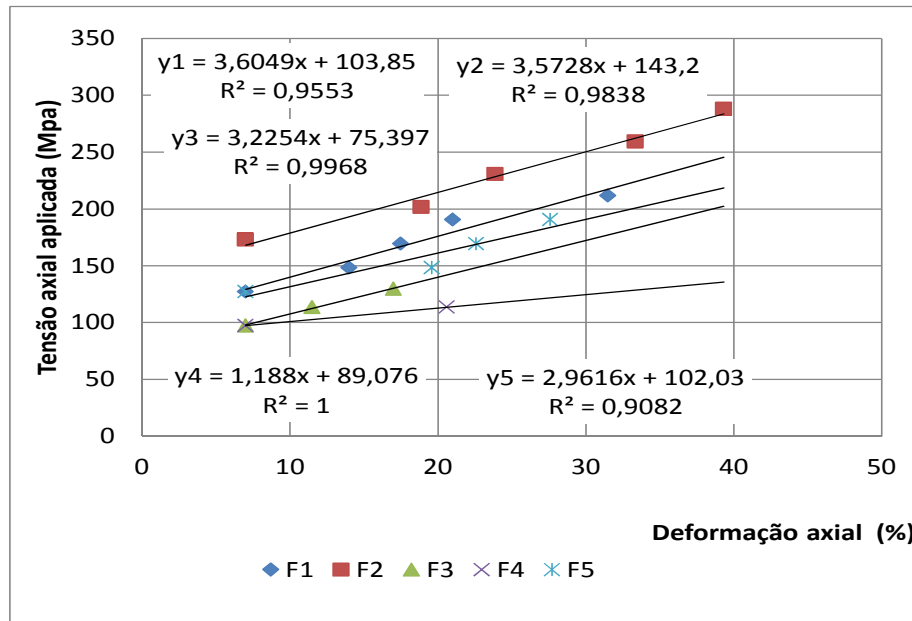


Figura 4.2 – Curva tensão-deformação das fibras.

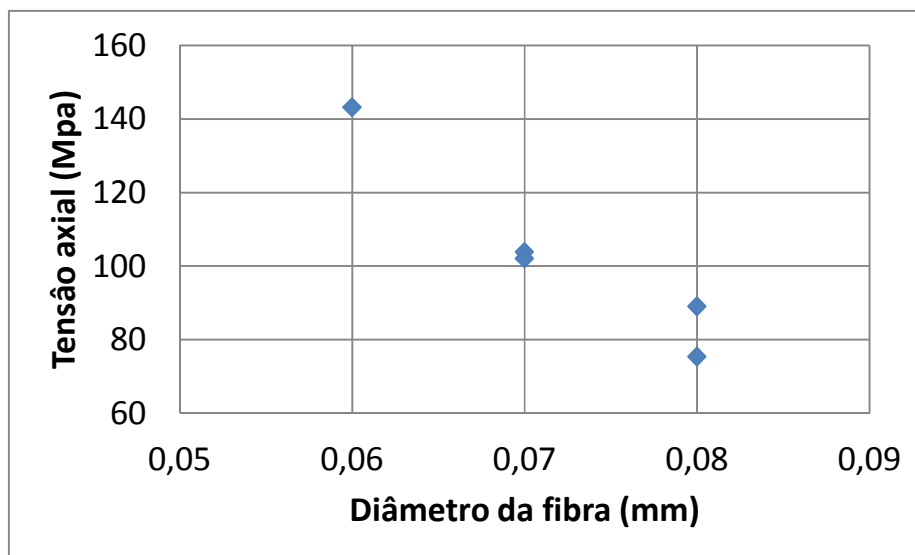


Figura 4.3 – Curva tensão-diâmetro das fibras.

As tentativas de determinação das umidades dos fios de cabelo e de eventuais variações de volume foram, dentro da metodologia adotada, frustradas. Com isso os resultados que se seguem se referem apenas às tensões de sorção determinadas com base nas sucções atuantes em papéis filtro mantidos em contato com os fios de cabelo e que foram submetidos ao ensaio de resistência a tração.

A Figura 4.4 a mostra que se analisada a resistência a tração dos cabelos ensaiados em termos de tensão ela diminui com o aumento do diâmetro dos fios contrariando o que se

poderia normalmente esperar. A análise em termos de força (Figura 4.4 b) aponta, apesar da grande dispersão dos resultados para a manutenção da força máxima de ruptura independentemente do diâmetro do fio de cabelo. Este comportamento explicaria os resultados mostrados na Figura 4.4 a e ao mesmo tempo indica que para um mesmo tipo de cabelo teria alguma propriedade interna que independe do diâmetro do fio e define a resistência. Estas assertivas merecem, no entanto, serem comprovadas pela realização de mais ensaios e estudos complementares.

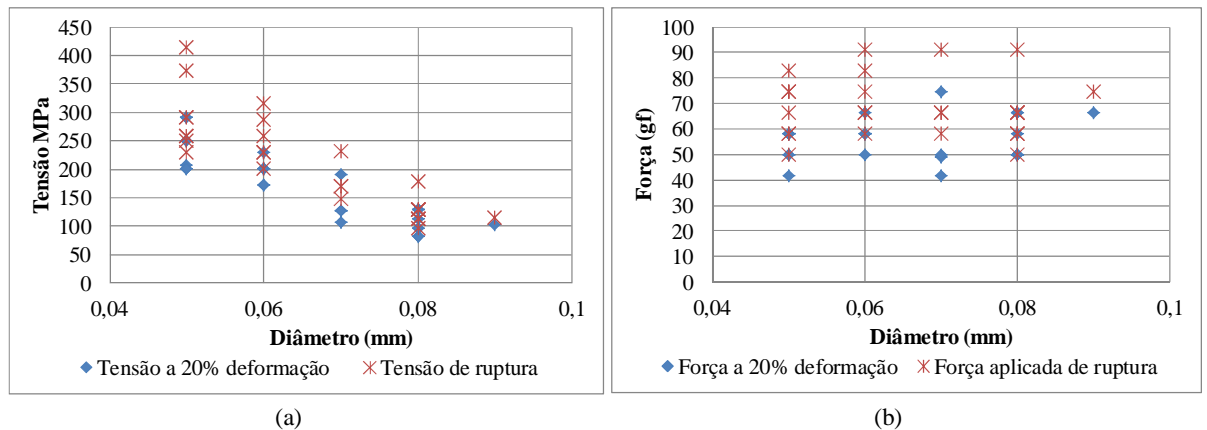


Figura 4.4 – a) Tensão versus diâmetro do cabelo; b) força de tração versus diâmetro do fio de cabelo

A Figura 4.5a apresenta a força de tração em função da tensão de sorção estimada a partir da sucção medida em papéis filtro mantidos em contato com os fios de cabelo ensaiados. Nesta figura percebe-se que a resistência a tração em termos de força sofre inicialmente uma redução com o aumento da tensão de sorção até que esta atinge aproximadamente 1000 kPa, tendendo a manter-se constante a partir deste valor. Quando avaliada a força de tração em função do peso específico dos fios de cabelo determinados considerando-se o diâmetro, comprimento inicial e peso úmido (Fig. 4.5b), não se verifica qualquer tendência confirmando assim o entendimento fixado ao se considerar a força de tração em função do diâmetro do fio de cabelo.

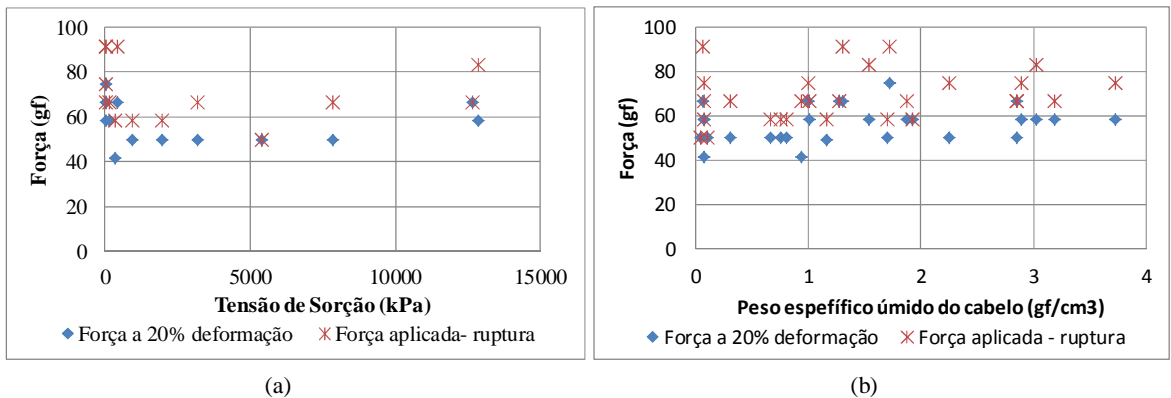


Figura 4.5 – a) Força de tração versus tensão de sorção; b) força de tração versus peso específico úmido dos fios de cabelo.

Analisando-se agora o comportamento dos fios de cabelo em termos de tensão, verifica-se que tanto em função da tensão de sorção (Figura 4.6a) como do peso específico úmido dos fios de cabelo (Figura 4.6b) ela sofre inicialmente uma redução tendendo a aumentar em seguida.

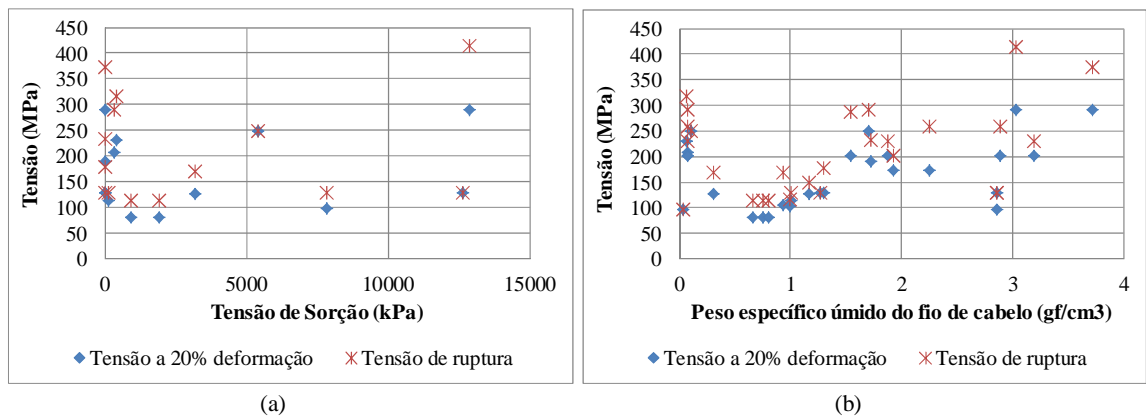


Figura 4.6 – a) Tensão de tração versus tensão de sorção; b) tensão de tração versus peso específico úmido dos fios de cabelo.

Com base nestes resultados sobressai a necessidade de maiores estudos sobre o comportamento do fio de cabelo de modo individualizado. Faz-se necessário, por exemplo, entender porque o diâmetro não afeta a resistência a tração em termos de força e porque ocorre inicialmente uma queda na resistência a tração com o aumento da tensão de sorção.

## 4.2 MINI-COMPACTAÇÃO

Os processos de compactação realizados nas diversas misturas apresentaram resultados de umidade ótima e peso específicos distintos como mostra a Tabela 4.2. As condições apresentadas pela mistura MP1 e MP3 apontam para um melhor comportamento, tendo em vista o maior peso específico obtido para estas misturas.

Tabela 4.2 – Resultados obtidos no ensaio de compactação

MISTURA	Wótima (%)	$\rho_{\text{máx}}$ (KN/m <sup>3</sup> )
<b>MP1</b>	14,00	18,80
<b>MP2</b>	8,00	17,10
<b>MP3</b>	16,00	18,70

Foram determinadas curvas de compactação para todas as misturas com e sem a adição de fibras como é apresentado nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 abaixo. De acordo com as curvas de compactação as misturas onde se adicionou 0,25% de fibra apresentaram um melhor comportamento independente da quantidade de areia adicionada, com exceção da mistura pura 1 que apresentou um comportamento semelhante ao do solo sem adição de fibras.

Nas demais misturas ao aumentar-se o teor de fibra para 0,50% não foi verificado um melhor comportamento quando comparado às curvas das misturas sem adição de fibras, aliás a compactação quando da adição de 0,50% de fibras foi dificultada no caso das misturas MP1 e MP3. É importante destacar que durante a confecção dos corpos de prova com adição de 0,50% de fibra houve certa dificuldade na homogeneização, ocasionando uma aglomeração de fibras dentro da massa de solo, podendo desta forma ter influenciado no resultado das curvas de compactação assim como em outros ensaios onde se estudou o comportamento mecânico.

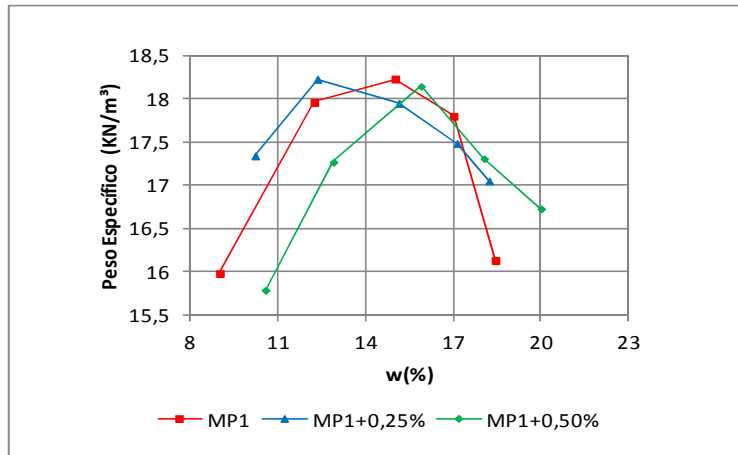


Figura 4.7 – Curva de compactação da mistura MP1.

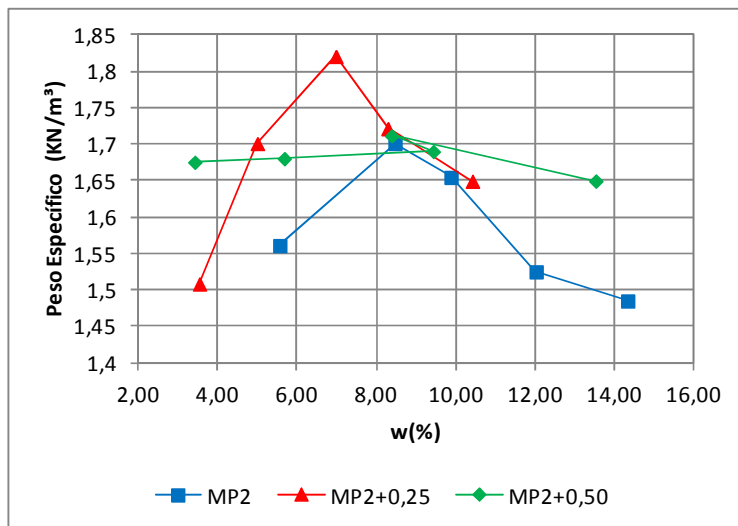


Figura 4.8 – Curva de compactação da mistura MP2.

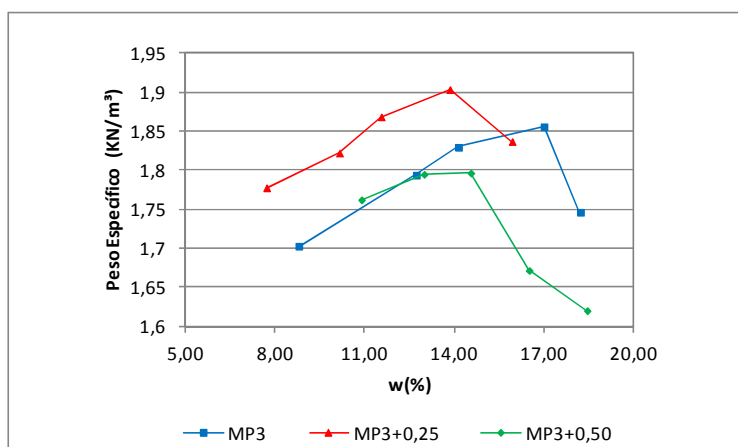


Figura 4.9 – Curva de compactação da mistura MP3.



As Figuras 4.10 a 4.11 apresentam os resultados de e.pF em função de Sr para as diferentes misturas com e sem a adição de fibras. As Figuras 4.7 e 4.9 mostram que para as misturas MP1 e MP3 não é clara a tendência dos resultados de e.pF x Sr serem afetados pela adição de fibra nos teores de 0,25% e 0,50%. Este comportamento implica em isentar a sucção como fator interveniente no resultado da compactação e com isso as alterações registradas são provavelmente devidas a aspectos físicos relativos à presença das fibras. Já para a mistura MP2 verifica-se tendência da relação e.pF x Sr ser afetada pela adição de fibras podendo assim intervir nos resultados de compactação o que não isenta a interferência física das fibras nos resultados dadas as formas de curvas de compactação obtidas.

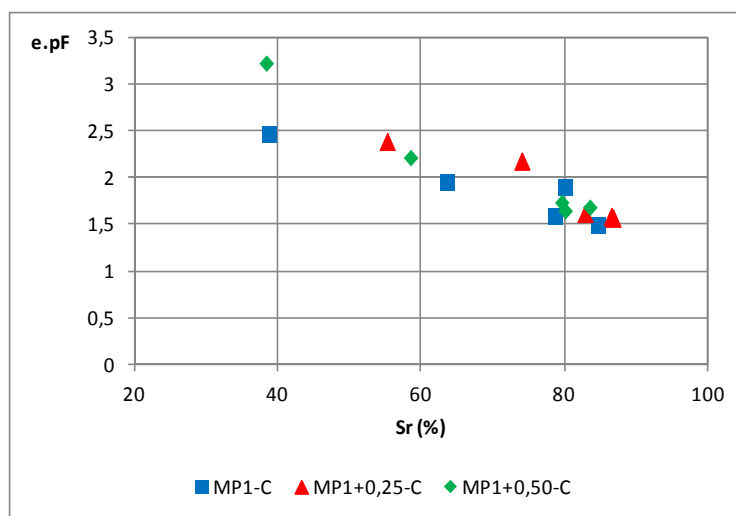


Figura 4.10 – Sucção versus grau de saturação – MP1.

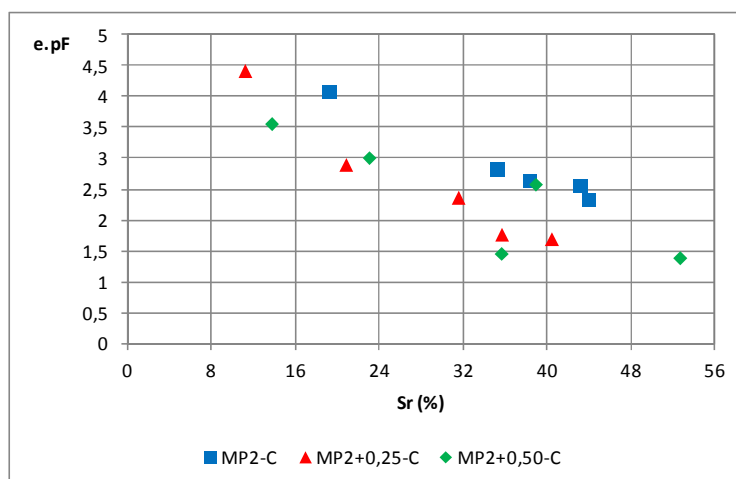


Figura 4.11 – Sucção versus grau de saturação – MP2.

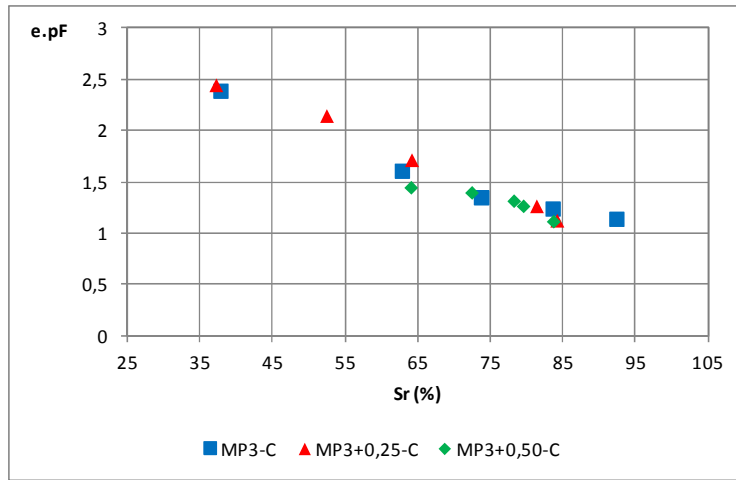


Figura 4.12 – Sucção versus grau de saturação – MP3.

A Figura 4.13 mostra que o conjunto de resultados obtidos para cada mistura são diferentes entre eles. Como esperado observa-se que a incorporação da areia tende a reduzir o resultado e.pF, ou seja, para um mesmo índice de vazios se tem valores de sucção que diminuem com a incorporação da areia conduzindo a uma redução na pressão de entrada de ar das misturas. Observa-se ainda destes resultados que a mistura com incorporação de 75% de areia (mistura MP2) foi a que apresentou maior dispersão nos resultados.

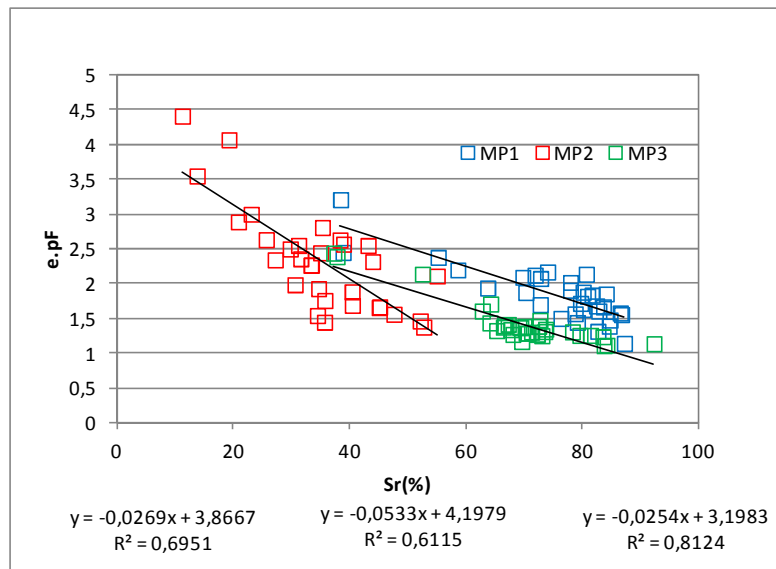


Figura 4.13 – Sucção versus grau de saturação.

### 4.3 CURVA CARACTERÍSTICA

Define-se como curva característica de retenção de água a relação entre a quantidade de água presente nos poros do solo e as respectivas sucções neles atuantes. Esta quantidade de água pode ser considerada em termos de umidade gravimétrica ou volumétrica e a sucção é geralmente considerada como unidade de pressão embora possa ser também considerada em centímetros de coluna de água.

A curva característica de retenção de água do solo tem grande importância no estudo e entendimento do comportamento mecânico dos solos não saturados o que conduziu ao seu estudo em maior detalhe.

Nesta pesquisa foi determinada a sucção em todos os corpos de prova destinados aos ensaios mecânicos com o objetivo de avaliar a influência da sucção no comportamento dos solos estabilizados granulometricamente e reforçados com fibras naturais. A partir dos valores de sucção obtidos foi possível definir as curvas características das misturas de solo com e sem adição de fibra. Cabe destacar que enquanto as sucções obtidas para os corpos de prova destinados a miniCBR e módulo resiliente foram determinadas para as respectivas umidades de compactação, as referentes aos ensaios de tração foram obtidas compactando-se o solo na condição ótima e fazendo-se em seguida variar a umidade para o teor desejado. Esta observação é importante, pois os procedimentos adotados podem refletir em modelos de distribuição de poros distintos conduzindo a alterações nas curvas características de retenção de água.

As curvas característica estão apresentadas em termos de  $pF$ , ou seja, logaritmo da sucção em centímetro de coluna d'água, versus a umidade ( $w$ ) e do produto do índice de vazios pela sucção ( $e.pF$ ) versus o grau de saturação ( $S_r$ ). A representação em termos de  $e.pF$  foi proposta por Camapum de Carvalho e Leroueil (2000b), com o objetivo de facilitar e integrar os aspectos físicos e químicos dos solos não saturados. O modelo proposto é intitulado de curva característica transformada.

As Figuras 4.14 (a) e 4.14 (b) mostram a influência da inclusão de fibras nas sucções das misturas MP1 submetidas ao ensaio de compactação ( $C$ ), resistência a tração por compressão diametral (RTCD) e módulo resiliente (MR). Observa-se tanto na Figura 4.14 (a) como na 4.14 (b) que os resultados obtidos medindo-se a sucção na umidade de compactação dos corpos de prova (corpos de prova destinados ao miniCBR), não foram afetados pela

incorporação de fibras. Já nos resultados obtidos para os corpos de prova submetidos a variações de umidade após a compactação, verifica-se, apesar da variação ser limitada, maiores valores de sucção para os corpos de prova estabilizados com fibra e esta sucção tendeu a ser maior para o maior teor de fibras. Seria possível estabelecer a hipótese de que neste caso as fibras teriam atuado impedindo as variações volumétricas dos corpos de prova durante as variações de umidade impostas, no entanto, se tivesse sido apenas isto o ocorrido, no gráfico  $S_r$  x  $e.pF$  se teria a coincidência dos valores obtidos com e sem fibra, pois o efeito da variação do índice de vazios teria sido eliminado. Com isso, torna-se recomendável admitir que se trate de um problema de variabilidade.

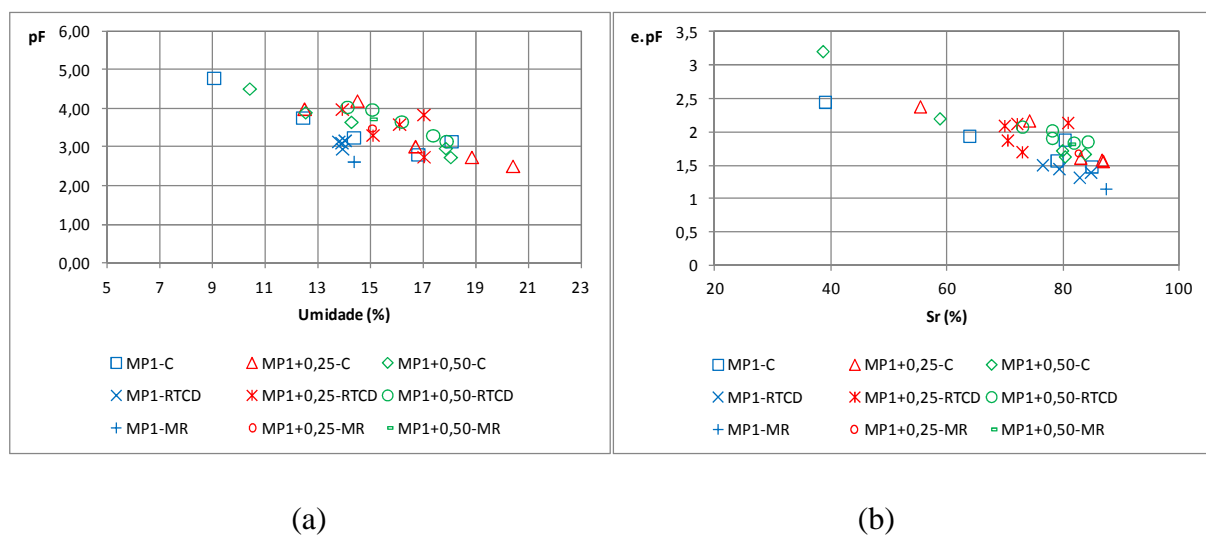


Figura 4.14 – Curvas características modificadas de (a) e (b) MP1 com e sem adição de fibras.

Para a mistura de solo com maior teor de areia, mistura MP2, mostrada nas Figura 4.15 (a) e (b), é possível observar que para as sucções determinadas nas respectivas condições de compactação os valores obtidos para a mistura sem fibra foi superior aos obtidos para as misturas com fibras sem que seja possível caracterizar a influência do teor de fibras. Para as sucções determinadas sobre os corpos de prova destinados aos ensaios de resistência a tração para os quais se variou a umidade após a compactação não se observa variações significativas entre as três misturas (MP1, MP1+0,25%, MP1+0,5%). Estes resultados aparentemente contradizem os obtidos para a mistura MP1, no entanto, há que se atentar para o fato do teor de areia acrescido na mistura MP2 (75%) ser muito superior ao da mistura MP1 (25%), o que implica no caso da mistura MP2 em limitada possibilidade de variação volumétrica devido a alteração do teor de umidade. As maiores sucções para um mesmo grau de saturação determinadas para a mistura MP2 em relação a MP2+0,25% e MP2+0,50% podem ser reflexo

de variações na distribuição de poros, mas a diferença de comportamento merece ser melhor analisada. Chama ainda a atenção a maior variabilidade nos resultados de sucção obtidos para a mistura sem fibra quando do uso de amostras submetidas à variação de umidade.

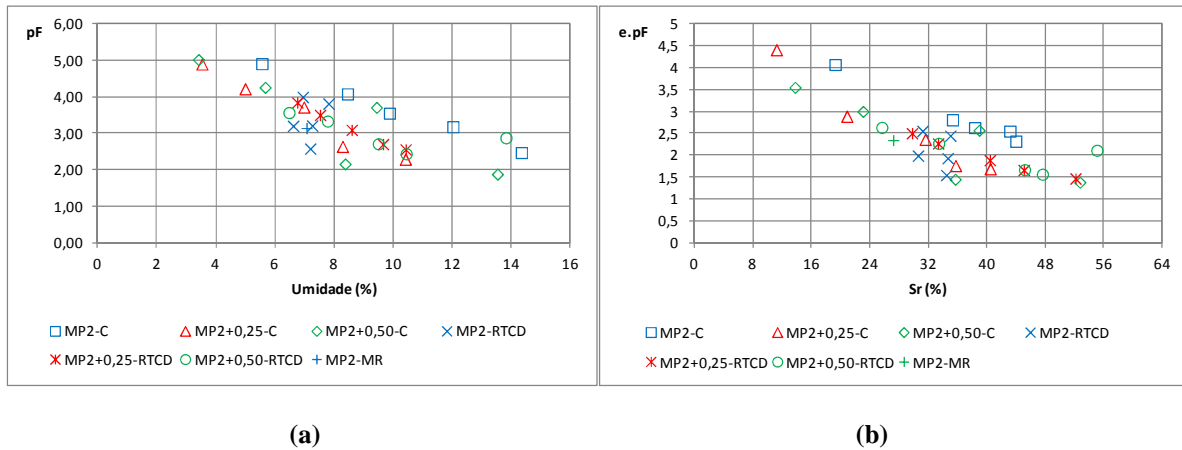


Figura 4.15 – Curvas características modificadas de (a) e (b) MP2 com e sem adição de fibras.

Para as amostras com iguais teores de argila (50%) e de areia (50%), mistura MP3, os valores de sucção foram semelhantes para todas as amostras com e sem adição de fibras, conforme mostram as Figura 4.16 (a) e (b). A inversão de comportamento entre as misturas MP1 e MP2 em relação a influência da adição de fibras e o comportamento semelhante registrado para as misturas MP3 com e sem a adição de fibras, apontam para certa interferência das fibras no mecanismo de interação interpartículas, interferência esta que varia com a distribuição granulométrica do solo.

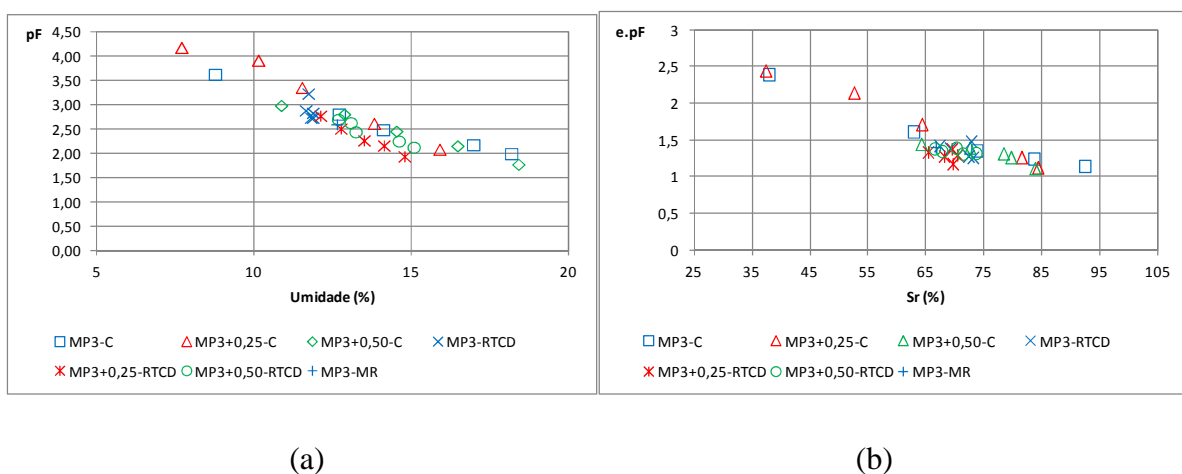


Figura 4.16 – Curvas características modificadas de (a) e (b) MP3 com e sem adição de fibras.

#### 4.4 MINI-CBR

Os ensaios de Mini-CBR foram realizados com o objetivo de avaliar a capacidade de suporte dos solos quando da adição das fibras. Para melhor compreensão dos resultados, estes foram divididos por mistura, fazendo-se ao final uma análise do conjunto de resultados. Para a avaliação da influência das fibras no comportamento mecânico das misturas foram realizados ensaios com e sem imersão. O comportamento das misturas em estado saturado e não saturado podem ser distintos pela simples atuação da sucção quando não saturada, mas também devido a interferência deste parâmetro nos mecanismos de interação fibra-solo. Para melhor entendimento da influência das fibras no comportamento das misturas os ensaios em condição não saturada serão analisados em função da relação  $pF/e$  onde  $pF$  é o logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água. Esta análise em termos de  $pF/e$  permite tornar o comportamento independente do índice de vazios.

##### 4.4.1 MISTURA 1 (25% Areia + 75% Argila) - MP1

Nas Figuras 4.17 e 4.18 são apresentados os gráficos de Mini-CBR (CI) para as misturas MP1 com e sem adição de fibras. A partir dos resultados de Mini-CBR obtidos nos ensaios com imersão e mostrados nestas figuras verifica-se que não é clara a influência das fibras na capacidade de carga da mistura MP1. Enquanto a incorporação de 0,25% de fibras piorou os valores de miniCBR, a de 0,50% apresentou tendência de melhorá-lo se considerados separadamente os ramos seco e úmido (Figura 4.15).

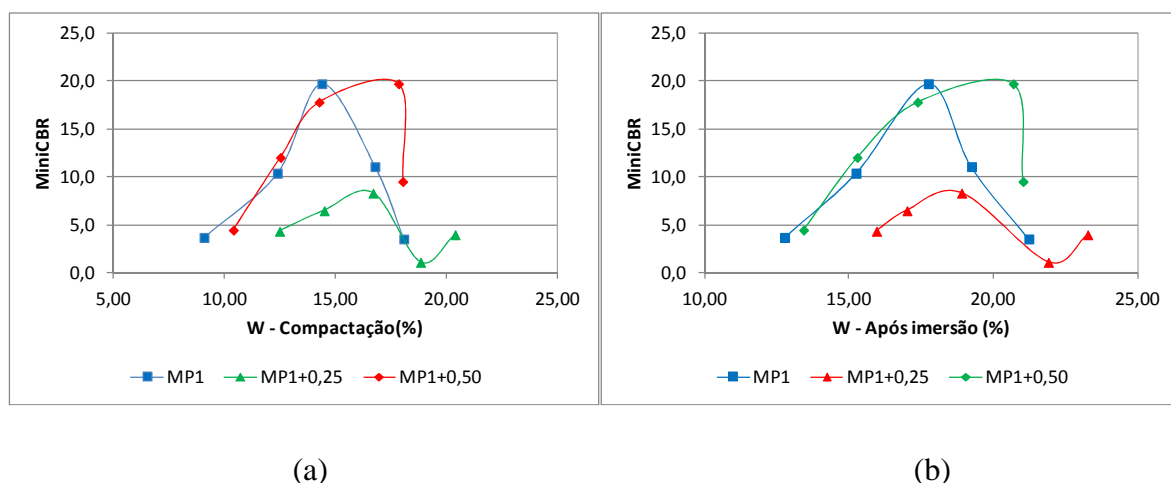


Figura 4.17 – Mini-CBR com imersão (CI) para as misturas MP1 com e sem adição de fibras.

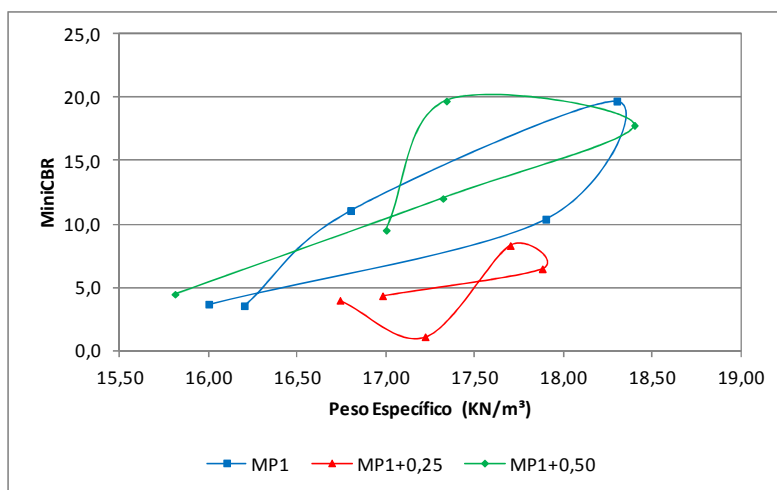
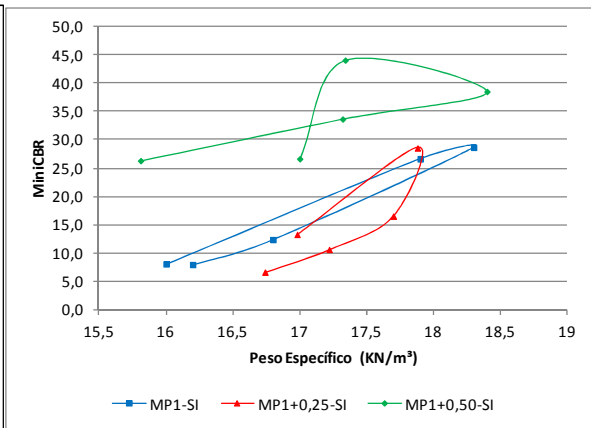
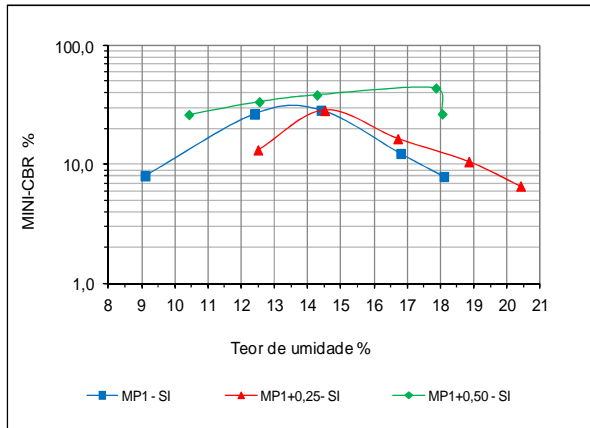


Figura 4.18 – Influência do peso específico da mistura MP1 com e sem adição de fibras nos resultados de miniCBR obtidos.

Considerando-se agora as misturas com o miniCBR realizado sem o uso de imersão dos corpos de prova, verifica-se na Figura 4.19 (a) que enquanto o acréscimo de 0,25% de fibra tende a não afetar o comportamento da mistura, o de 0,50% tende a melhorá-lo. Se considerado o efeito da sucção esta tendência se confirma (Figura 4.19 (c)).

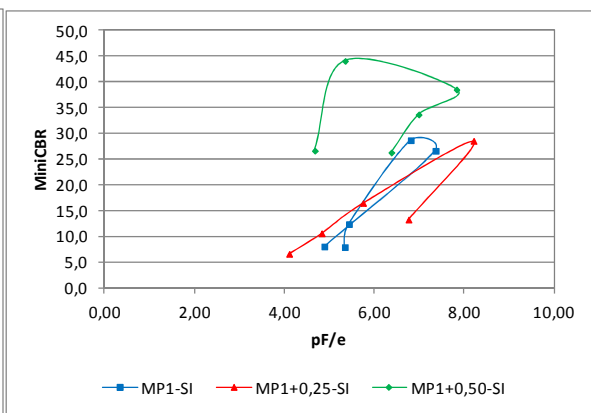
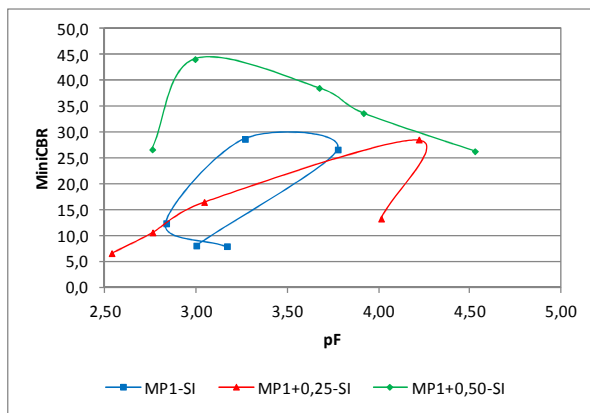
Tanto os resultados obtidos para os corpos de prova com imersão como aqueles obtidos nos ensaios realizados sem imersão, apontam, devido à distinção entre os comportamentos nos ramos seco e úmido, para a influência da umidade de compactação na estrutura da mistura MP1.

A comparação entre os resultados de miniCBR obtidos com e sem imersão mostram ainda ser a sucção de grande relevância para o comportamento da mistura MP1 contribuindo invariavelmente, como esperado, para a melhoria do comportamento mecânico.



(a)

(b)



(c)

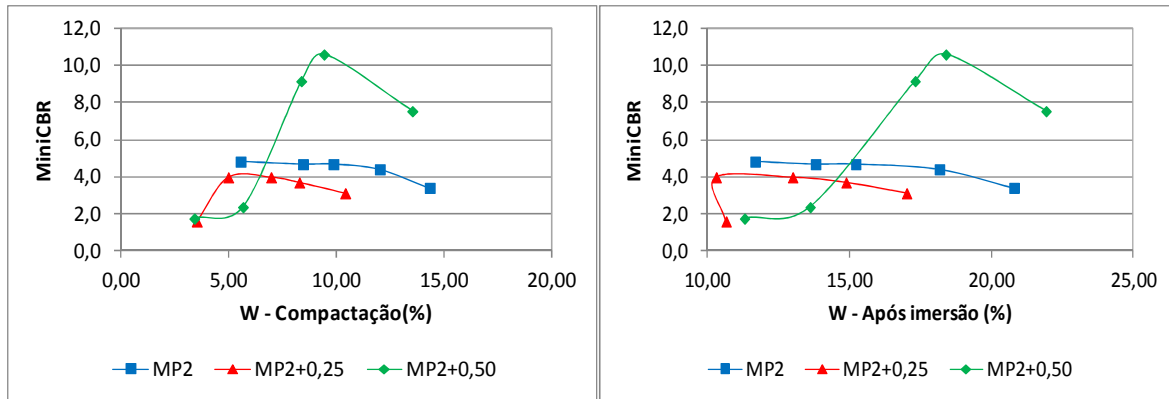
(d)

Figura 4.19 – Mini-CBR sem imersão (SI) para as misturas MP1 com e sem adição de fibras em função de: (a) Teor de Umidade (%); (b) Peso Específico (KN/m<sup>3</sup>); (c) pF; (d) pF/e.

#### 4.4.2 MISTURA 2 (75% Areia + 25% Argila) - MP2

Os resultados obtidos para as misturas MP2 sob condição de imersão revelam tendência de comportamento semelhante a verificada para a mistura MP1, ou seja, a incorporação de 0,25% de fibra (Fig. 4.20) tende a piorar o comportamento e a incorporação de 0,50% tende a melhorá-lo.





(a)

(b)

Figura 4.20 – Mini-CBR com imersão (CI) para as misturas MP2 com e sem adição de fibras.

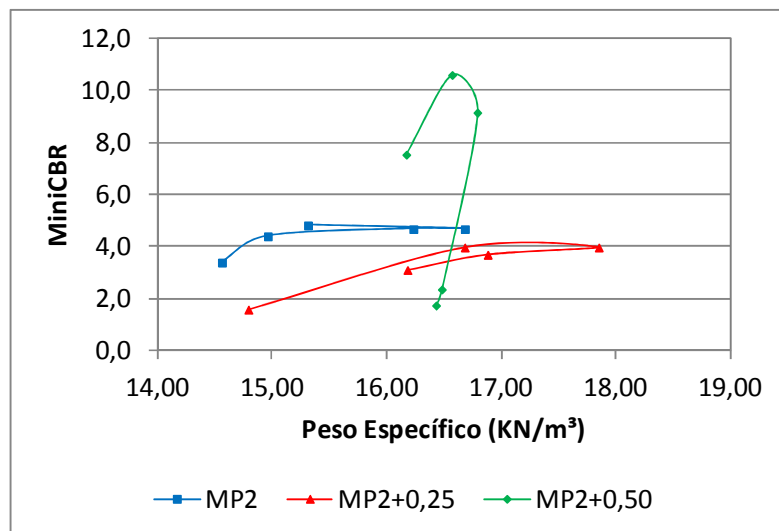
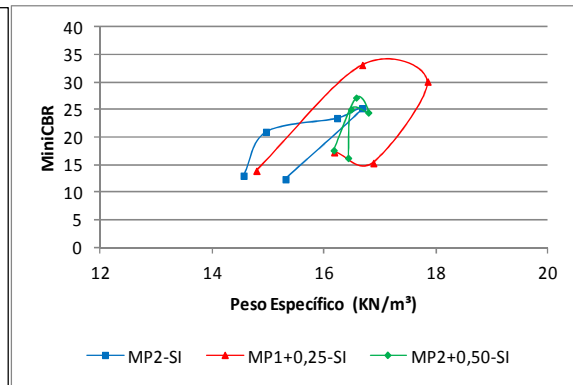
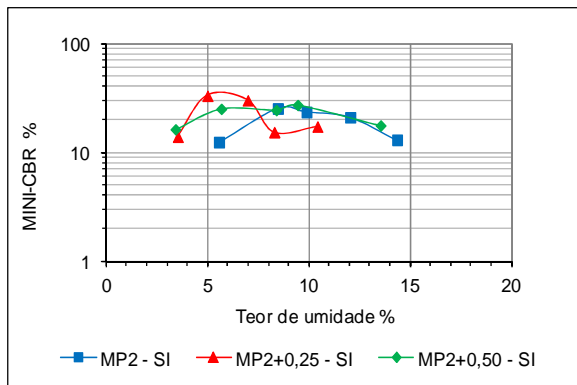


Figura 4.21 – Influência do peso específico da mistura MP2 com e sem adição de fibras nos resultados de miniCBR obtidos.

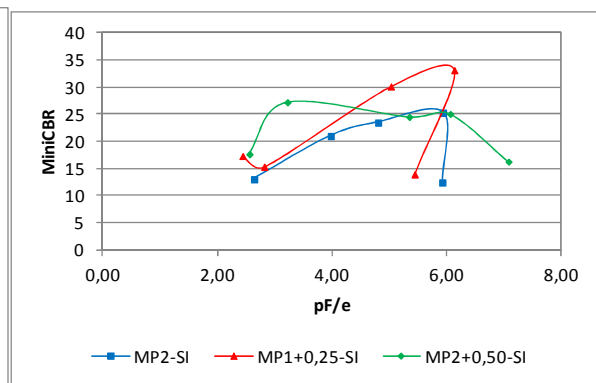
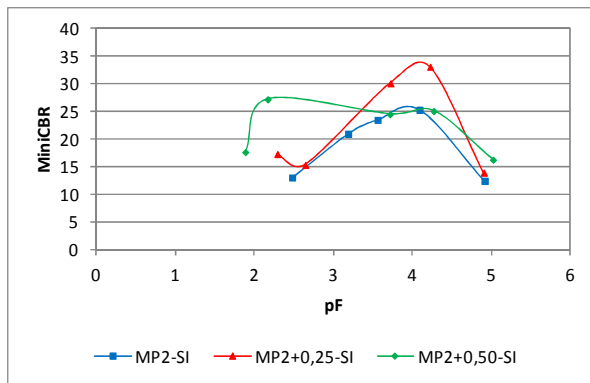
Na condição não saturada tende a sobressair a melhoria do comportamento da mistura MP2 com a adição de fibras, não ficando claro, no entanto, qual o melhor teor.

No caso das misturas MP2 o efeito da sucção nos valores de miniCBR é importante (Fig. 4.22).



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 4.22 – Mini-CBR sem imersão (SI) para as misturas MP2 com e sem adição de fibras em função de: (a) Teor de Umidade (%); (b) Peso Específico (KN/m<sup>3</sup>); (c) pF; (d) pF/e.

#### 4.4.3 MISTURA 3 (50% Areia + 50% Argila) - MP3

As Figura 4.23 e 4.24 mostram que a incorporação de fibras tende a aumentar os valores de miniCBR obtidos com imersão. Verifica-se ainda que esta melhoria aumenta com o teor de fibras.

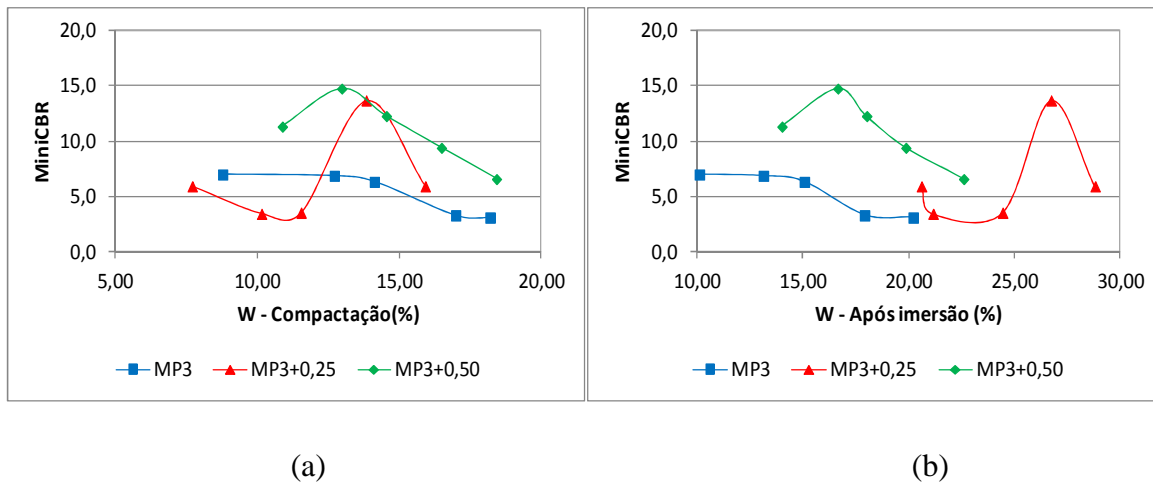


Figura 4.23 – Mini-CBR com imersão (CI) para as misturas MP3 com e sem adição de fibras.

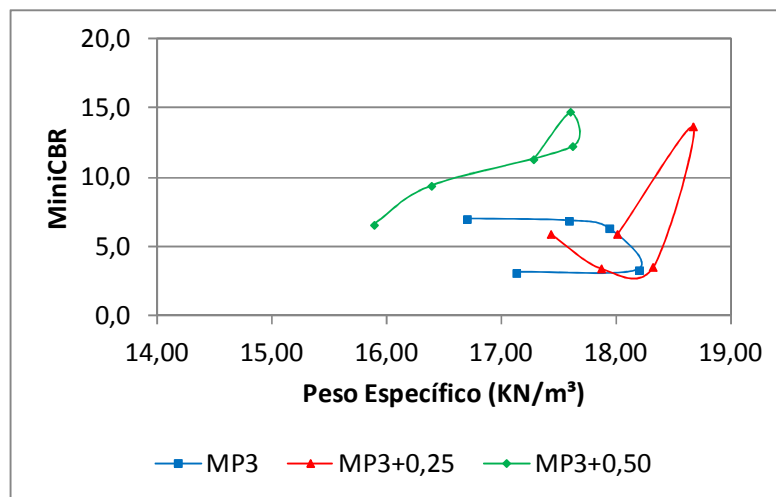


Figura 4.24 – Influência do peso específico da mistura MP3 com e sem adição de fibras nos resultados de miniCBR obtidos.

Para os ensaios realizados sem o uso de imersão, não é possível neste caso estabelecer com clareza a influência das fibras no comportamento da mistura (Fig. 4.25), embora se verifique no gráfico de miniCBR em função da umidade de compactação que a mistura com 0,50% de fibras tende a comportar-se melhor que as demais enquanto aquela com 0,25% tende a melhorar o comportamento da mistura no ramo seco e a piorá-lo no úmido. Esta tendência se confirma no gráfico de miniCBR em função da sucção em pF embora ao se eliminar o efeito do índice de vazios no gráfico de miniCBR em função de pF/e

esta tendência de melhoria só aparece para valores mais elevados de sucção e menores de índice de vazios.

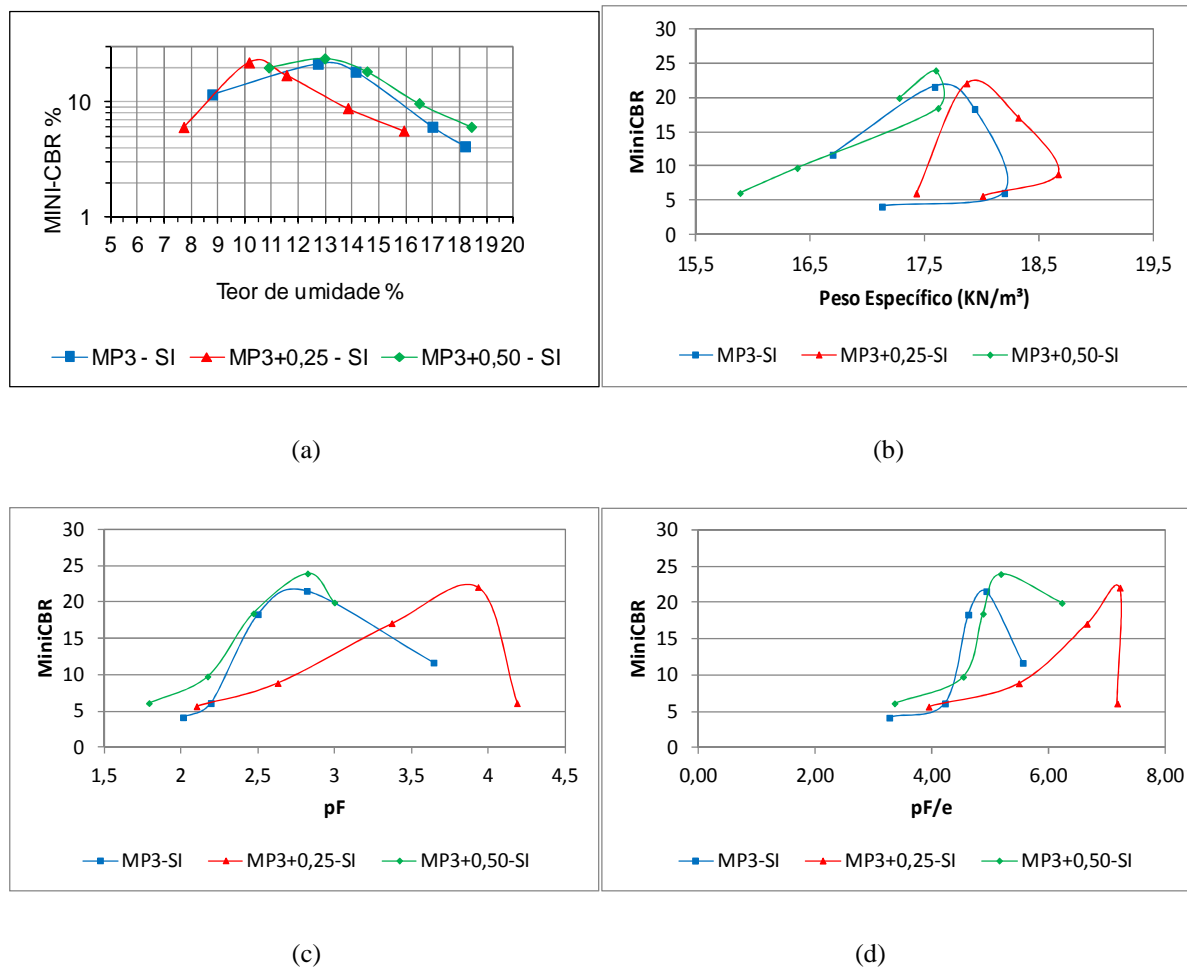


Figura 4.25 – Mini-CBR sem imersão (SI) para as misturas MP3 com e sem adição de fibras em função de: (a) Teor de Umidade (%); (b) Peso Específico (KN/m<sup>3</sup>); (c) pF; (d) pF/e.

Portanto, para o conjunto de resultados analisados não foi possível concluir sobre eventual melhoria do mini-CBR em consequência da incorporação de fibras naturais.

#### 4.4.4 SÍNTESE SOBRE OS RESULTADOS DE MINICBR

Como síntese do estudo da influência da incorporação das fibras naturais estudadas no comportamento das misturas MP1, MP2 e MP3, embora a incorporação de 0,50% de fibras aponte para uma melhoria do comportamento, é recomendável que se faça estudos complementares envolvendo outros teores e comprimentos de fibras incorporando análises estatísticas antes de utilizá-las com o objetivo de melhorar o CBR.

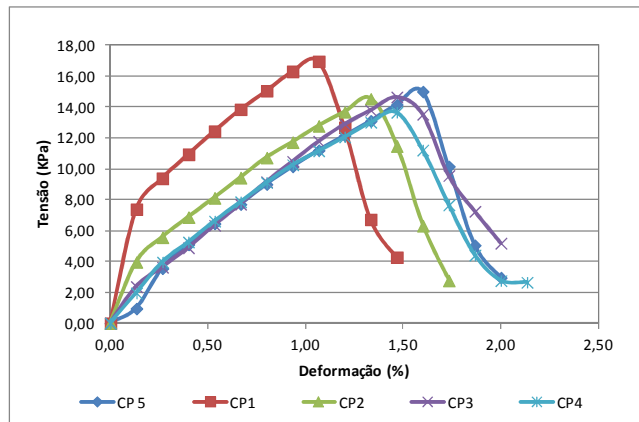
Os resultados mostraram ainda que a sucção exerce significativa influência no comportamento mecânico das misturas estudadas no que diz respeito ao resultados de miniCBR.

#### **4.5 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**

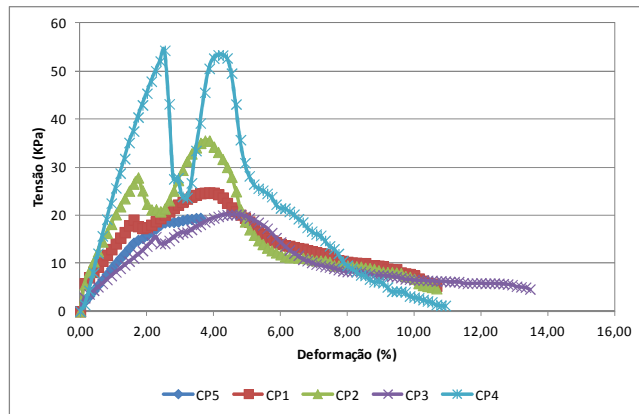
Um dos principais objetivos da estabilização com fibras é a melhoria da resistência à tração do solo e permitir que o solo sofra maiores deformação sem que ocorra a ruptura total por esforços de tração. Ao inibir as trincas de tração elas contribuem para a preservação da estrutura do solo, ao mesmo tempo em que nos solos argilosos as trincas eventualmente originadas, mas sem que ocorra a ruptura total da estrutura devido ao elo que se mantém por meio das fibras é passível de se regenerar ao longo do tempo devido a atuação de mecanismos como os relativos às forças eletromagnéticas e à ação da biota. Destaca-se que estes são aspectos a serem melhor analisados no contexto da engenharia. Os artigos publicados por Camapum de Carvalho (2006) e Camapum de Carvalho e Gitirana (2006) ao analisarem estruturas de pavimento construídas na Região Amazônica mostraram que as trincas em pavimentos com revestimento em AAUQ e base em solo fino são muitas vezes devidas a deformações de expansão e de contração do solo. Nestes casos as fibras atuariam então, minimizando estas deformações indutoras de trincas.

As Figuras 4.26 (a), mistura MP1, (b), mistura MP1 + 0,25% e (c), mistura MP1 + 0,50%, apresentam os resultados dos ensaios de compressão diametral dos corpos de prova moldados em cada condição apresentada para a mistura de solo denominada MP1. Para estas misturas foram utilizados cinco corpos de prova compactados na condição ótima e depois levados a umidades diferentes. Destaca-se em primeiro lugar que a mistura sem adição de fibra apresenta um formato de curva contínua (Figura 4.23 (a)), e que, uma vez ocorrida a ruptura a resistência cai abruptamente devido à falência estrutural do corpo de prova no plano de ruptura. Já nas misturas contendo fibras (Figura 4.23 (b) e (c)) verifica-se, que quando ocorre a ruptura do solo as fibras são acionadas contribuindo para o restabelecimento e melhoria da resistência máxima da mistura, ou seja, nestes casos, a falência estrutural do sistema solo fibra só tem lugar quando as fibras se rompem ou deslizam por cisalhamento no interior do corpo de prova. Segundo Jewell & Wroth (1987), as fibras ao serem solicitadas provocam uma redistribuição de esforços e deformações. Portanto, quando a matriz de solo se rompe os esforços nela aplicados são transferidos para as fibras e assim, a resistência que havia sido vencida na matriz de solo passa a ser absorvida pelas fibras, gerando outra resistência de pico.

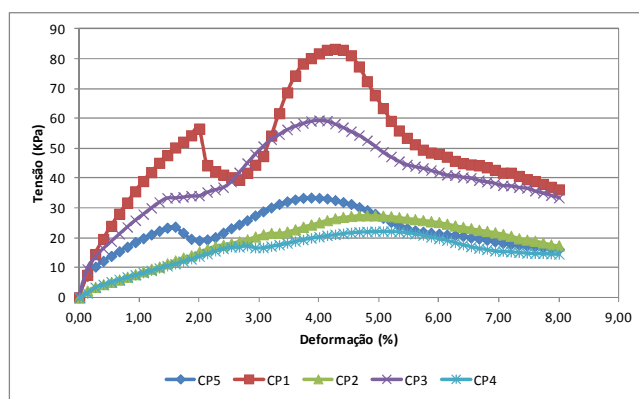
Estes modelos de comportamento se repetiram para as misturas MP2 e MP3 conforme mostrados nas Figuras 4.27 (a), (b) e (c) para a mistura MP2 e Figura 4.28 (a), (b) e (c) para a mistura MP3.



(a)

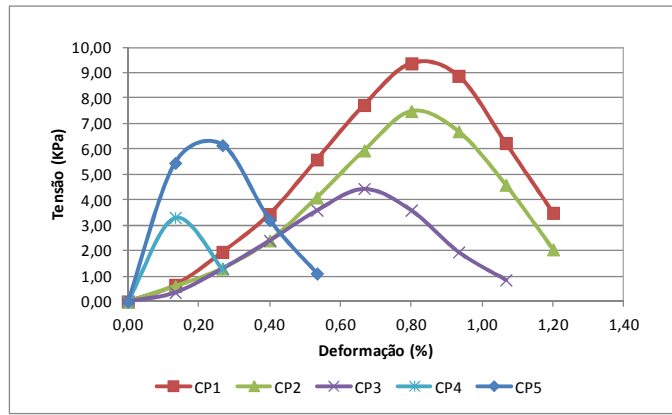


(b)

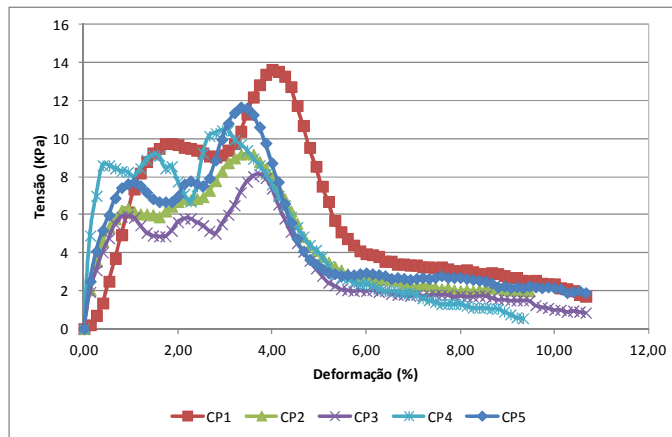


(c)

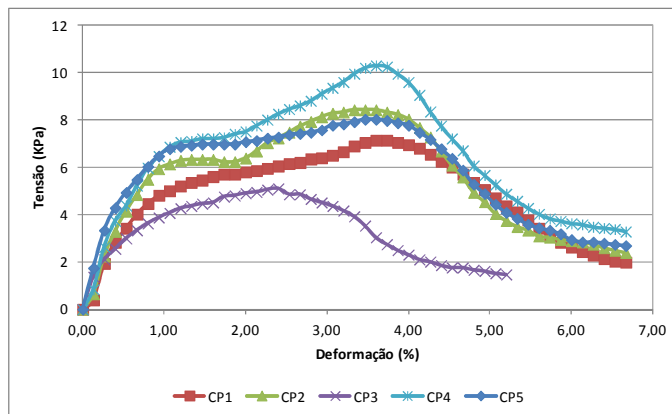
Figura 4.26 – Resistência a tração por compressão diametral das misturas (a)MP1; (b) MP1 +0,25% de fibra; (c) MP1 +0,50% de fibra.



(a)

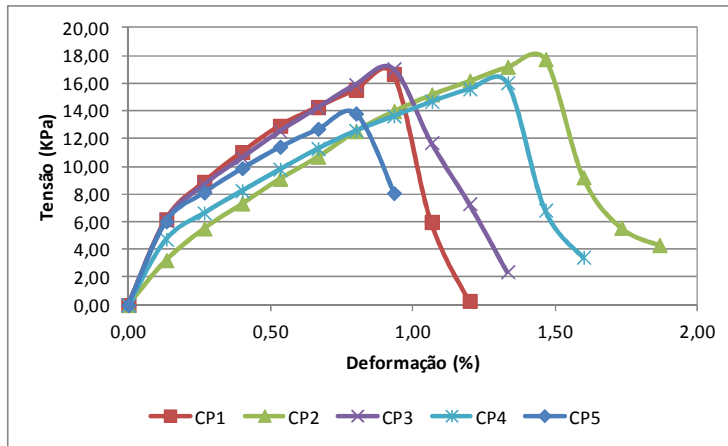


(b)

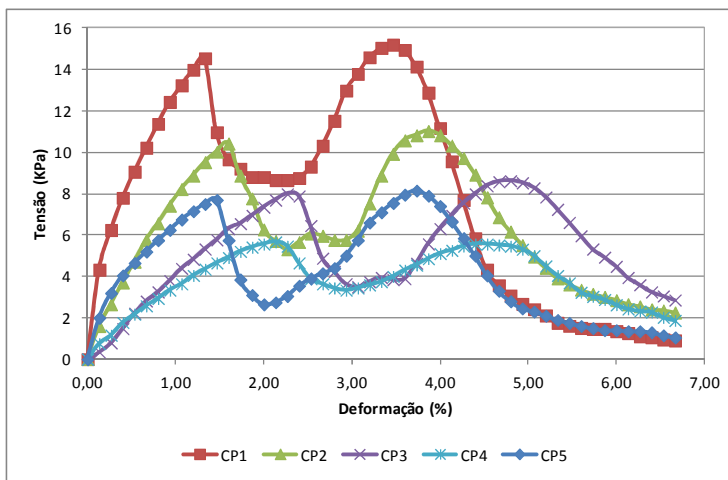


(c)

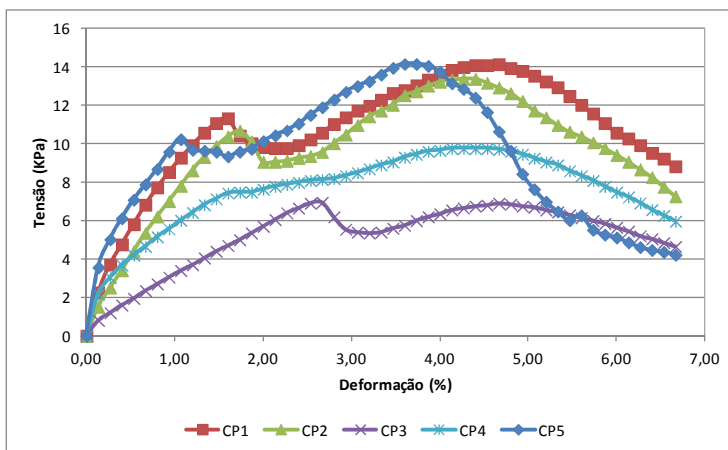
Figura 4.27 – Resistência a tração por compressão diametral das misturas (a) MP2; (b) MP2 + 0,25% de fibra; (c) MP2 + 0,50% de fibra.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.28 – Resistência a tração por compressão diametral das misturas (a) MP3; (b) MP3 + 0,25% de fibra; (c) MP3 + 0,50% de fibra.



Para melhor entendimento destes mecanismos são descritas a seguir as fases observadas durante os ensaios (Fig. 4.29). Estas fases representam o processo de ruptura e transferência de esforços que se dá entre a matriz de solo e as fibras. No caso das misturas sem adição de fibra apenas duas fases foram observadas, a fase 1, na qual se obtém a resistência de pico e o comportamento passa então diretamente para a fase 3 onde a matriz de rompe completamente e a resistência começa a cair. Nas misturas com adição de fibras a fase 3 ocorre após passar pela fase 2 da seguinte forma: as fibras distribuídas aleatoriamente dentro da matriz de solo se rompem a medida que se vai aplicando tensão (fase 1), porém, a matriz de solo não se rompe totalmente (fase 2) até que se rompa a última fibra (fase 3), este fato deve-se ao intertravamento dos fios nos grãos de areia adicionados à matriz (solo). Vale ressaltar que as cargas máximas de ruptura observadas para as amostras são inferiores à resistência à tração do fio de cabelo como apresentado anteriormente na Tabela 4.2. Resultados similares foram obtidos por Aguiar et al. (2009).

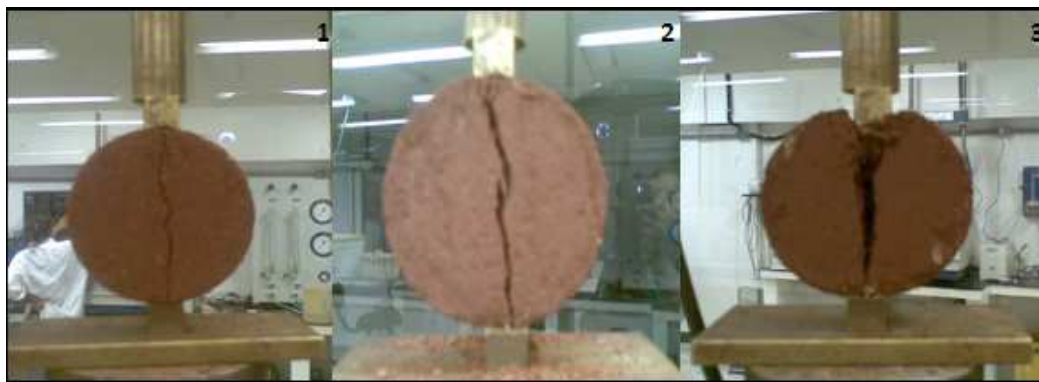


Figura 4.29 – Fase 1- Primeira resistência de pico; Fase 2 – Esforços sendo transferidos para as fibras; Fase 3- A tensão limite é atingida e o corpo de prova se rompe.

Muitos autores destacam que o comportamento tensão-deformação de compósitos reforçados com fibras é influenciado tanto por fatores relacionados à matriz (granulometria, índice de vazios, umidade, etc.) quanto pelo reforço oriundo da própria fibra (módulo, comprimento, espessura, rugosidade, orientação, teor e formato) (Casagrande, 2001). Considerando este fato, é importante avaliar o comportamento da matriz de solo reforçado com fibras levando-se em conta fatores como umidade, índice de vazios e sucção. Isso pode dar maior clareza ao entendimento da influência das fibras e da textura do solo na resistência à tração das misturas.

A Figura 4.30 apresenta os resultados obtidos para a mistura MP1. Observa-se nesta Figura que a resistência à tração das misturas contendo fibras tende a diminuir com o aumento tanto do teor de umidade e como do índice de vazios (Figura 4.27 (a) e (b)). Para a mistura

sem fibras não fica clara esta tendência, provavelmente devido ao pequeno intervalo de variação tanto da umidade como do índice de vazios. Considerando-se agora o efeito apenas da sucção (Figura 4.30 (c)), esta, função, dentre outros, da umidade e do índice de vazios do solo, observa-se pequena tendência dos resultados obtidos sem a adição de fibras se posicionarem abaixo daqueles obtidos para as misturas com adição de fibras. Porém, ao se eliminar o efeito do índice de vazios (Figura 4.30 (d)), observa-se que as fibras efetivamente aumentam a resistência à tração das misturas.

Analisando-se agora o efeito das fibras na deformação correspondente ao último pico nos gráficos de tensão x deformação, fica claro nas Figuras 4.30 (a) e (b), que as fibras naturais conduzem o solo a resistirem a maiores deformações antes da ruptura total do solo.

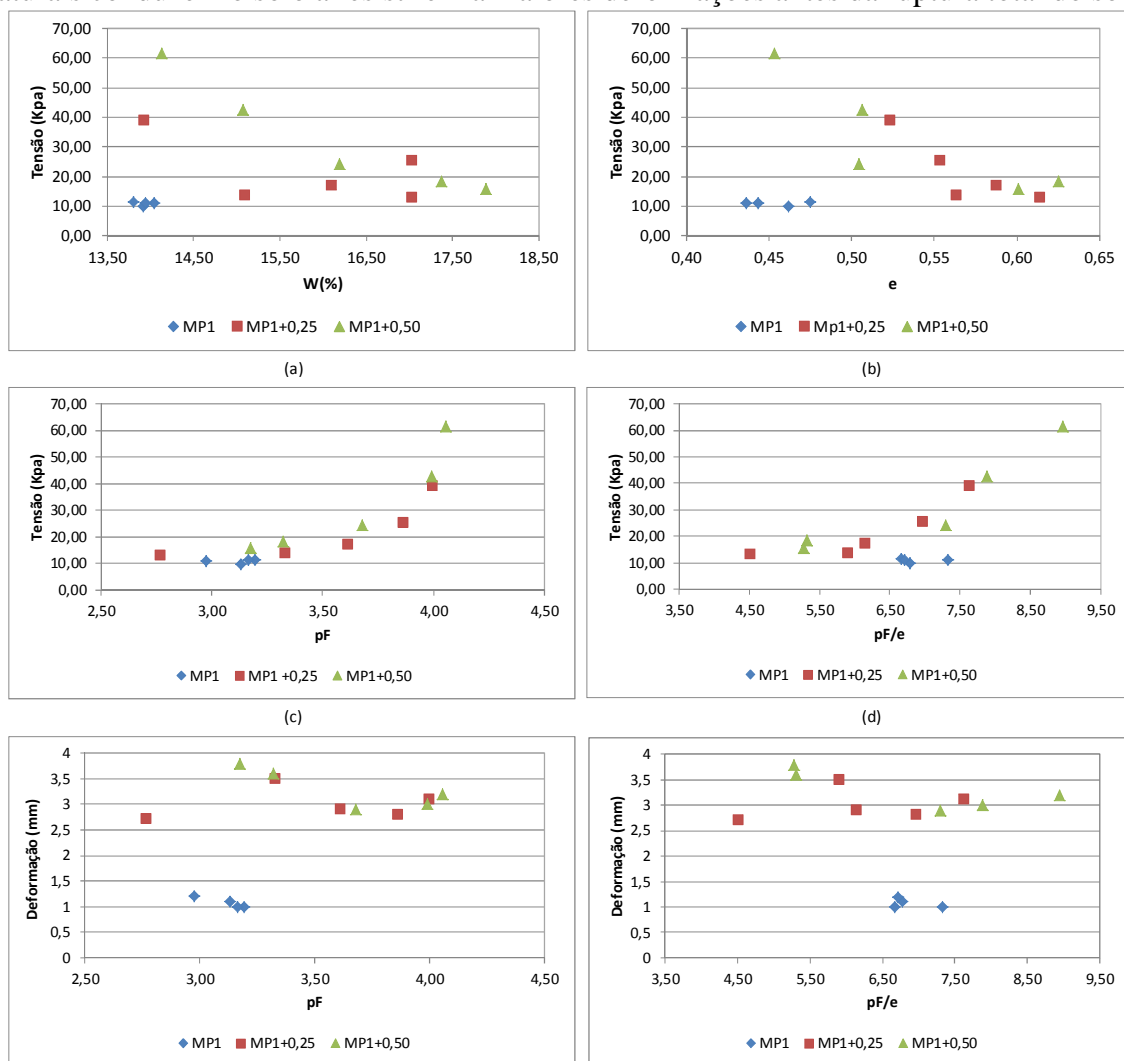


Figura 4.30 – Efeito das variáveis da mistura MP1 na resistência a tração da matriz de solo reforçada – (a) Tensão x umidade; (b) Tensão x e; (c) Tensão x pF; (d) Tensão x pF/e; (e) Deformação x pF; (f) Deformação x pF/e.

A Figura 4.31 (a) e (b) mostra que para a mistura MP2 a influência da umidade e do índice de vazios na resistência à tração não é tão bem definida como o foi no caso da mistura MP1. Observa-se, no entanto, a tendência dos resultados obtidos sem a incorporação de fibras se posicionarem abaixo dos valores obtidos com a incorporação destas. O mesmo se observa quanto a influência da sucção na resistência à tração (Figura 4.31 (c) e 4.31 (d)). Já quando as deformações de ruptura (Figura 4.31 (e) e 4.31 (f)), é claro o aumento destas com a incorporação das fibras. Quanto aos valores de resistência à tração observa-se que as misturas MP2 mostraram-se muito menos resistentes que as MP1. A deformações de ruptura foram para a mistura MP2 um pouco inferiores às obtidas para a mistura MP1.

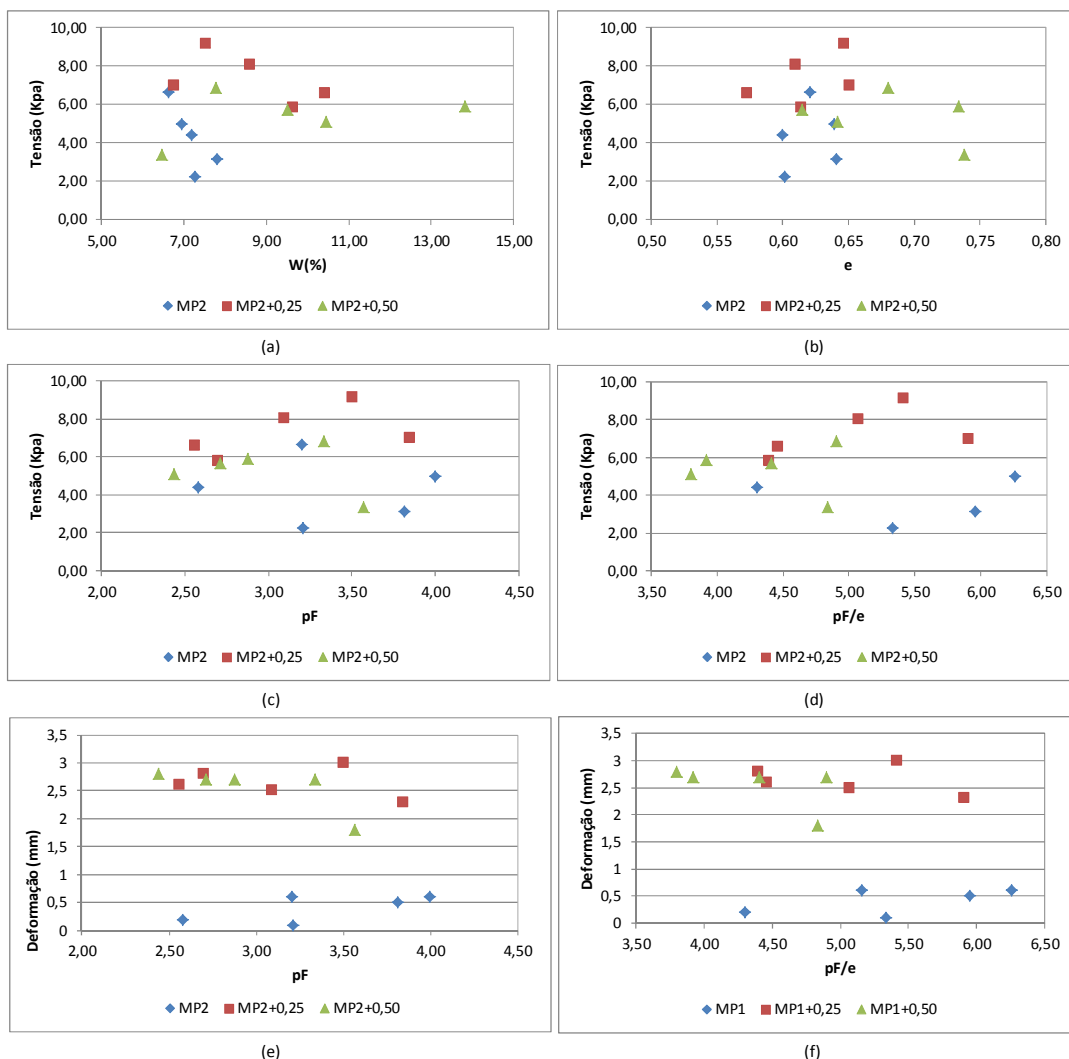


Figura 4.31 – Efeito das variáveis da mistura MP2 na resistência a tração da matriz de solo reforçada – (a) Tensão x umidade; (b) Tensão x e; (c) Tensão x pF; (d) Tensão x pF/e; (e) Deformação x pF; (f) Deformação x pF/e.

Para a mistura MP3 que apresenta composição textural (50% de argila + 50% de areia) intermediária entre a mistura MP1 (100% de argila) e a mistura MP2 (25% de argila + 75% de areia) verifica-se (Figura 4.32 (a) e (b)) uma clara tendência à redução da resistência à tração

das misturas com o aumento do teor de umidade e do índice de vazios. Observa-se ainda nesta mesma figura que não só a adição de fibra como o aumento de sua quantidade tende a tornar este efeito de redução da resistência à tração mais brando. Finalmente estas figuras mostram ainda que os resultados obtidos para a mistura MP3 sem a adição de fibras situa-se ligeiramente à esquerda daqueles obtidos com a adição de fibras apontando para o fato de que se considerados os mesmos valores de umidade e de índice de vazios, os valores obtidos com a incorporação de fibras seriam maiores que aqueles obtidos para a mistura sem as mesmas. Raciocínio análogo pode ser adotado quando da análise do comportamento em função da sucção (Figura 4.32 (c) e 4.32 (d)). Quando às deformações na ruptura repete-se para a mistura MP3 a mesma influência das fibras registrada para as misturas MP1 e MP2.

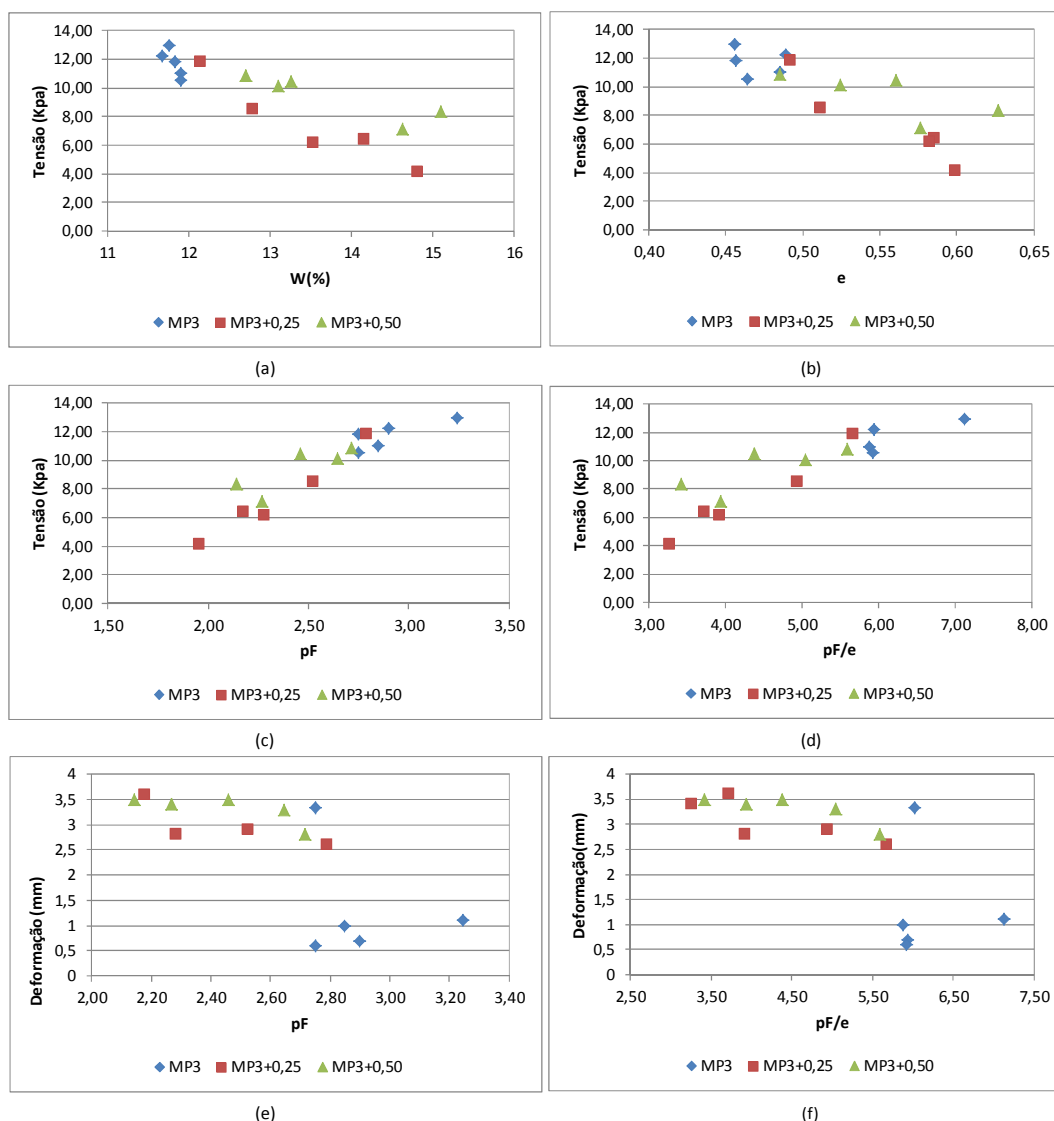


Figura 4.32 – Efeito das variáveis da mistura MP3 na resistência a tração da matriz de solo reforçada – (a) Tensão x umidade; (b) Tensão x e; (c) Tensão x pF; (d) Tensão x pF/e; (e) Deformação x pF; (f) Deformação x pF/e.

As Figuras 4.33 (a) e (b) apontam para o fato de que o nível de recuperação da resistência devido a presença das fibras está associado à sucção e ao índice de vazios do solo, ou seja, é possível considerar para as fibras naturais quando incorporadas ao solo efeitos da sucção e do índice de vazios semelhantes aos que se considera para o solo puro quanto a melhoria do comportamento. A Figura 4.33 (b) mostra que a recuperação da resistência (resistência correspondente ao segundo pico menos a residual pós primeiro pico) tende a aumentar com o aumento da sucção e com a diminuição do índice de vazios.

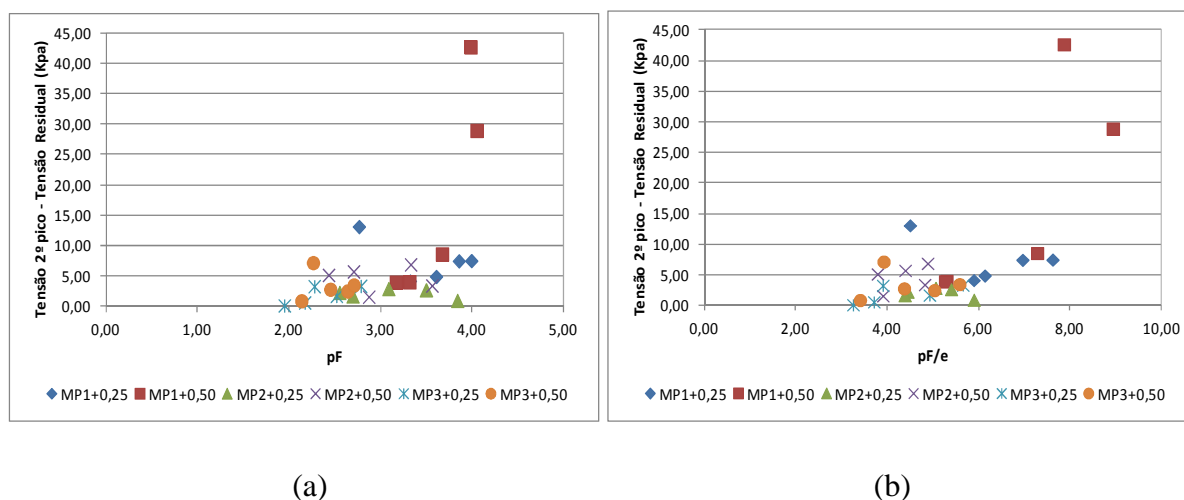


Figura 4.33 – Recuperação da resistência a tração das misturas com adição de fibras em função de : (a) pF; (b) pF/e.

A Figura 4.34 mostrando o conjunto de resultados de resistência à tração em função de pF/e, não só aponta para a influência da textura na interação solo-fibra como indica que ela tende a aumentar com o aumento da sucção e com a redução do índice de vazios.

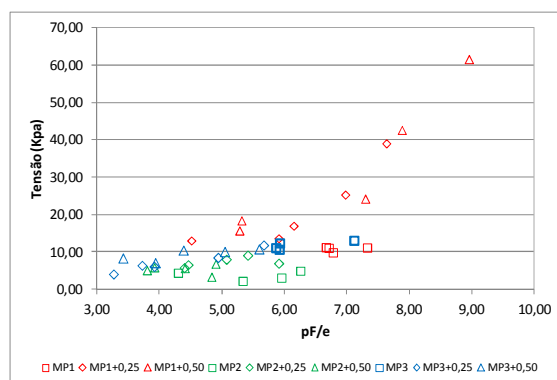


Figura 4.34 – Resistência a tração das misturas com e sem adição de fibras em função de pF/e.

## 4.6 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES

As Figuras 4.35 a 4.37 apresentam os resultados dos ensaios de resistência a compressão simples dos corpos de prova moldados em cada condição apresentada para as três misturas estudadas.

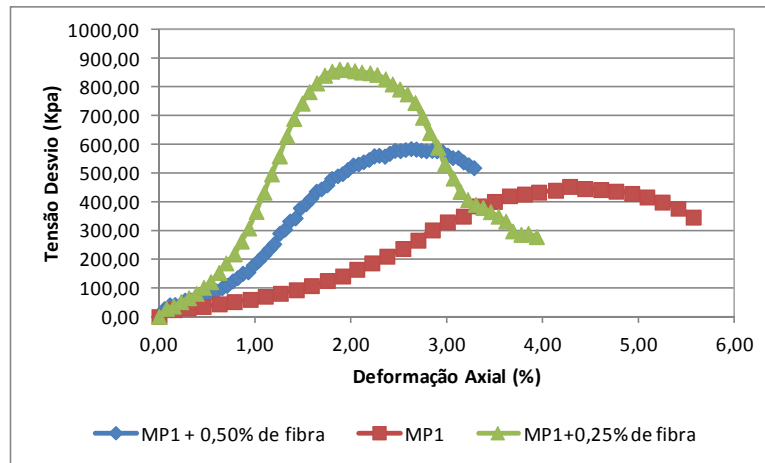


Figura 4.35 – Resistência a compressão simples da mistura MP1 com e sem adição de fibras.

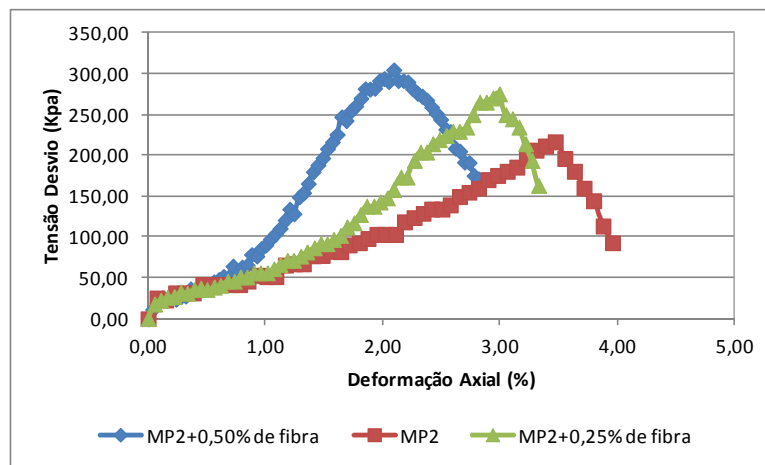


Figura 4.36 – Resistência a compressão simples da mistura MP2 com e sem adição de fibras.

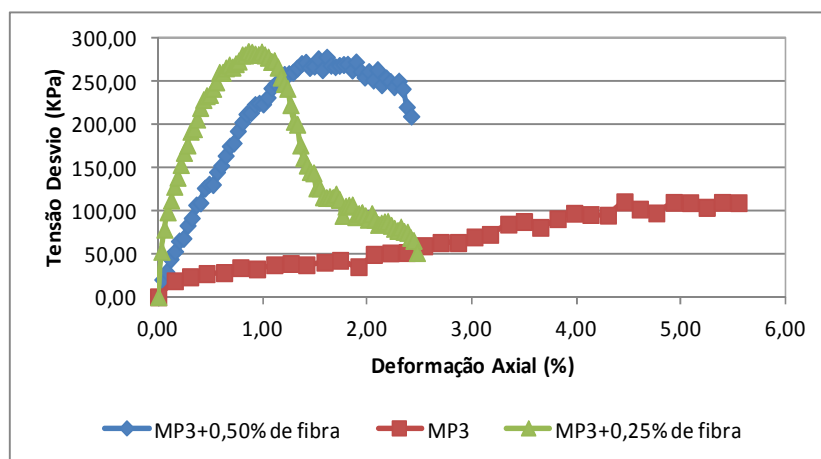


Figura 4.37 – Resistência a compressão simples da mistura MP3 com e sem adição de fibras.

Em todas as misturas é possível verificar que as resistências a compressão simples obtidas para as misturas com adição de fibras é superior aos valores obtidos sem a adição das mesmas. Mas é importante observar também que a influência do teor de fibras, 0,25% ou 0,50%, não é clara e merece análise mais acurada antes de se concluir sobre a influência das fibras. Para a mistura MP1 os resultados foram maiores quando se adicionou 0,25% de fibra, para a amostra MP2 quando se adicionou 0,50% e para a amostra MP3 eles foram semelhantes.

Para a análise mais detalhada do comportamento das misturas submetidas a ensaios de compressão simples, plotou-se nas Figuras 4.38 (a) e (b), respectivamente os gráficos da resistência a compressão simples em função das umidades e dos índices de vazios dos corpos de prova ensaiados. A influência da umidade não é clara e quanto ao índice de vazios observa-se como esperado, que a resistência diminui com o seu aumento. Para melhor entendimento do comportamento plotou-se ainda a resistência a compressão simples em função da sucção e de  $pF/e$  conforme mostrado nas Figuras 4.38 (a) e (b). Verifica-se neste caso, que se considerado o efeito da sucção eliminando-se o efeito da porosidade (Fig. 4.38 (b)), as fibras naturais não interferem na resistência a compressão simples das misturas.

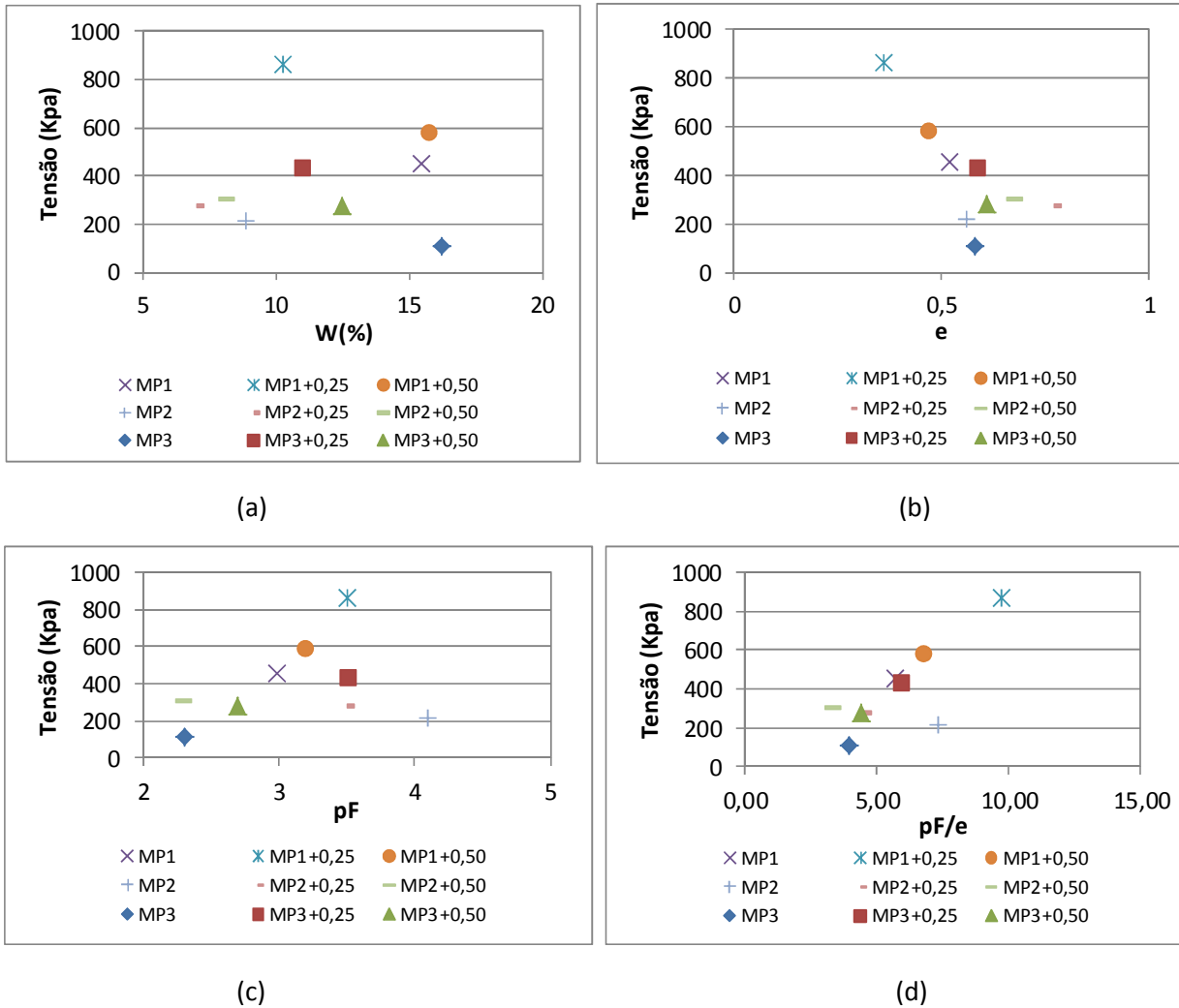


Figura 4.38 – Efeito das variáveis da mistura MP1 na resistência a compressão simples da matriz de solo reforçada – (a) Tensão x umidade; (b) Tensão x e; (c) Tensão x pF; (d) Tensão x pF/e.

#### 4.6 MÓDULO RESILIENTE

Os ensaios triaxiais dinâmicos são utilizados para reproduzir em laboratório, as condições provocadas pelas cargas de tráfego nas camadas dos pavimentos. Este processo se dá pela aplicação contínua de cargas repetidas, variáveis cíclicas, partindo de um valor nulo até um valor máximo, e por descarregamentos, até se anular novamente, para ser reaplicada em um breve intervalo de tempo. O ensaio de resiliência abrange duas fases, a fase da sequência de carregamentos dinâmicos aplicados que proporcionam ao corpo de prova uma condição de pré-carregamento, que reduz os efeitos decorrentes do histórico das tensões sobre o valor dos módulos de resiliência. A segunda fase compreende os cálculos dos módulos resilientes, onde as deformações resilientes são medidas a partir dos valores das tensões de



desvio aplicadas. Esta estimativa é feita a partir da determinação dos valores dos chamados parâmetros  $k_i$ , dos modelos de resiliência adotados. Para esta pesquisa adotou-se o modelo conhecido como modelo universal.

### Módulo Resiliente da Mistura – MP1

Os ensaios triaxiais cíclicos forneceram os dados de módulo resiliente, tensão confinante e tensão máxima aplicada como mostram as Tabelas 4.3 a 4.5. A partir desses dados foram obtidas as tensões de desvio das amostras MP1 com e sem adição de fibras. Estes resultados foram aplicados na equação 01 conhecida como modelo universal.

$$MR = k_1 p_a \left( \frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (4.1)$$

Onde,

MR = Módulo Resiliente;

$K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  = coeficientes de regressão;

$p_a$  = pressão atmosférica;

$\sigma_1$  = tensão principal maior;

$\sigma_2$  = tensão principal intermediária;

$\sigma_3$  = Tensão principal menor;

$\theta$  = tensão volumétrica;

$\tau_{oct}$  = tensão octaédrica.

Tabela 4.3 – Valores obtidos no ensaio triaxial cíclico da mistura MP1

Sequencia	Módulo Resiliente (MPa)	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
0	109,23	41,32	69,15	27,83
1	177,89	41,12	54,60	13,48
2	96,10	40,93	69,64	28,71
3	111,75	40,93	82,83	41,90
4	97,50	41,03	96,69	55,67
5	116,08	41,12	111,15	70,03
6	84,48	27,45	41,22	13,77
7	55,86	27,35	54,60	27,25
8	73,68	27,25	68,56	41,31
9	96,72	27,45	82,24	54,79
10	107,31	27,45	95,13	67,68
11	59,86	13,48	26,37	12,89
12	53,01	13,58	39,07	25,49
13	67,44	13,68	53,52	39,85
14	91,10	13,48	66,80	53,32
15	106,53	13,77	80,87	67,10

Tabela 4.4 – Valores obtidos no ensaio triaxial cíclico da mistura MP1+0,25

Sequencia	Módulo Resiliente (MPa)	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
0	97,10	41,22	70,09	28,87
1	72,85	41,42	55,85	14,43
2	93,41	40,93	68,91	27,98
3	111,78	41,12	83,54	42,41
4	119,36	41,12	96,20	55,08
5	131,74	40,83	110,34	69,51
6	71,36	27,35	41,19	13,84
7	93,45	27,35	53,86	26,51
8	107,14	27,35	67,70	40,35
9	119,30	27,45	82,82	55,38
10	137,67	27,35	95,39	68,04
11	74,67	13,58	27,13	13,55
12	90,98	13,48	39,40	25,92
13	109,54	13,68	53,44	39,76
14	124,24	13,58	66,60	53,02
15	145,48	13,68	81,13	67,45

Tabela 4.5– Valores obtidos no ensaio triaxial cíclico da mistura MP1+0,50

Sequencia	Módulo Resiliente (MPa)	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
0	120,56	41,32	70,38	29,06
1	142,23	41,12	56,25	15,12
2	120,85	40,93	69,99	29,06
3	128,35	41,12	83,52	42,40
4	140,08	41,22	96,67	55,45
5	148,39	41,03	110,41	69,38
6	152,03	27,35	40,99	13,64
7	142,81	27,35	54,63	27,28
8	148,30	27,64	68,56	40,92
9	152,75	27,35	82,50	55,15
10	159,94	27,35	96,14	68,79
11	151,94	13,68	27,02	13,34
12	136,79	13,58	39,67	26,09
13	164,97	13,48	53,51	40,03
14	165,26	13,48	68,33	54,85
15	173,47	13,48	80,19	66,71

O aumento da tensão desvio aumentou o módulo resiliente de todas as misturas MP1 com e sem adição de fibras. Os maiores módulos foram obtidos para a mistura com adição de 0,50% de fibra, o que não significa necessariamente que a adição de fibras melhorou o

comportamento da mistura MP1, faz-se necessário avaliar a influência de fatores como a sucção e o índice de vazios inicial.

O aumento do módulo com o aumento das tensões desvio, pode ocorrer por dois motivos, quando para um mesmo estado de tensão confinante, a tensão axial ( $\sigma_1$ ) aumenta, neste caso, espera-se que quanto melhor as características do material, melhor a sua capacidade de se deformar e recuperar estas deformações, o que faz com que os módulos sejam maiores. O outro motivo é quando para um mesmo estado de tensões, a tensão confinante diminui, propiciando maiores deformações para os materiais de piores características, logo é de se esperar que os módulos destes materiais sejam menores com o aumento da tensão axial.

As Figuras 4.39 e 4.40 confirmam que os maiores módulos foram obtidos com a adição de 0,50% de fibra, com o aumento da tensão desvio e da tensão confinante.

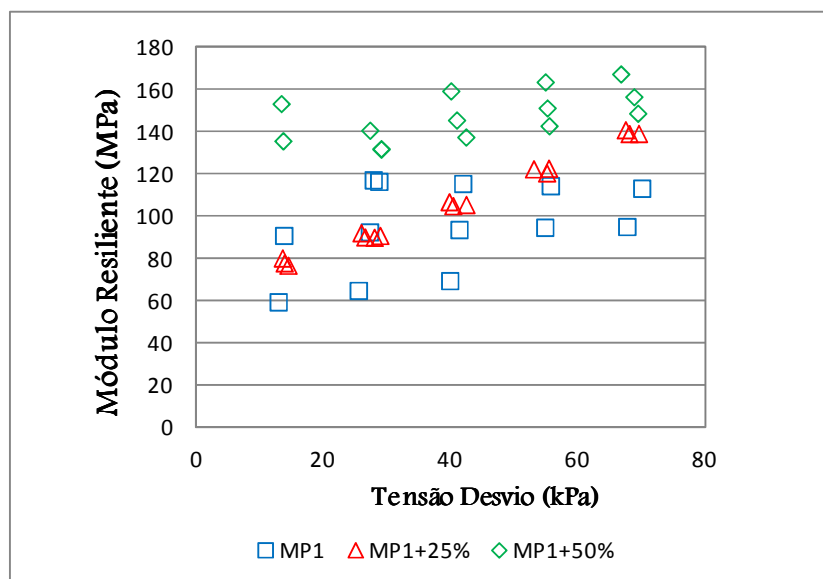


Figura 4.39– Variação do módulo resiliente com a tensão desvio da mistura MP1 com e sem adição de fibras.

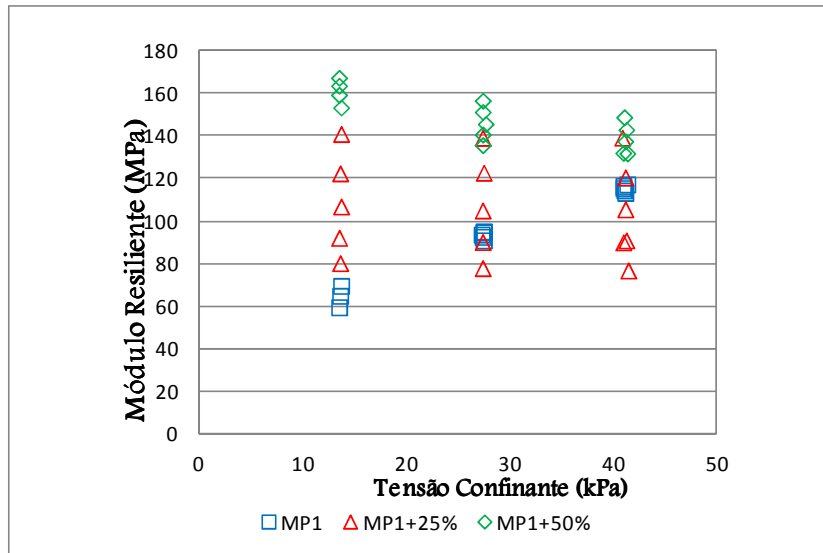


Figura 4.40 – Variação do módulo resiliente com a tensão confinante da mistura MP1 com e sem adição de fibras.

A análise realizada em função dos resultados obtidos em laboratório e por meio do modelo universal permite avaliar se o ensaio apresentou resultados satisfatórios. No caso da mistura MP1 (Fig. 4.41) pode-se observar que os valores obtidos em laboratório apresentaram uma correlação desejável quando relacionados com os módulos resilientes calculados pelo modelo universal. Geralmente admite-se um valor mínimo igual a 0,7.

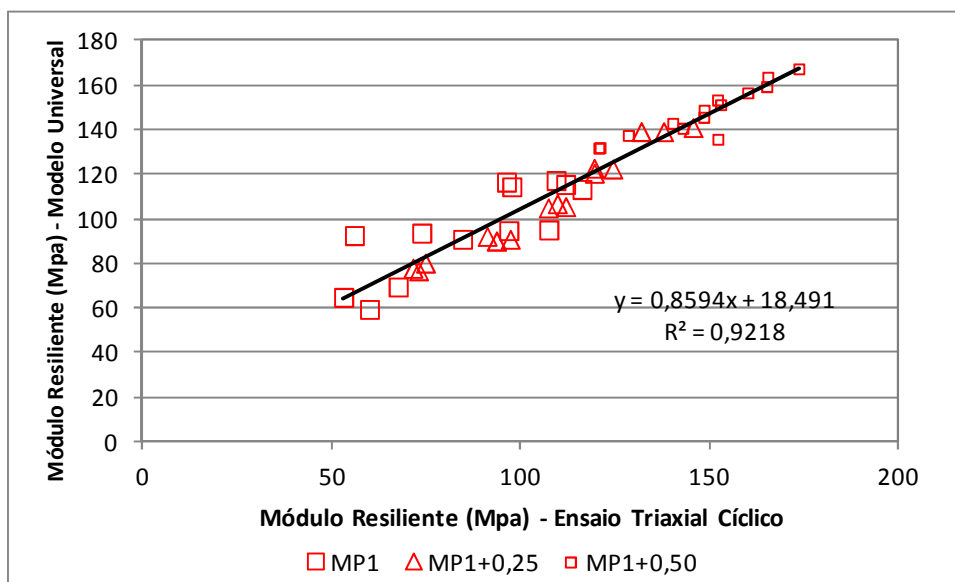


Figura 4.41 – Variação do módulo resiliente obtido no ensaio triaxial cíclico VS modelo universal da mistura MP1 com e sem adição de fibras.

## Módulo Resiliente da Mistura – MP2

A Tabela 4.6 apresenta os dados obtidos em laboratório para a mistura MP2.

Tabela 4.6 – Valores obtidos no ensaio triaxial cíclico da mistura MP2

Sequencia	Módulo Resiliente (MPa)	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
0	82,76	40,83	68,77	27,94
1	153,59	40,93	55,19	14,26
2	78,86	40,93	69,16	28,23
3	71,45	41,22	84,30	43,08
4	68,02	41,12	97,01	55,89
5	76,07	41,51	111,66	70,15
6	113,64	27,55	40,93	13,39
7	91,08	27,16	55,10	27,94
8	75,39	27,45	69,07	41,62
9	76,58	27,55	82,56	55,01
10	85,89	27,35	96,62	69,27
11	127,97	13,38	26,48	13,10
12	102,53	13,77	40,55	26,78
13	83,83	13,38	53,55	40,17
14	85,26	13,28	67,42	54,14
15	88,43	13,58	80,52	66,95

O ensaio de módulo resiliente ficou restrito apenas à mistura sem adição de fibras (MP2), as demais amostras com adição de fibras romperam antes que fossem moldadas na célula triaxial como mostra a Figura 4.42.



Figura 4.42 – Ruptura das amostras MP2 com adição de fibras.

Sendo assim não foi possível avaliar a influência das fibras nas misturas com 75% de areia e 25% de argila. No entanto, os valores de módulo resiliente obtidos em laboratório para

a mistura MP2 (Figs. 4.43, 4.44 e 4.45) apresentaram uma correlação desejável quando relacionados aos módulos resilientes calculados pelo modelo universal.

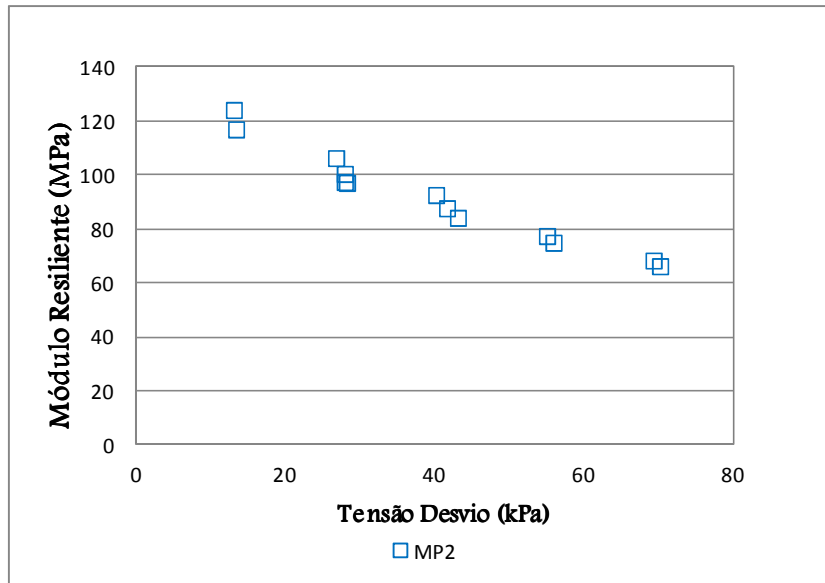


Figura 4.43 – Variação do módulo resiliente com a tensão desvio da mistura MP2.

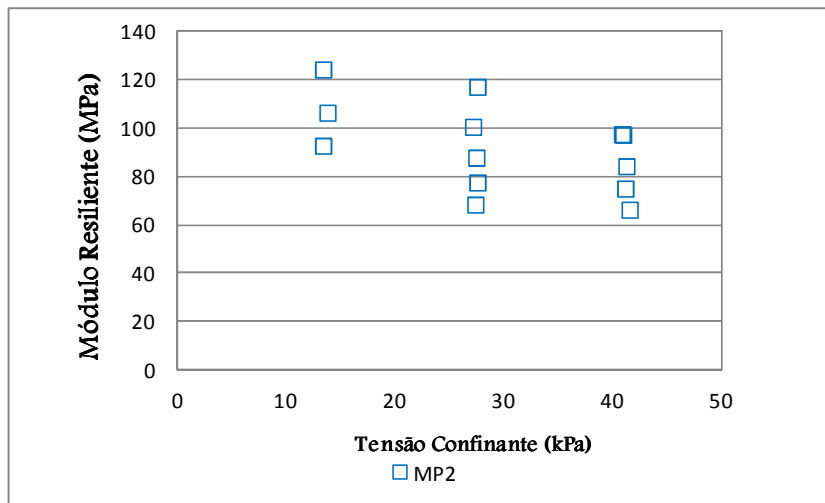


Figura 4.44 – Variação do módulo resiliente com a tensão confinante da mistura MP2.

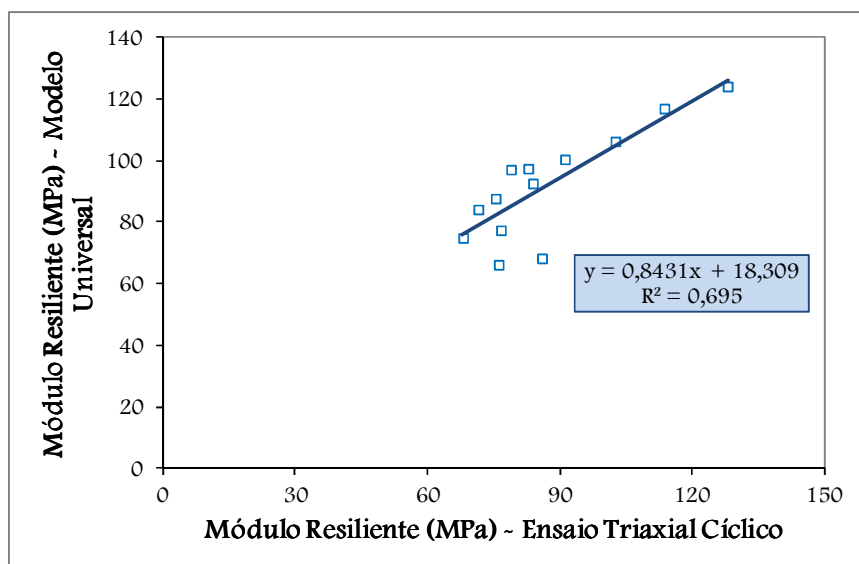


Figura 4.45 – Variação do módulo resiliente obtido no ensaio triaxial cíclico VS modelo universal da mistura MP2.

### Módulo Resiliente da Mistura – MP1

A mistura MP3 com adição de 0,50% de fibras rompeu-se durante fase de preparação para o ensaio. Dessa forma, apenas o teor de 0,25% de fibra foi avaliado. Os dados obtidos em laboratório para as amostras MP3 e MP3+0,25 estão indicados respectivamente nas Tabelas 4.7 e 4.8.

Tabela 4.7 – Valores obtidos no ensaio triaxial cíclico da mistura MP3

Sequencia	Módulo Resiliente (MPa)	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
0	53,29	41,03	69,77	28,74
1	52,79	40,93	56,02	15,10
2	50,57	41,03	69,19	28,16
3	60,78	41,12	83,80	42,67
4	66,12	41,22	97,54	56,32
5	74,20	41,32	111,28	69,96
6	41,55	27,25	41,48	14,22
7	47,93	27,35	55,22	27,87
8	55,21	27,55	69,06	41,51
9	64,00	27,16	82,02	54,87
10	74,37	27,16	95,67	68,51
11	45,00	13,58	26,06	12,48
12	50,43	13,58	40,00	26,42
13	56,79	13,58	53,64	40,06
14	67,10	13,58	67,28	53,71
15	77,80	13,77	81,99	68,22

Tabela 4.8 – Valores obtidos no ensaio triaxial cíclico da mistura MP3+0,25

Sequencia	Módulo Resiliente (MPa)	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
0	70,13	41,12	69,14	110,27
1	129,23	40,93	55,97	96,90
2	61,59	40,93	68,65	109,58
3	62,35	40,63	82,22	122,86
4	60,76	41,03	97,06	138,09
5	58,97	40,93	110,24	151,17
6	76,99	27,45	41,31	68,76
7	52,31	27,35	55,07	82,43
8	50,07	27,16	68,45	95,60
9	55,10	27,35	82,21	109,56
10	59,43	27,16	95,29	122,44
11	73,85	13,38	26,36	39,74
12	59,53	13,48	39,43	52,91
13	59,32	13,38	53,79	67,17
14	62,56	13,58	67,26	80,83
15	68,22	13,58	81,41	94,99

É possível observar na Figura 4.46 que com o aumento da tensão desvio o módulo resiliente aumenta para a mistura sem adição de fibra (MP3). Já na mistura com adição de 0,25% de fibra o módulo resiliente cai com o aumento da tensão desvio (Fig. 4.47).

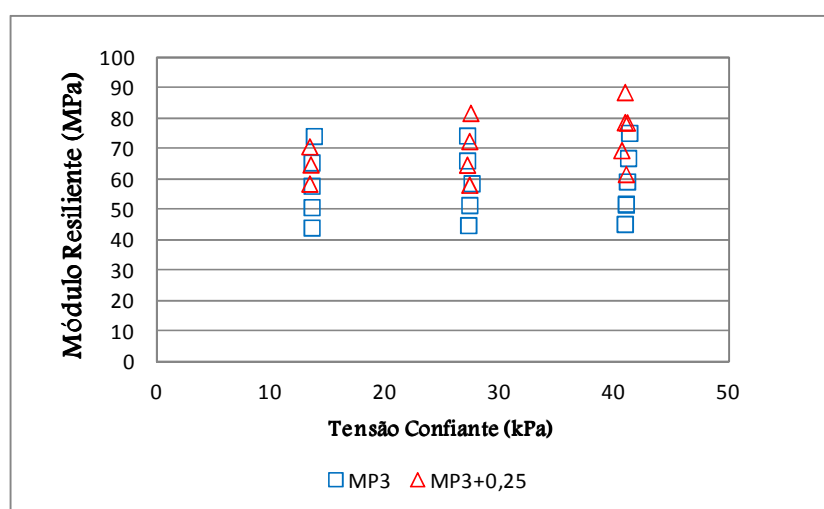


Figura 4.46 – Variação do módulo resiliente com a tensão Confinante da mistura MP3 com e sem adição de fibras.



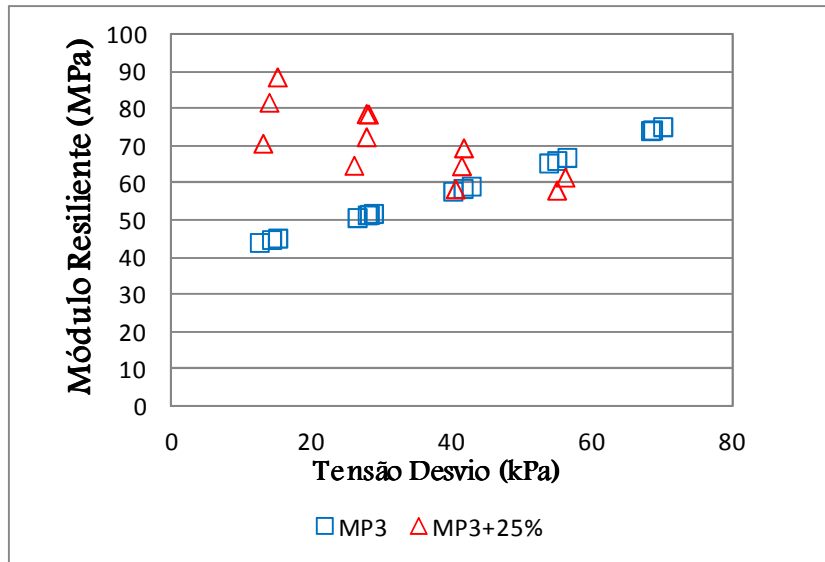


Figura 4.47 – Variação do módulo resiliente com a tensão desvio da mistura MP3 com e sem adição de fibras.

Os valores de módulo resiliente obtidos em laboratório para a mistura MP3 (Figura 4.48) não apresentaram uma correlação desejável quando relacionados com os módulos resilientes calculados usando o modelo universal.

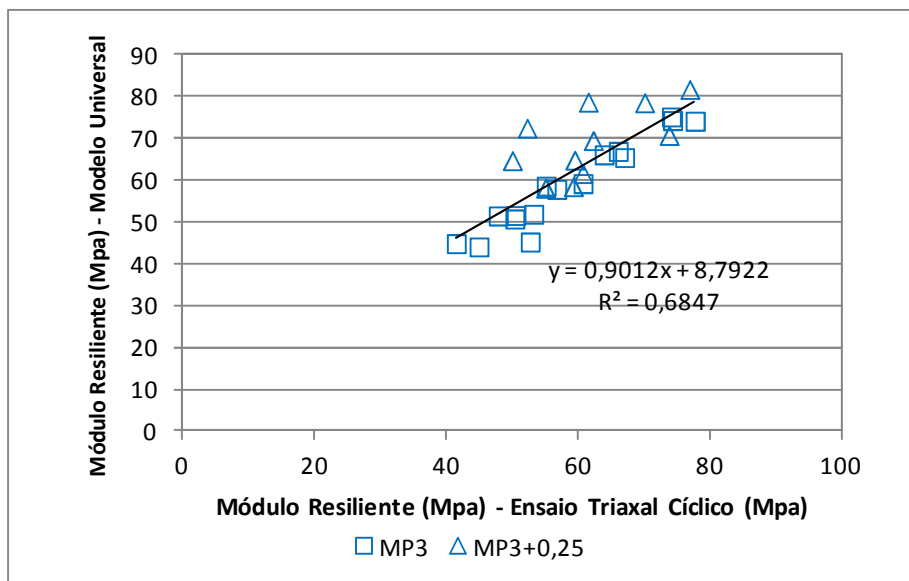


Figura 4.48 – Variação do módulo resiliente obtido no ensaio triaxial cíclico VS modelo universal da mistura MP3 com e sem adição de fibras.

Apesar do limitado número de ensaios, optou-se por complementar as análises correlacionando-se os valores de módulo resiliente constantes das tabelas apresentadas com os valores iniciais de sucção normalizados em relação aos respectivos índices de vazios (pF/e). Para o traçado do gráfico (Fig. 4.49) considerou-se apenas os resultados obtidos para a 5ª, 10ª e 15ª sequência. Na Figura 4.49 apenas os resultados obtidos para a amostra MP2

destoou do comportamento geral obtido para as demais misturas com e sem adição de fibras. Este comportamento aponta para a pouco provável influência das fibras nos valores de módulo resiliente.

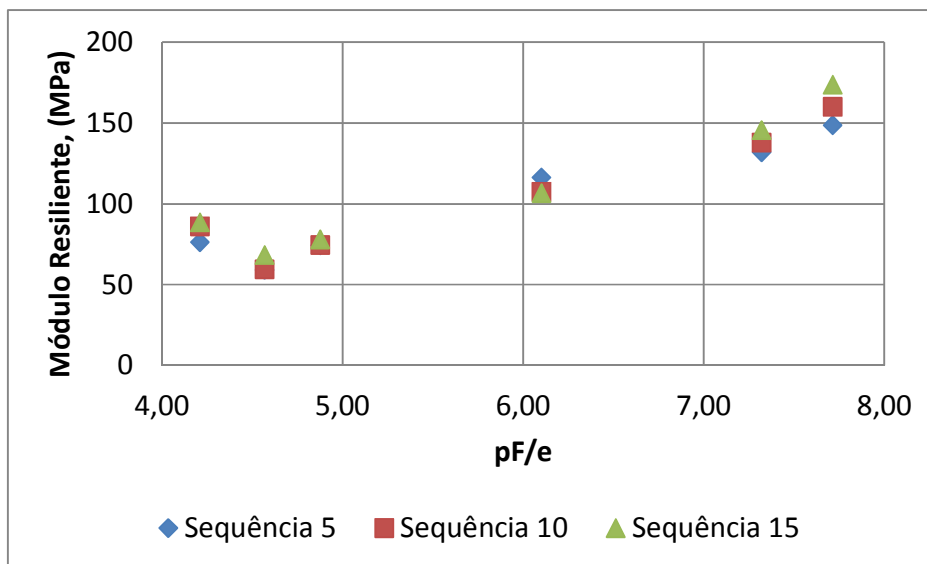


Figura 4.49 – Correlação entre o módulo resiliente e pF/e.

O cabelo humano utilizado como fibra apresentou uma resistência à tração que chega a ser superior a de alguns aços. Os valores obtidos para os fios de cabelo variaram entre 129,75 e 316,80 MPa o que torna viável sua utilização como reforço de solos sendo, no entanto, necessário estudar o seu processo de decomposição uma vez que falta na literatura informações quanto a este aspecto. A resistência a tração do cabelo apresentou valores mais elevados nas fibras com menor diâmetro o que aponta para a influência do grau de hidratação no comportamento mecânico conforme hipótese apresentada nesta dissertação.

As misturas MP1 e MP3 submetidas à compactação apresentaram maiores valores de peso específico aparente seco. Nas amostras com inclusão de 0,50% de fibras houve certa dificuldade de homogeneização durante a confecção dos corpos de prova. As fibras se aglomeravam dentro dos corpos de prova ocasionando seu rompimento durante o processo de desmoldagem. A incorporação de areia nas misturas provocou a redução do e.pF, conduzindo a uma redução na pressão de entrada de ar das misturas.

Quanto maior o teor de fibra incluso nas misturas MP1, maiores foram os valores de sucção obtidos diferenciando das misturas MP2 que apresentaram comportamento inverso. Já para as misturas MP3 o valor de sucção obtido foi semelhante para as amostras com e sem adição de fibras. Deste modo, é notória a interferência das fibras no mecanismo de interação interpartículas, sendo que esta interferência varia com a distribuição granulométrica do solo.

De acordo com os resultados obtidos através do ensaio miniCBR a adição de 0,50% de fibras às três misturas aumentou a capacidade de suporte, no entanto para as misturas MP1 e MP2 a adição de 0,25 % de fibras reduziu esta capacidade. Neste contexto, a partir do conjunto de resultados analisados não foi possível concluir sobre eventual melhoria do mini-CBR em consequência da incorporação de fibras naturais.

A adição de fibras ao solo, independente de sua proporção ofereceu às misturas um ganho de resistência à tração quando comparados às misturas sem adição de fibras, retardando o processo de trincamento das amostras. À medida que eram aplicadas as tensões, estas tracionavam as fibras que iam se rompendo gradativamente dentro da massa de solo, limitando o efeito de trincamento. A ruptura do solo dava lugar a um novo posicionamento e engaste dos fios de cabelo sem que a maioria destes se rompesse. Do ponto de vista prático,

essa é uma característica muito relevante, pois garante à resistência a tração última para maiores deformações. Desse modo a utilização do cabelo como fibra em camadas de base, sub-base, e reforço de subleito, pode retardar o processo de trincamento que ocorre nos solos de capacidade inferior à necessária para garantir a durabilidade do pavimento, evitando que as trincas se propaguem mais rapidamente até a o revestimento. Além disso, elas podem contribuir para combater esforços oriundos dos mecanismos de expansão e contração do solo (Aguiar et al., 2010).

A resistência à compressão simples do solo quando considerados os efeitos da sucção e do índice de vazios não variou com a adição de fibras. De modo análogo, a avaliação dos módulos resilientes determinados levando-se em conta estes parâmetros aponta para a não influência da fibra natural usada no comportamento das misturas.

Em síntese, o desenvolvimento desta pesquisa permitiu avaliar que a adição da fibra natural (0,25% e 0,50%) utilizada como elemento de reforço para os solos tropicais corrigidos texturalmente, aumentou significativamente a resistência a tração dos solos e ampliou as deformações limites na ruptura à tração apontando para a possibilidade de melhoria do desempenho destes solos quando utilizados em estruturas de pavimento. Quanto aos resultados de miniCBR, resistência a compressão simples e módulo resiliente não foi caracterizada influências das fibras no comportamento das misturas.

As análises e resultados obtidos nesta pesquisa estão limitados ao estudo experimental.

## **RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Destacam-se como sugestões para pesquisas futuras:

- Avaliar a durabilidade do cabelo humano, bem como seu processo de decomposição, para efetivar sua utilização em camadas de pavimentos;
- Utilizar outros tipos de solo com outras configurações texturais que possa garantir o efeito da correção como fator relevante na ancoragem das fibras;
- Avaliar o comportamento das fibras de cabelo humano quando submetidas a aditivos químicos;
- Utilizar outras fibras naturais como plumas de aves e pelos de animais;
- Análise estatística dos resultados obtidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T 307-99: Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials.

AGOPYAN, V. ; SAVASTANO JR, H. . Compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais e suas aplicações. In: Wesley Jorge Freire; Antonio Ludovico Beraldo. (Org.). Tecnologias e materiais alternativos de construção. 1 Ed. Campinas: Unicamp, 2003, v. 1, p. 121-144.

AGUIAR,L.A.; AQUINO, F.R.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2009). Melhoria da Resistência a tração de solos finos por meio da incorporação de fios de cabelo para uso em pavimentação. Anais Geocentro 2009. p.112-116.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9656. Determinação de Umidade por Secagem em Estufa. São Paulo, 1986.

BANDEIRA, Alex Alves; MERIGHI, João Virgilio; FORTES, Rita Moura (2008). Estudo da Utilização de Bases Cimentadas em Pistas de Aeroportos (A Study Of Portland Soil Cement Base Course Used In Airfield). CONINFRA – CONGRESSO DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. ANDIT - Associação Nacional de Infra-estrutura de Transportes. ISSN 1983-3903. São Paulo, São Paulo, Brasil, 25 a 28 de Junho de 2008.

BENTO, P.F. (2006). Uso de Cal e Fibras na Melhoria de Materiais para Utilização em Estruturas de Pavimentos. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. UNB - Universidade de Brasília. 116p.

BREUER, M. M.(1981). “Cleaning of Hair”, Journal of the Society of Cosmetic Chemists, v. 32, p. 437- 458.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2006). Análise de Problemas Relativos à Construção Rodoviária na Região Amazônica. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia, Curitiba, PR. v. 3, p.113-118.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.;GITIRANA Jr, G.F.N. (2006). Análise Preliminar do Desenvolvimento de Trincas em Pavimentos Construídos na Região Amazônica. In: RAP; ENACOR, 11, Goiânia, GO, v. 37.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.;LEROUEIL, S. (2004). Curva de Característica de Sucção Transformada. Solos e Rochas - Revista Brasileira de Geotecnia. São Paulo - SP, v. 27, n. 3, p. 231-242.

CASAGRANDE, M. D. T. ; COOP, M. R. ; CONSOLI, N. C.(2006) . Behavior of a Fiber-Reinforced Bentonite at Large Shear Displacements. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. Reston - Virgínia - USA, v. 132, p. 1505.

CASAGRANDE, M.D.T. (2001). Estudo do Comportamento de um Solo Reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais. Dissertação de Mestrado . Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS. 94p.

CHAPELET, R. (2010). Renforcement de Cgausee Par Geosynthetic Alveolaire Dans Les Regions Tropicale et Amazonienne. Mémoire option Génie Civil. Université Blaise Pascal. França. 91p.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 138/1994. Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral.

\_\_\_\_\_ DNER-ME 228: Solos - Compactação em Equipamento Miniatura, 1994. 14 p.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. DNIT: Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro, 2006. 278p.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. DNIT 137/2010- ES. Pavimentação – Regularização de subleito. 7p.

\_\_\_\_\_ DNIT 138/2010 – ES. Pavimentação – Reforço do subleito. 7p.

\_\_\_\_\_ DNIT 139/2010-ES. Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente. 8p.

\_\_\_\_\_ DNIT 141/2010-ES. Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente. 9p.

DIAS, I.M. (2007) Estudo de Solos Tropicais para Uso em Pavimentação a partir de Ensaio Triaxiais Estáticos. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos/USP. São Paulo.138 p.

FERRANTE, M. (1996). Seleção de Materiais. EDUFSCar: Editora da Universidade Federal de São Carlos. 326 p.

FREDLUND, D.G. e XING, A. (1994) Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, v.31, n.3, p.521-532.

GERSCOVICH D.M.S.. (2001). Equações para Modelagem da Curva Característica Aplicadas a Solos Brasileiros. In: IV Simpósio Brasileiro De Solos Não Saturados Porto Alegre RS. v. 1 p. 76-92.

GONÇALVES, F. J. P. (1999). O Desempenho dos Pavimentos Flexíveis. Seminário II de doutorado, PPGEC/UFRGS. Porto Alegre - RS.

GUIMARÃES, Renato Cabral (2002). Análise das Propriedades e Comportamento de Um Perfil de Solo Laterítico Aplicada ao Estudo do Desempenho de Estacas Escavadas. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Universidade de Brasília. Brasília- DF.

HANNANT, L.(1994). Fibre-reinforced Cements and Concretes. In: J.M.Illston. Construction Materials; their nature and behavior. 2ed. London: J.M. Illston/E e FN e Spon. p. 359-403.

HIGGINS, Raymond A. Propriedades e Estruturas dos Materiais em Engenharia. São Paulo: DOFEL, 1982.

HOARE, D.J.(1979). Laboratory Study of Granular Soils Reinforced with Randomly Oriented Discrete Fibres. IN: Internacional Conference on Soil Reinforcement. Paris.v.1, p. 47-52.

HOLLAWAY, L. (1994). Polymers and Polymers Composities. In: J.M. Illston. Construction Materials; their nature and behavior. 2ed. London: J. M. Illston/E e FN Spon. p. 321-358.

- ILLSTON, J. M.(1994). *Construction Materials; their Nature and Behavior*. 2ed. London: E e FN Spon, 1994. 518p.
- JEWELL, R.A.;WROTH, C.P. (1987). *Direct Shear Tests On Reinforced Sand*. *Géotechnique*, London, v.37, n.1, p. 53-68.
- JIMÉNEZ, A.M.G. (2011). *Estudo Experimental de um Resíduo de Construção e Demolição (RCD) para Utilização em Pavimentação*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília (UNB). 123p.
- MACHADO (1998), C.C.; LIMA, D.C. DE; ALMEIDA, R.M. DE. *Estudo do comportamento da mistura solo-cimento reforçado com fibra sintética para uso em estradas florestais*. *CERNE*, v. 4, n.1, p.123-128.
- MAHER, M.H. e GRAY, D.H. (1990). *Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers*. *Journal of Geotechnical Engineering*. v.116, n. 11, p. 1661-1677.
- MAHER, M.H. e HO, Y.C. (1993). *Behavior of Fiber-Reinforced Cemented Sand Under Static and Cyclic Loads*. *Geotechnical Testing Journal*, v. 16, nº 3, p. 330-338.
- MARINHO, F. A. M.(1995a). *A Técnica do papel filtro para a medição de sucção*. Encontro sobre Solos Não Saturados. Porto Alegre. P. 112-125.
- MATTE, R. (2006) *Avaliação da Condição Superficial dos Pavimentos Flexíveis Existentes na Hidrelétrica de Itaipu Através do Método PCI*. Trabalho Final de Conclusão de Curso. UDC-União Dinâmica de Faculdades Catarata. Foz do Iguaçu – PR. 27 p.
- MEDINA, J.(1997). *Mecânica dos pavimentos*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997. 380p.
- MOTTA, L. M. G., Fernandes, C. (2003). *Utilização de resíduo sólido da construção civil em pavimentação urbana*. 12<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação. Aracaju.
- NAITO, S.; Arai, K.(1996). *Type and Location of SS Linkages in Human Hair and their Relation to Fiber Properties in Water*. *Journal of Applied Polymer Science*, 61, p. 2113-2118.
- NAKAHARA, S.M. (1995). *Determinação de propriedades de um solo não saturado através de ensaios pressiométricos e de laboratório*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 143 p.
- NOGAMI, J. S. *Determinação do Índice de Suporte Califórnia em equipamento de Dimensões Reduzidas (Mini-CBR)*. *International Road Federation Meeting*, In: II Reunião das Organizações Rodoviárias 2. Anais, Brasília/ DF, 1972. 35 p.
- NOGAMI, J.S. (1972). *Determinação do Índice de Suporte Califórnia com Equipamento de Dimensões Reduzidas- Ensaio Mini-CBR*. In: *Reunião das Administrações Rodoviárias, Brasília /DF .v. 2*.
- NOGAMI, J.S. e VILLIBOR, D.F.(1994).*Identificação expedita dos grupos da classificação MCT para solos tropicais*. In: *X Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia de fundações*, Foz do Iguaçu-PR. Anais. v. 4, p. 1293-1300.
- NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F.; (1995) *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos* 213 p., Ed. Villibor, São Paulo.

- NOGUEIRA, A.C.S. (2003). Efeito da Radiação Ultravioleta na cor, na perda protéica e nas propriedades mecânica do cabelo. Dissertação de Mestrado. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química.
- PALMEIRA, E.M. (1990). Melhoria de Solos. Publicação GA 001A/90, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 225p.
- PALMEIRA, E.M.(1992). Geossintéticos: Tipos e Evolução nos últimos anos. IN: Seminário sobre aplicações de Geossintéticos em geotecnia. Brasília. p. 1-20.
- RODRIGUES, M.R.(1997). Influência da sucção no módulo de resiliência de solos típicos de subleito de pavimentos do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS. 105p.
- SILVA, A.G.C. DA (2010). Biodeterioração da fibra de Sisal em Compósitos à Base de Cimento.Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Estadual de Feira de Santana.Feira de Santana-BA. 128p.
- SOUZA, M. J. Patologias em pavimentos flexíveis. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). Universidade Anhembi-Morumbi. São Paulo, SP. 63p.
- SPECHT, L.P.(2000). Comportamento de mistura solo-cimento-fibra submetidos a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação.Dissertação de Mestrado.Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre –RS. p.132.
- TAILOR, G.D. (1994). Materials in Construction. In: London: Longman Scientific e Thecnical, 2ª Ed. 284 p.
- THE HAIR (1984). Harry's Cosmetology, 23, 396-426.
- TRINDADE, T.P. et al.(2004) Latossolo vermelhoamarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória: estudo em laboratório. REM: Revista Escola de Minas, v. 57, n.1, p. 53-58.
- TRINDADE, T.P. et al.(2005) Latossolo vermelhoamarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória: estudo realizado com amostras de grandes dimensões. REM: Revista Escola de Minas, v. 58, n. 1, p.33-38.
- TUCCI, A.M.F. (1989). Propriedades físico-químicas de cabelo: desenvolvimento de métodos de avaliação de alterações estruturais induzidas por irradiação. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP. 202p.
- VALE, A.C.do.; SOARES,J.B. e CASAGRANDE, M.D.T. (2007). Aplicabilidade de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas tipo SMA. In: 4º PDPETRO.Campinas - SP.
- VARGAS, M.(1977). Introdução à Mecânica dos Solos. 1 ed, São Paulo: McGraw-Hill do Brasil.
- VICTORINO, D.R.; NÚÑEZ, W.P. (2004). Análise de Estrutura de Pavimento da Rodovia BR-290/RS através de Ensaios Acelerados. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Laboratório de Pavimentação. 4p.



VILLIBOR, D.F. (1982). Estabilização Granulométrica ou Mecânica. São Carlos - SP: Apostila de Aula. Disponível em:<http://www.portaldetecnologia.com.br/pavimentacao-obras/estabilizacao-granulometrica-ou-mecanica/>. Acessado em: Março de 2011.

VILLIBOR, D.F.; FORTES, R.M.; FORTES, F.Q. e JUNIOR, C.N. (2005). Deterioração Estrutural de Bases de Solo-Cimento e Granulares. 36ª Reunião anual de pavimentação. Curitiba-PR.