

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

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE SOLO  
TROPICAL COM A ADIÇÃO DE FIBRAS PET EM SISTEMAS  
DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS**

**JAQUELINE RIBEIRO DOS SANTOS**  
**TOMÁS JOVIANO LEITE DA SILVA**

**ORIENTADORA: CLÁUDIA MARCIA C. GURJÃO**  
**CO ORIENTADOR: CONCEIÇÃO DE MARIA C. COSTA**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA  
CIVIL**

**BRASÍLIA / DF: 02/2015**

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

**VIABILIDADE DO USO DE UM SOLO TROPICAL E FIBRAS  
PET EM SISTEMAS DE COBERTURA DE ATERROS  
SANITÁRIOS**

**JAQUELINE RIBEIRO DOS SANTOS  
TOMÁS JOVIANO LEITE DA SIVA**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

**CLÁUDIA M. C. GURJÃO, DSc. (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**CONCEIÇÃO DE MARIA C. COSTA, MSc (IFB)  
(CO ORIENTADOR)**

---

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

---

**MARUSKA TATIANA NASCIMENTO DA SILVA, DSc (Uniceub)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 12 de Fevereiro de 2015.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, JAQUELINE RIBEIRO; SILVA, TOMÁS JOVIANO LEITE

**Viabilidade do uso de um Solo Tropical e Fibras PET em Sistemas de Cobertura de Aterros Sanitários.** [Distrito Federal] 2015.

viii, - 76 p. (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2013)

Trabalho de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Aterros Sanitários

2. Resíduos Sólidos Urbanos

3. Fibras PET

4. Ressecamento e Fissuração

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, J.R.; SILVA, T.J.L. (2014). **Viabilidade do uso de um Solo Tropical e Fibras PET em Sistemas de Cobertura de Aterros Sanitários.** Trabalho de Projeto Final, Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 84 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: JAQUELINE RIBEIRO DOS SANTOS; TOMÁS JOVIANO LEITE DA SILVA

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: **Viabilidade do uso de um Solo Tropical e Fibras PET em Sistemas de Cobertura de Aterros Sanitários.** GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2015

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

---

Jaqueline Ribeiro do Santos  
SHVP chácara 150, rua 12, casa 22 -  
Taguatinga Norte  
CEP: 72110-800 Brasília/DF - Brasil

---

Tomás Joviano Leite da Silva  
SQN 216, bloco K, apt. 310 -  
Asa Norte  
CEP: 70875-110 Brasília/DF – Brasil

## RESUMO

Com o aumento dos resíduos sólidos urbanos devido ao crescimento da população e da industrialização, a disposição final desses resíduos deve ser gerenciada de uma forma ambientalmente adequada para prevenir doenças e manter a saúde e bem estar da população. O aterro sanitário é uma solução viável para a disposição desses resíduos, pois permite o confinamento seguro em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública, minimizando os impactos ambientais. No presente estudo, é analisada a viabilidade de reforço de um solo tropical adicionando fibras de Politereftalato de etileno - PET avaliando as propriedades mecânicas deste composto. O solo utilizado foi coletado na Região Administrativa de Samambaia, entre a DF-180, km 52 e o córrego Belchior, local próximo à Estação de Tratamento de Esgoto da CAESB. As fibras PET são provenientes de garrafas cortadas em filetes de diferentes comprimentos. Uma parte das amostras foi submetida a um processo de frisão para avaliar a influência do perfil longitudinal da fibra no comportamento do composto. Baseado em estudos anteriores, a quantidade de fibras adicionada nas misturas foi de 0,4%, em relação à massa de solo seco, e os comprimentos da fibra foram de 1 cm e 3 cm. Foram realizados ensaios de resistência à compactação simples, tração por compressão diametral e ensaio de ressecamento e umedecimento das misturas, para avaliar e comparar a formação e abertura de fissuras do solo puro e da mistura solo + fibras PET.

# SUMÁRIO

| Capítulo  | Página |
|---|--------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | 1      |
| 1.1 OBJETIVO .....  | 3      |
| 1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 3      |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....  | 4      |
| 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) .....  | 4      |
| 2.2 ATERROS SANITÁRIOS .....  | 7      |
| 2.2.1 CAMADA DE COBERTURA .....   | 10     |
| 2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS.....   | 12     |
| 2.3.1 ESTRUTURA DO SOLO E COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA .....                                   | 12     |
| 2.3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES .....  | 14     |
| 2.3.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....                                  | 15     |
| 2.3.4 RESSECAMENTO E FISSURAÇÃO DO SOLO .....   | 15     |
| 2.4 SOLOS REFORÇADOS .....  | 16     |
| 2.5 REFORÇO COM FIBRAS .....  | 17     |
| 2.5.1 MECANISMOS DE INTEREÇÃO SOLO-FIBRA .....  | 19     |
| 2.5.2 INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DAS FIBRAS .....  | 21     |
| 2.5.3 INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO E DA CONCENTRAÇÃO<br>DAS FIBRAS .....                      | 23     |
| <b>3 METODOLOGIA</b> .....  | 24     |
| 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO .....  | 24     |
| 3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS PET .....   | 24     |
| 3.3 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS<br>DO SOLO E DO COMPÓSITO SOLO + FIBRA PET ..... | 25     |
| 3.3.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPACTAÇÃO SIMPLES – RCS .....                             | 25     |
| 3.3.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....                                     | 26     |
| 3.3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO DIAMETRAL .....  | 28     |
| 3.3.4 SIMULAÇÃO DE UMEDECIMENTO E RESSECAMENTO DO SOLO.....                               | 29     |
| <b>4 RESULTADOS E ANÁLISES</b> .....  | 31     |
| 4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....   | 31     |
| 4.1.1 DESCRIÇÃO .....   | 31     |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.1.2 DADOS OBTIDOS .....                              | 32        |
| 4.1.3 ANÁLISE DOS DADOS .....                          | 34        |
| 4.2 RESISTÊNCIA Á TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL..... | 38        |
| 4.2.1 DESCRIÇÃO .....                                  | 38        |
| 4.2.2 DADOS OBTIDOS .....                              | 39        |
| 4.2.3 ANÁLISE DOS DADOS .....                          | 49        |
| 4.3 SIMULADOR ATMOSFÉRICO .....                        | 59        |
| 4.3.1 DESCRIÇÃO .....                                  | 59        |
| 4.3.2 DADOS OBTIDOS .....                              | 63        |
| 4.3.3 ANÁLISE DOS DADOS .....                          | 67        |
| <b>5 CONCLUSÃO .....</b>                               | <b>73</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                | <b>74</b> |
| <b>SITES CONSULTADOS .....</b>                         | <b>75</b> |

## LISTA DE TABELAS

| <b>Tabela</b>  | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| Tabela 2.1: Destino final dos resíduos sólidos, por unidade dos resíduos (%) | 7             |
| Tabela 4.1: Dados dos corpos de prova  | 32            |
| Tabela 4.2: Resultados do processo de compressão na prensa hidráulica        | 33            |
| Tabela 4.3: Geometria, massa e umidade dos corpos de prova                   | 39            |
| Tabela 4.4: Valores de Leitura   | 40            |
| Tabela 4.5: Tensão-Deformação para o solo puro                               | 42            |
| Tabela 4.6: Tensão-Deformação, 0,4% de fibra lisa de 1cm                     | 43            |
| Tabela 4.7: Tensão-Deformação, 0,4% de fibra perfilada de 1cm                | 44            |
| Tabela 4.8: Tensão-Deformação, 0,4% de fibra lisa de 3 cm                    | 45            |
| Tabela 4.9: Tensão-Deformação, 0,4% de fibra perfilada de 3 cm               | 47            |
| Tabela 4.10: Aumento da resistência de ruptura do solo (solo)                | 54            |
| Tabela 4.11: Pontos de interesse para as diferentes misturas                 | 57            |
| Tabela 4.12: Valores comparados entre as fibras                              | 58            |
| Tabela 4.13: Contagem de pixels, primeira fissura                            | 68            |
| Tabela 4.14: Contagem de pixels, fim do primeiro ciclo                       | 69            |
| Tabela 4.15: Contagem de pixels, fim do segundo ciclo                        | 70            |
| Tabela 4.16: Contagem de pixels, fim do terceiro ciclo                       | 71            |

## LISTA DE FIGURAS

| <b>Figura</b>  | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| Figura 1.1 – Exemplo de um Lixão a Céu Aberto                            | 1             |
| Figura 1.2 – Exemplo de um Aterro Controlado                             | 2             |
| Figura 1.3 – Exemplo de um Aterro Sanitário                              | 2             |
| Figura 2.1 - Municípios, segundo a destinação final dos resíduos sólidos | 6             |
| Figura 2.2 – Exemplo do Método Trincheira                                | 7             |
| Figura 2.3 – Exemplo do Método da Rampa                                  | 8             |
| Figura 2.4 – Exemplo do Método de Área                                   | 8             |

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.5 – Figura Esquemática de um Aterro Sanitário                            | 9  |
| Figura 2.6 – Estrutura Convencional da Camada de Cobertura de um Aterro Sanitário | 11 |
| Figura 2.7 – Figura Esquemática das Fases do Solo                                 | 13 |
| Figura 2.8 – Exemplos de Mono-filamentos de Propileno                             | 17 |
| Figura 2.9 – As Quatro Categorias de Fibras Representadas                         | 18 |
| Figura 2.10 – Comparativo entre Comprimentos de Fibra                             | 20 |
| Figura 2.11 – Desenvolvimento de Esforços nas Fibras                              | 21 |
| Figura 2.12 – As Três Disposições de Callister                                    | 23 |
| Figura 3.1 – As Quatro Variações de Fibra em Comprimento e Geometria              | 25 |
| Figura 3.2 – Instrumentos usados para a Produção do Corpo de Prova                | 26 |
| Figura 3.3 – Diferentes Módulos de Elasticidade                                   | 28 |
| Figura 3.4: Figura representativa do simulador atmosférico                        | 30 |
| Figura 4.1: Diagrama tensão-deformação para solo puro (SP)                        | 35 |
| Figura 4.2: Diagrama tensão-deformação para 0,4% fibra lisa-1cm (FL)              | 35 |
| Figura 4.3: Diagrama tensão-deformação para 0,4% fibra perfilada-1cm (FR)         | 36 |
| Figura 4.4: Diagrama tensão-deformação para todos os corpos de cada categoria     | 36 |
| Figura 4.5 – Diagrama tensão-deformação para a média dos corpos de cada categoria | 37 |
| Figura 4.6: Diagrama tensão-deformação para solo puro (SP)                        | 49 |
| Figura 4.7: Diagrama tensão-deformação para 0,4% de fibra lisa de 1cm (FL-1)      | 49 |
| Figura 4.8: Diagrama tensão-deformação para 0,4% de fibra perfilada de 1cm (FR-1) | 50 |
| Figura 4.9: Diagrama tensão-deformação para 0,4% de fibra lisa de 3cm (FL-3)      | 50 |
| Figura 4.10: Diagrama tensão-deformação para 0,4% de fibra lisa de 3 cm (FR-3)    | 51 |
| Figura 4.11: Diagrama tensão-deformação para todos os corpos de cada categoria    | 51 |
| Figura 4.12: Diagrama tensão-deformação para a média dos corpos de cada categoria | 52 |
| Figura 4.13: Diagrama tensão-deformação para solo puro com umidade variável       | 52 |
| Figura 4.14: Identificação dos pontos de interesse adotados pela nomenclatura     | 53 |
| Figura 4.15: Médias das fibras lisas de 1 e 3cm                                   | 55 |
| Figura 4.16: Médias das fibras perfiladas de 1 e 3cm                              | 55 |
| Figura 4.17: Diagrama de tensão-deformação de um polímero                         | 56 |
| Figura 4.18: Simulador atmosféricos com elementos individualizados                | 60 |
| Figura 4.19: Simulador de Insolação   | 60 |
| Figura 4.20: Simulador de chuvas  | 61 |

| <b>Figura</b>   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| Figura 4.21: Caixa de amostra   | 62            |
| Figura 4.22: Primeira fissura do solo com 0,4% em massa de fibra perfilada de 3cm                           | 63            |
| Figura 4.23: Primeira fissura do solo puro  | 64            |
| Figura 4.24: Estado de fissuração não fim do ciclo, para o solo com 0,4% em massa de fibra perfilada de 3cm | 64            |
| Figura 4.25: Estado de fissuração não fim do ciclo, para o solo puro  | 65            |
| Figura 4.26: Estado de fissuração ao fim do segundo ciclo, para o solo com fibra                            | 65            |
| Figura 4.27: Estado de fissuração não fim do segundo ciclo, para o solo puro                                | 66            |
| Figura 4.28: Estado de fissuração ao fim do terceiro ciclo, para o solo com fibra                           | 66            |
| Figura 4.29: Estado de fissuração não fim do terceiro ciclo, para o solo puro                               | 67            |
| Figura 4.30: Primeiras fissuras para o solo com fibras (b) e puro (a)                                       | 68            |
| Figura 4.31: Fissuras ao final do primeiro ciclo para o solo com fibras (b) e puro (a)                      | 69            |
| Figura 4.32: Fissuras ao final do segundo ciclo para o solo com fibras (a) e puro (b)                       | 70            |
| Figura 4.33: Fissuras ao final do terceiro ciclo para o solo com fibras (a) e puro (b)                      | 70            |
| Figura 4.34: Progressão das fissuras no solo com fibra  | 71            |
| Figura 4.35: Progressão das fissuras no solo com fibra  | 72            |
| Figura 4.36: Profundidade da fissura, solo puro   | 72            |
| Figura 4.37: Profundidade da fissura, solo com fibra de 3cm de comprimento                                  | 73            |

# LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

C – coeficiente de forma

D – diâmetro dos grãos do solo

e – índice de vazios

RCC – Resíduos da Construção Civil

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

$\gamma_w$  – peso específico do líquido

$\mu$  – viscosidade do líquido

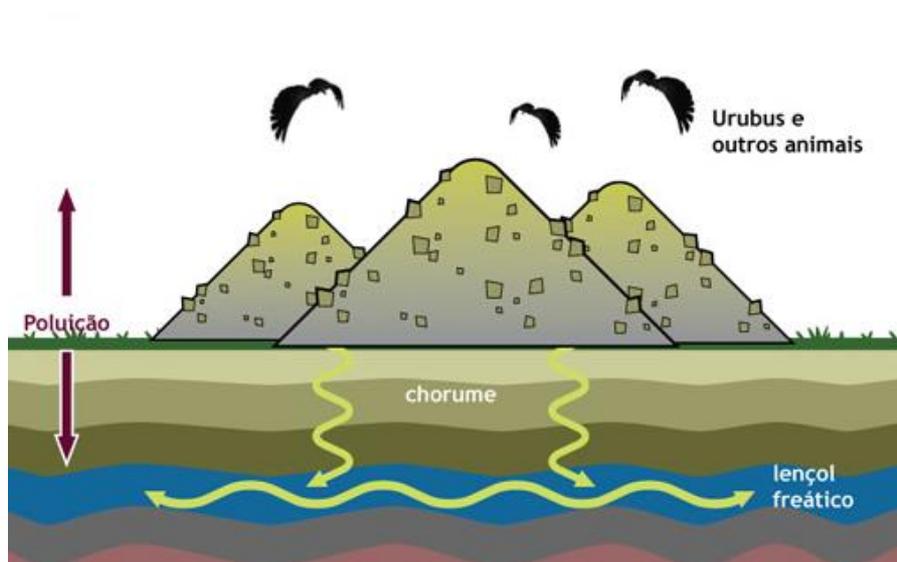
$k$  – coeficiente de permeabilidade

# 1. INTRODUÇÃO

A geração de resíduos faz parte do ciclo diário das pessoas, porque todo produto que se adquire ou consome será um resíduo no futuro, além dos resíduos produzidos para gerar o próprio produto. Portanto, os resíduos estão sempre presentes nas comunidades e com o crescimento populacional e a industrialização essa quantidade aumentou substancialmente e tende a continuar crescendo. Um grande motivo de preocupação para a população é onde serão dispostos esses resíduos de uma maneira adequada.

No cenário brasileiro, de acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (2008), 61,1% dos municípios ainda utilizam lixões, 24,1% utilizam aterros controlados, 14,9% aterros sanitários e outras destinações. Os lixões são uma forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos, que se caracteriza pela simples descarga do lixo sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. É importante também mencionar que o lixão também não possui sistema de tratamento para o chorume que penetra o solo com as substâncias contaminantes levando para o solo e para o lençol freático. Alguns animais como as moscas, pássaros e ratos convivem com o lixo livremente no lixão a céu aberto, e ainda pior as crianças, adolescentes e adultos coletam comida e materiais recicláveis para vender. No lixão, os resíduos ficam expostos sem nenhum processo que evite as conseqüências ambientais e sociais negativas, como mostrado na Figura 1.1.

Figura 1.1: Exemplo de um Lixão a Céu Aberto

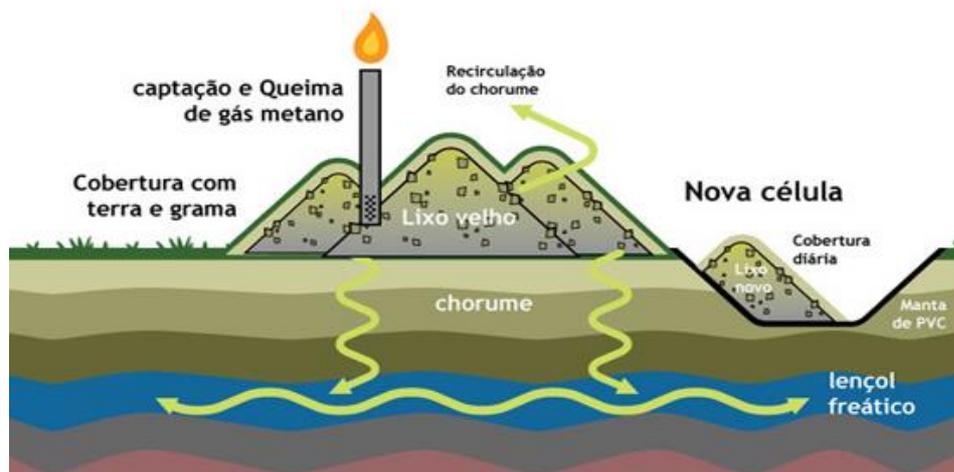


Fonte: <http://www.lixo.com.br/content/view/144/251/>

O aterro controlado, como ilustrado na Figura 1.2, é uma solução intermediária entre o lixão e o aterro sanitário. Geralmente é uma célula adjacente ao lixão que foi remediado, ou

seja, que recebeu cobertura de solo argiloso, e grama (idealmente selado com manta impermeável para proteger a pilha da água de chuva) e captação de chorume e gás. Esta célula adjacente é preparada para receber resíduos com uma impermeabilização com manta e tem uma operação que procura dar conta dos impactos negativos tais como a cobertura diária da pilha de lixo com terra ou outro material disponível como forração ou saibro. Tem também recirculação do chorume que é coletado e levado para cima da pilha de lixo, diminuindo a sua absorção pela terra ou eventualmente outro tipo de tratamento para o chorume como uma estação de tratamento para este efluente.

Figura 1.2: Exemplo de um Aterro Controlado



Fonte: <http://www.lixo.com.br/content/view/144/251/>

Já um aterro sanitário é uma solução de engenharia para receber e tratar o lixo produzido pelos habitantes de uma cidade, para reduzir ao máximo os impactos causados ao meio ambiente. Atualmente é uma das técnicas mais seguras e de mais baixo custo. A Figura 1.3 exemplifica a estrutura de um aterro sanitário.

Figura 1.3: Exemplo de um Aterro Sanitário



Fonte: <http://www.lixo.com.br/content/view/144/251/>

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento do composto solo + fibras PET, como material alternativo para utilização em cobertura de aterros sanitários, analisando suas propriedades mecânicas e seu comportamento quando submetido ao processo de ressecamento e umedecimento do solo através de um simulador atmosférico. Depois do terceiro ciclo de ressecamento foram avaliadas as fissuras e trincas da amostra para posterior comparação com a de solo puro.

### 1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a influência do comprimento e da forma da fibra, lisa ou perfilada, no comportamento do composto solo+PET;
- Comparar o comportamento mecânico entre as misturas solo+PET e solo puro;
- Avaliar o processo de formação de fissuras do solo e da mistura solo+PET, utilizando o simulador atmosférico e análise de imagens.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Os resíduos sólidos são os restos sólidos ou semi-sólidos das atividades humanas e não humanas, comumente chamado de lixo. Antigamente, os resíduos eram considerados algo que não apresenta utilidade ou valor comercial. Esse conceito mudou, já que a maioria dos resíduos podem apresentar outra função além da já exercida.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 10004 de 2004, os resíduos sólidos são:

“Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.”

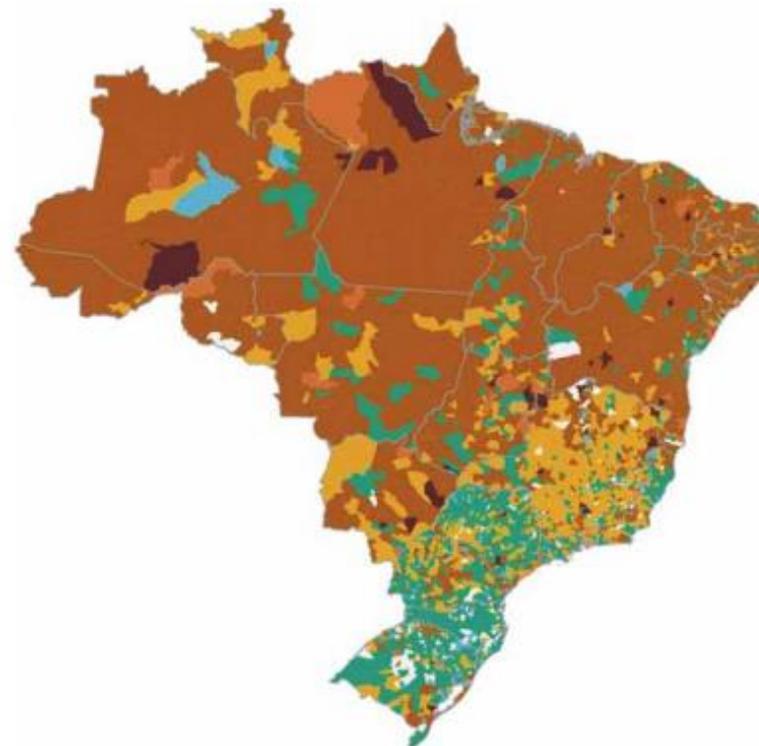
Também segundo a mesma norma, os resíduos sólidos são classificados em:

- Classe I - resíduos perigosos: característica apresentada por um resíduo que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas podem apresentar: risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices; riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.
- Classe II – resíduos não perigosos
  - Classe IIA – Não inertes: podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
  - Classe IIB - Inertes: qualquer resíduo que, quando amostrados de forma representativa e submetida a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou desionizada, a temperatura ambiente, conforme teste de solubilização, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, conforme definições norma ABNT NBR 10004/2004, executando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são oriundos das atividades feitas em aglomerados urbanos, entre eles estão os resíduos de origem domiciliar, comercial, hospitalares, industriais, de limpeza pública, construção civil e agrícolas. Com o crescimento populacional e a industrialização, aumentou as preocupações á cerca dos resíduos sólidos urbanos e sua disposição final.

A disposição final dos resíduos no Brasil ainda é uma questão problemática, de acordo com a Pesquisa Nacional do Saneamento Básico realizada em 2008 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), os lixões são muito utilizado como disposição final de residuos, principalmente no Norte e Nordeste do país como mostra na Figura 2.1.

Figura 2.1: Municípios, segundo a destinação final dos resíduos sólidos



Destinação final dos resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos

- Aterro controlado e aterro sanitário
- Aterro sanitário
- Aterro controlado
- Vazadouro a céu aberto (lixão) e aterro sanitário
- Vazadouro a céu aberto (lixão) e aterro controlado
- Vazadouro a céu aberto (lixão), aterro controlado e aterro sanitário
- Vazadouro a céu aberto (lixão)

Fonte: IBGE, Diretoria de pesquisas, Departamento da população e Indicadores Sociais Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008

Na Tabela 2.1 mostra a comparação da disposição final de resíduos sólidos do Brasil de 1989 até 2008. Houve uma diminuição no uso dos lixões e um aumento do uso de aterros sanitários. A destinação dos resíduos para lixões é de 50,8%, para aterros controlados é 22,5% e para aterros sanitários é de 27,7%. O depósito de resíduos sólidos em lixões é uma forma de deposição desordenada sem compactação ou cobertura dos resíduos, o que auxilia na poluição do solo, ar e água, bem como a proliferação de vetores de doenças. A forma mais adequada de tratar da disposição de lixo no cenário em que se encontra o Brasil é o aterro sanitário, desde que tenha uma gestão técnica associada a uma boa fiscalização.

Tabela 2.1: Destino final dos resíduos sólidos, por unidade dos resíduos (%)

| Ano  | Destino final dos resíduos sólidos, por unidades de destino dos resíduos (%) |                   |                  |
|------|--|-------------------|------------------|
|      | Vazadouro a céu aberto   | Aterro controlado | Aterro sanitário |
| 1989 | 88,2   | 9,6               | 1,1              |
| 2000 | 72,3   | 22,3              | 17,3             |
| 2008 | 50,8   | 22,5              | 27,7             |

Fonte: IBGE, Diretoria de pesquisas, Departamento da população e Indicadores Sociais Pesquisa Nacional de Sanamento Básico 2008

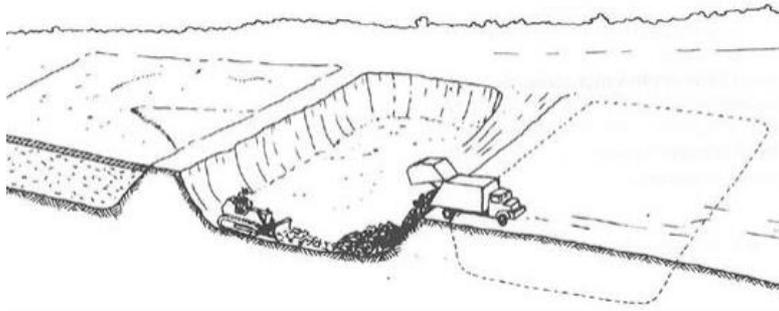
## 2.2 ATERROS SANITÁRIOS

Segundo NBR 8419 (1992), aterros sanitários constituem uma forma de disposição de resíduos no solo que, fundamentada em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permite o confinamento seguro em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública, minimizando os impactos ambientais.

Existem três métodos para aterramento dos resíduos: método da trincheira ou vala, método da rampa e método da área.

Método da trincheira ou vala: abertura das valas onde o resíduo será disposto, compactado e coberto por solo (Figura 2.2).

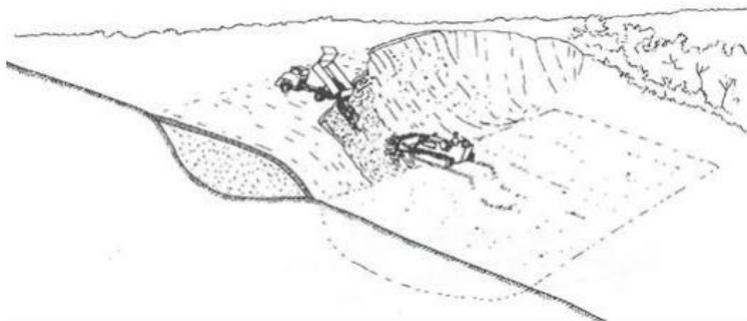
Figura 2.2: Exemplo do Método Trincheira



Fonte: (IPT, 1998)

Método da rampa: conhecida como escavação progressiva, é feita uma escavação da rampa onde o resíduo vai ser disposto e compactado pelo trator e logo após coberto pelo solo. É o método mais utilizado nos aterros brasileiros, executado em áreas de meia encosta, onde o solo oferece boas condições para ser escavado e, de preferência, possa ser utilizado como material de cobertura (Figura 2.3).

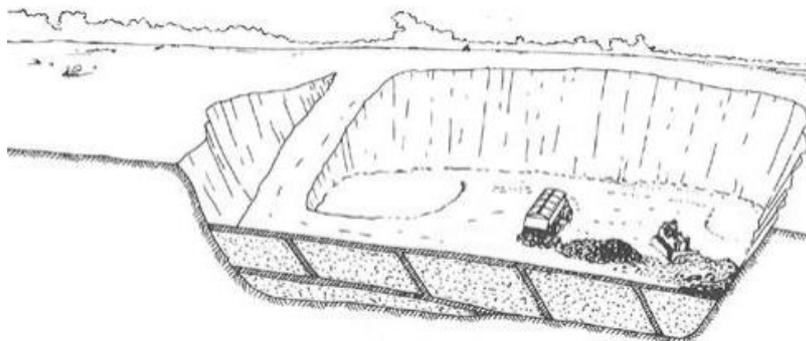
Figura 2.3: Exemplo do Método da Rampa



Fonte: (IPT, 1998)

Método de área: é empregado em locais onde a topografia é plana e lençol freático raso (Figura 2.4).

Figura 2.4: Exemplo do Método de Área (IPT, 1998)



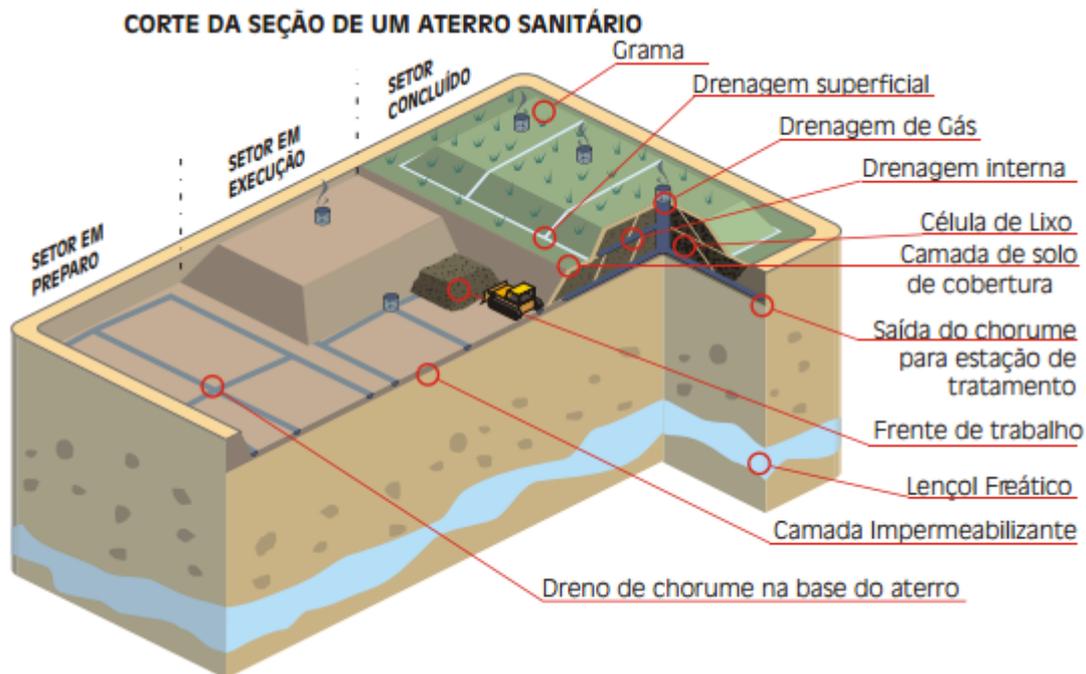
Fonte: (IPT, 1998)

Depois de terraplanada, a área de diposição dos resíduos é feito o revestimento inferior ou de base constituído por camadas de drenagem e impermeabilização. A compactação dos resíduos sólidos urbanos é feita por meio de um dos três métodos listados acima, o caminhão de lixo depois de pesado, descarrega o lixo ao pé do vale e o trator de esteiras espalha e empurra o lixo de baixo para cima, compactando cada camada de 3 a 6 vezes em toda seu comprimento, formando um talude com inclinação de 1V:2,5H a 1V:3H reduzindo o volume a um terço do inicial. No final do dia os resíduos compactados são cobertos por uma camada de cerca de 15cm de solo para evitar a propagação de vetores, o carreamento de partículas pelo vento e a infiltração de água pela chuva.

As vantagens de um aterro sanitário são: grande recepção de resíduos; permite a disposição correta desses resíduos; redução de riscos de poluição ambiental; evitam a transmissão de doenças, não contaminando as águas e protegendo também o solo e o ar; diminuição dos riscos de incêndios; fomenta o emprego e protege a qualidade de vida das gerações futuras. As desvantagens são: construção que exige grandes extensões de terras; uma constante necessidade de acompanhamento dos processos construtivos e uma verificação dos parâmetros ambientais e geotécnicos durante toda a vida do aterro.

Na Figura 2.5 mostra um aterro sanitário em diferentes estágios de desenvolvimento.

Figura 2.5: Figura Esquemática de um Aterro Sanitário



Fonte: Manual de Aterros Sanitários, Governo da Bahia

Segundo a NBR 8419/92 e a NBR - 13.086/05, o dimensionamento dos elementos que compõe o aterro sanitário são:

- movimento de terra – consistirá do dimensionamento do movimento de terra para implantação do aterro, tendo como meta obter um balanço de terra positivo, que possibilite a obtenção de terra para a impermeabilização das células e cobertura do lixo no próprio sítio;
- sistema viário – o dimensionamento das vias de acesso interno deverá considerar os seguintes critérios:
  - largura das vias: que permita o tráfego de dois veículos ao mesmo tempo;
  - declividade: que permita o acesso dos veículos durante todo o ano independente das condições climáticas, no caso de acesso não pavimentados (deve-se evitar declividades acima de 7%);
- células de aterramento – as células de aterramento serão as unidades onde o lixo será disposto (deverá ser evitada a existência de lixo com idades diferentes na mesma célula), devendo ser dimensionadas para períodos de utilização inferiores a 2 anos (as células de aterramento devem ser delimitadas pelo sistema viário);
- sistema de drenagem de águas pluviais – o sistema de drenagem de águas pluviais tem como objetivo a proteção dos taludes, da cobertura final, do sistema viário e a redução na geração de chorume (o dimensionamento do sistema de drenagem de águas pluvial deverá utilizar método adequado para a determinação das vazões do projeto das canaletas e tubulação);
- sistema de drenagem e tratamento de líquidos percolados – o dimensionamento do sistema de drenagem e tratamento de líquidos percolados segue as seguintes etapas:
  - determinação da vazão de chorume utilizando o método do balanço das águas;
  - dimensionamento dos drenos internos e anelares das células, dos poços de captação e tubulações que escoam o chorume até o tratamento;
  - dimensionamento da estação de tratamento de líquidos considerando a vazão e as características do chorume, com objetivo de adequar o efluente tratado aos parâmetros da legislação.
- sistema de drenagem de gases – o sistema de drenagem de gases deverá ser dimensionado em função do volume de gases produzidos no processo de degradação anaeróbia do lixo. Este sistema deverá ser composto de drenos verticais e horizontais interligados que tem por objetivo direcionar o fluxo dos gases para queimadores instalados no topo das células.

## 2.2.1 CAMADA DE COBERTURA

A camada de cobertura final é feita quando a capacidade do aterro está esgotada, com uma espessura de 60 cm ela recobre todo o aterro. Após o recobrimento se deve plantar gramas dos taludes definitivos com o fim de proteger contra a erosão. Essa camada tem como função controlar a entrada de ar e água para dentro do aterro, minimizar a saída de gás para fora do aterro, redução de odor, vetores de doenças, além de facilitar a recomposição da paisagem.

Os fatores que influenciam na confecção da camada de cobertura são: o tipo e a classe dos resíduos, o balanço hídrico e o clima do local, a estabilidade de taludes do sistema de cobertura e a recuperação da área do aterro. O sistema da camada de cobertura convencional possui vários componentes como ilustrado na Figura 2.6.

Figura 2.6: Estrutura Convencional da Camada de Cobertura de um Aterro Sanitário



Fonte: MARINHO, 2006

As características de cada camada é descrita abaixo:

- Camada de Superfície: a vegetação irá proteger o solo da erosão e expelir água através da evapotranspiração.

- Barreira Biótica: localizada logo após a camada superficial, impede que as raízes das vegetações e animais danifiquem as camadas inferiores.
- Camada de Proteção: separa o material fino dos grossos, impedindo os materiais finos de entupir a parte de granulometria grossa, e assim garantir o fluxo de água, fluido e gases.
- Camada Drenante: essa camada minimiza a percolação da precipitação para dentro do sistema, conduzindo-a lateralmente para fora. Elimina a poropressão na interface da barreira adjacente.
- Barreira Hidráulica: reduzir a percolação de líquidos ou gases, mudando ou impedindo a direção de qualquer precipitado que entre nesta camada.
- Camada de coleta de gás: direciona os gases provenientes da degradação do lixo para a atmosfera;
- Camada de Fundação: construída sobre os resíduos, ela serve de base para as outras camadas.

Depois de já construído o aterro, um dos grandes problemas é o surgimento de trincas na barreira hidráulica principalmente causado pelos recalque e ciclos de molhagem e secagem. Nos aterros mais antigos ou onde não existe uma boa impermeabilização a solução para este tipo de problema é adotar a impermeabilização na cobertura do aterro reduzindo dessa maneira a contaminação das águas e dos solos devido a diminuição da infiltração. Além disso, o sistema deve ser inspeccionado e reparado sempre que for necessário para garantir a durabilidade da obra.

## **2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS**

O comportamento mecânico dos solos estuda as características dos solos e suas propriedades mecânicas quando é submetido a acréscimos e alívios de tensões. Já o comportamento hidráulico estuda o deslocamento da água pelo solo.

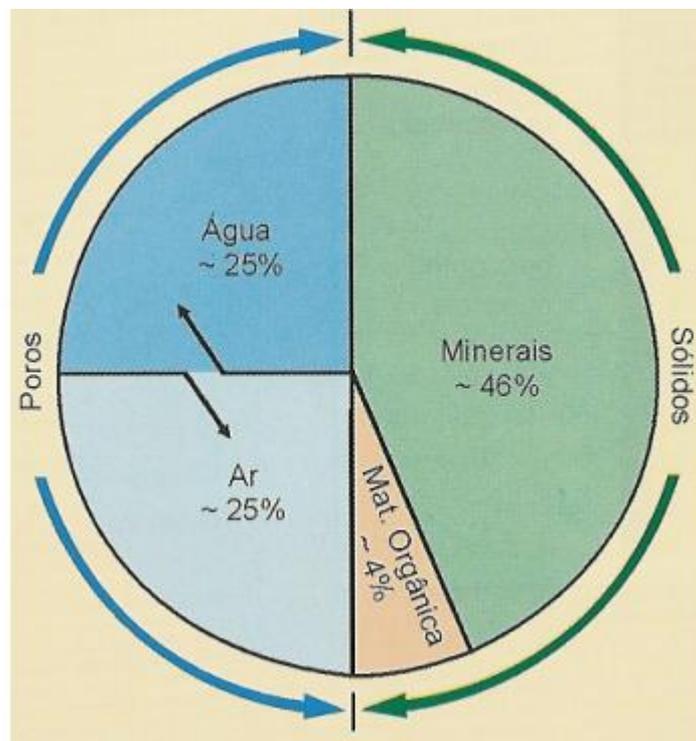
### **2.3.1 ESTRUTURA DO SOLO E COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA**

O solo é composto por um grande número de partículas, com várias dimensões e formas constituindo o seu esqueleto sólido. Como a estrutura não é maciça, ela não ocupa todo o volume do solo, formando assim os vazios. Os vazios podem estar ocupado de ar ou água, se estiver composto de água diz que o solo está saturado, se for composto por ar o solo

está seco, ou pode estar compostos pelos dois elementos. Portanto, é dito que o solo é composto de três fases: sólidos, água e ar, como mostrado na Figura 2.7.

O comportamento do solo depende da composição mineralógica dos grãos e da proporção de cada uma das fases em seu corpo, se os vazios são reduzidos pelo processo de compactação, a resistência do solo aumenta. Logo, a compactação é um processo que impõe a redução do índice de vazios com o objetivo de melhorar as características mecânicas e hidráulicas do solo, acarretando em um acréscimo da resistência e redução da compressibilidade e permeabilidade. Se o solo seco é molhado com uma quantidade de água, a coesão (e a coesão aparente), resistência e plasticidades irão mudar e potencialmente aumentar até os patamares desejados.

Figura 2.7: Figura Esquemática das Fases do Solo



Fonte: Lepsch, 2004

Os solos são formados por agregados de um ou mais minerais, podendo ser ele da rocha de origem ou formado pela decomposição desta. As partículas de minerais da argila tem um comportamento muito distinto quando em contato com a água, devido sua composição mineralógica e o tamanho de seus grãos, por isso foi estabelecido os limites de Atterberg baseado no teor de umidade do solo. Quando o solo estiver muito úmido, ele se comporta como um líquido, quando perde parte da sua água fica plástico e se perder mais ainda torna-se quebradiço.

O limite de liquidez é definido como o teor de umidade do solo com o qual a ranhura nele requer 25 golpes para se fechar numa concha, esse ensaio é feito de acordo com a com a NBR 6456/1987 da ABNT. O limite de plasticidade é definido como o menor teor de umidade com o qual se consegue moldar um cilindro com 3 mm de diâmetro, rolando-se o solo com a palma da mão, o procedimento deste ensaio segue a NBR 7180/1988 da ABNT.

### 2.3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

O solo como dito anteriormente é um sistema particulado composto de partículas sólidas e espaços vazios, os quais podem estar parcialmente ou totalmente preenchidos com água. As deformações dos solos, em geral, podem ser atribuídos a três causas principais:

- Compressão das partículas sólidas;
- Compressão dos espaços vazios do solo, com a conseqüente expulsão da água (no caso de solo saturado);
- Compressão da água (ou do fluido) existente nos vazios do solo.

O ensaio de compressão simples é um método simples e rápido que determina a resistência ao cisalhamento de solos coesivos e somente deste tipo de solo. O ensaio irá propiciar o valor da coesão (resistência não drenada) de campo do solo, denominada  $S_u$ , para isso deve ser feito com amostra indeformada e conservando sua umidade natural. Pode ainda ser usado para amostras de solos compactados.

O ensaio é determinado pela NBR 12770 de 1992, no qual determina a resistência à compressão simples sem confinamento lateral, que é o valor da pressão correspondente à carga que rompe um cilindro de solo submetido à um carregamento axial. A resistência a compressão é o valor da carga máxima de ruptura do material ou o valor da pressão correspondente à carga na qual ocorre deformação específica do cilindro de 20%, naqueles casos em que a curva tensão x deformação axial não apresenta pico.

A resistência ao cisalhamento não drenada, ou  $S_u$ , é a metade da resistência à compressão simples. O valor medido de resistência neste ensaio é para a condição não drenada, pois o ensaio é realizado tão rapidamente que não há perda de umidade para o meio ambiente. O ensaio de compressão simples pode ser executado de duas maneiras:

- Por deformação controlada: controla-se a velocidade de deformação do corpo de prova e mede-se a carga aplicada correspondente;

- Por carga controlada: controla-se a carga aplicada ao corpo de prova e mede-se a deformação correspondente.

### 2.3.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A resistência à tração é um importante parâmetro para a caracterização de materiais, porém se tem uma dificuldade de se obter a resistência à tração diretamente, foram desenvolvidos vários métodos indiretos para a sua determinação, um método interessante foi o ensaio brasileiro de compressão diametral para determinação indireta da resistência à tração desenvolvido pelo Professor Lobo Carneiro para concreto-cimento (Carneiro, 1943). A aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro gera, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a este diâmetro. A popularidade deste ensaio reside não somente na facilidade e rapidez de execução, mas como também no fato de utilizar o mesmo corpo-de-prova cilíndrico e equipamento usados para a obtenção da resistência à compressão.

Na ABNT NBR 7222:2011 se encontra o procedimento descrevendo o ensaio de compressão diametral, para a realização do ensaio, o corpo de prova cilíndrico com 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura é deixado em repouso ao longo de uma geratriz sobre o prato da máquina de compressão. Logo após, deve-se centralizar e alinhar o corpo de prova no dispositivo de compressão diametral. A carga é aplicada continuamente, sem choque, até a ruptura do corpo-de-prova.

### 2.3.4 RESSECAMENTO E FISSURAÇÃO DO SOLO

O secamento do solo através da evaporação da água pode acarretar no surgimento de fissuras ou trincas e essas podem mudar algumas características do solo como sua permeabilidade. Porém a capacidade do solo trincar depende também da sua estrutura e composição mineralógica, e também da umidade inicial e final.

O estudo destas trincas começou no século XIX, porém sua modelagem começou mesmo foi no século XX. Um dos primeiros a estudar este fenômeno foi Tempany (1917), ele pesquisou a relação entre as fissuras e a perda d'água do solo, observando a existência de

fases da fissura e apontando a umidade na qual o solo para de contrair, resistindo a abertura das fissuras, como sendo o limite de fissuras.

Assim que a evaporação ocorre, há a formação de um menisco entre a coluna de água que preenche os vazios do solo e suas partículas, desenvolvendo-se tensões de tração. Estas tensões expulsam a água para fora desses meniscos, diminuindo seu tamanho e aumentando a evaporação. Quando atinge o limite de contração do solo, a água evapora sem que haja a variação do volume da estrutura. Os meniscos de água nos vazios se retraem para o interior da amostra, causando uma mudança de cor para um tom mais claro. Esse processo origina pressões muito mais elevadas, ainda mais em solos finos, que excedem a resistência à tração do solo e inicia a fissuração do solo.

De acordo com Unal e Trogol (2001) O fenômeno de ressecamento tende a causar mudanças irreversíveis em argilas, independente de sua composição. O ressecamento a elevadas temperaturas leva a remoção da água, assim pode acabar com as propriedades dos colóides e a capacidade expansiva das argilas. Se a perda de água do solo ocorrer de maneira gradual, o decréscimo de volume do solo praticamente termina quando o solo atinge o limite de trincamento. Neste ponto, considera-se que o solo atinge seu menor valor de porosidade devido à evapotranspiração. Ao atingir este ponto, geralmente a umidade do solo atinge valor inferior a do limite de plasticidade.

## **2.4 SOLOS REFORÇADOS**

Segundo Budinsk (1996) conceituou reforço de solos como sendo processo físico ou químico que visa melhorar as características mecânicas do composto, aumentando a sua resistência e reduzindo sua compressibilidade e sua permeabilidade, sem necessariamente mudar as propriedades do solo. O reforço do solo é feito com a adição de algum material, de preferência um que ofereça alta resistência a tração. Neste campo entra em cena o aproveitamento dos RCC, das fibras de garrafa PET, dos geossintéticos no intuito de melhorar as propriedades do solo.

A tendência de escassez dos recursos naturais e a importância da redução dos impactos ambientais gerados pela construção civil fazem com que a mesma adquira novos conceitos e soluções técnicas visando à sustentabilidade de suas atividades. Desta forma, o aproveitamento dos RCC se destaca como alternativa alinhada a estes novos conceitos, valorizando os materiais descartados nas obras de engenharia, atribuindo-lhes a condição de

material nobre em vez de simplesmente lançá-los na natureza, retornando-os assim para a cadeia produtiva.

Segundo Callister (2006), o reforço com fibra tem tido uma maior relevância, pois os solos reforçados com fibra são conferidos altas resistências mecânicas, esta característica está expressa em termos dos parâmetros de resistência mecânica e módulo específico, que correspondem, respectivamente, às razões de resistência mecânica e módulo de elasticidade. Os solos reforçados com fibra com altas resistências mecânicas e módulos de elasticidade têm sido produzido utilizando-se materiais de fibra e de solo de baixa densidade e altamente fissurável.

## **2.5 REFORÇO COM FIBRAS**

O solo como material construtivo é usado a tempos imemoriais pela humanidade. No entanto, o mesmo apresenta um espectro e amplitude de resistências a esforços externos bastante pobre. Para superar a limitações do material o ser humano começou a reforçar o mesmo com uma gama de diferentes fibras.

As fibras historicamente usadas eram inicialmente vegetais e animais e somente com as mesmas é que se foi possível construir edificações que existem da América pré-colonial até hoje em dia, como as pirâmides dos incas , na região da Meso-América . As fibras eram adicionadas a misturas primitivas de solo e umedecidos para produzir tijolos ou compactados para grandes obras de terra, as já referidas obras acádias eram produzidas com camadas intercaladas de solo umedecido, compactado e intercalado com mantas de raízes.

Em tempos modernos usa-se bastante misturas de Geofibras, fibras com taxas típicas de mistura entre 0.1% e 0.4%, valores definidos experimentalmente em projetos anteriores da linha de pesquisa, para reforço de aterros, taludes e combate à erosão. Um exemplo contemporâneo, produzido industrialmente é o mono-filamento de polipropileno, um geossintético usado para o reforço de solo, principalmente para a melhora da resistência à tração, como na Figura 2.8.

Figura 2.8: Exemplos de Mono-filamento de Propileno



Fonte: <http://www.geosynthetics.com.cn/UploadFiles/20075162389835.jpg>

As fibras em si também podem ser divididas em diferentes categorias, uma das mais comuns sendo associada a uma classe de material. Dentro dessa classificação, têm-se quatro grupos claramente distintos: Vegetal, Mineral, Metálica, Polimérica.

Historicamente, as fibras vegetais são as primeiras que se tem o registro de uso pelo homem e como referido anteriormente sendo usado no reforço das mais diversas obras de terra remetendo à idade do bronze. Em termos de materiais específicos pode-se citar como exemplo as fibras de bambu, coqueiro, jut, malva e cana-de-açúcar.

O segundo grupo é composto por fibras minerais, ou feita a partir de minérios, ou compostos minerais extraídos de jazidas naturais e processados. Algumas das fibras minerais mais destacadas são as fibras de carbono, vidro e amianto, em linha gerais, apresentam boas propriedades de engenharia, de resistência a durabilidade. Na Figura 2.9 segue exemplo das quatro categorias de fibras representadas.

Figura 2.9: As Quatro Categorias de Fibras Representadas (em sentido horário a partir do canto superior: vegetal, mineral, metálica e polimérica)



Fonte: <http://www.bautech.eu/images/stories/oferta/produkty/wlokno-polimerowe-d.jpg>

As fibras metálicas são produzidas com ligas metálicas, principalmente aço e variações do mesmo com dopagem de outros materiais para melhorar ou potencializar alguma propriedade específica da liga especificada. Em linhas gerais, o aço é o metal predominante usado para a produção das fibras e as mesmas tem emprego principalmente em reforço de concreto e de outros materiais construtivos. As suas principais vantagens residem na sua boa resistência à tração e maleabilidade, que aumenta a sua adesão com a matriz de solo.

A última categoria de fibra a ser comentada é a de natureza polimérica, que é composta de cadeias carbônicas longas, ocasionalmente dopadas com outros elementos químicos. Uma fibra é definida pelo seu monômero, ou a menor unidade de sua cadeia, que é então disposta espacialmente em longas fibras e pode ser moldado de diversas formas. Dentre as fibras poliméricas de uso corrente na geotecnia pode-se citar: polipropileno, aramida, poliéster e polietileno. O polietileno tereftalato (PET) é o poliéster com o maior volume produzido atualmente e será usado como material usado no projeto para reforçar solos.

(Texto adaptado de The history of fibre reinforcement, elasto plastic concrete, 2014, e Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications, Jörg Müssig, Christian Stevens, 2010.)

### 2.5.1 MECANISMOS DE INTERAÇÃO SOLO-FIBRA

A adição de fibras à mistura de solo insere uma fase a mais no mesmo, uma composta principalmente de partículas de geometria majoritariamente linear. De acordo com Curcio (2008), o solo neste caso representa uma matriz que dispõe espacialmente o material no compósito e dessa forma distribui os esforços entre as fibras em si e a matriz de solo. E dentro dessa composição as fibras aumentam a rigidez e a resistência do material unido, dessa forma reduzindo a abertura e o aumento na distância entre as fissuras.

Ao contrário de Curcio, Taylor (1994) propõe que a presença das fibras na matriz de solo não impeça a geração de fissuras, mas sim atue de forma a impedir a propagação das mesmas. Dessa forma, as fibras atuam como controladores ou moderadores de fissura, distribuindo as tensões de forma mais homogênea dentro da matriz. Associado a essa hipótese de fibras distribuindo tensões, o autor propõe que as fibras em um estado pós-fissuração, ou após alguns ciclos atmosféricos, trabalham de forma efetiva.

Há diferentes formas com a qual as fibras de PET interagem com o solo, e alguns dos principais parâmetros usados para verificar a influência do mesmo é a resistência e

deformabilidade. Feuerharmel (2000) afirma que a observação inicial do efeito da presença de fibras já pode ser notado na primeira fase de compactação;

Se a energia de compactação for mantida constante, o índice de vazio vai sofrer um aumento em relação ao solo puro. E a magnitude do efeito de acréscimo do índice de vazios é dependente das forças de atrito atuantes entre a matriz de solo e o reforço, seja fibroso ou não. Um segundo indicador geotécnico que sofre uma variação usada para avaliar o efeito do acréscimo das fibras é a porosidade da mistura. A mesma também está diretamente associada à quantidade de fibra ou reforço presente no material compósito, do material da fibra e da geometria (perfil, comprimento, rugosidade).

Um fator que é central à eficiência do material compósito final é a própria natureza da matriz de solo. A mesma é associada à aderência entre as fibras e a matriz de solo. Segundo Curcio (2008) a maior aderência proporciona uma melhor redução no tamanho das fissuras.

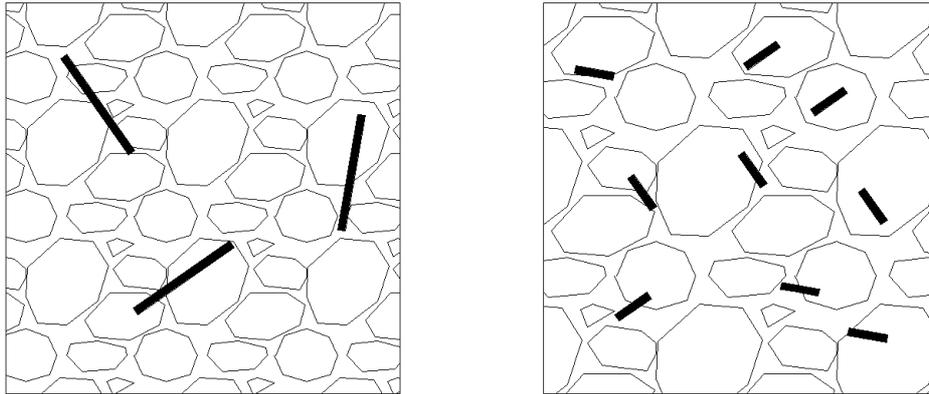
Outras melhoras nas propriedades de engenharia do solo também são observadas com uma boa aderência entre a matriz e as fibras. Algumas das propriedades que são de interesse para as fibras são: resistência à fadiga, aumento da tensão de ruptura, resistência à carga dinâmica e ductilidade.

A adição de fibras é dependente tanto do controle da umidade quanto da compactação, isso em acordo com Cúrcio (2008) Al-Wahab e El-Kedrah(1995). Um aumento demasiado na umidade quebra as ligações entre o solo e as fibras, tirando o propósito da mesma e tendo sua eficiência reduzida sensivelmente.

As propriedades mecânicas e hidráulicas de um material compósito foram avaliadas por meio de três principais ensaios: compressão diametral, flexão e condutividade hidráulica. Nessa mesma situação, Maher & HO (1994) usaram fibras de 3 diferentes materiais: polipropileno, vidro e fibrose, o que possibilitou observar algumas propriedades: A inclusão aleatória das fibras aumentou a resistência e a ductilidade do material.

Em termos de comprimento, observou-se duas situações para uma mesma taxa de reforço adicionada: as fibras mais curtas estão mais dispersas, indicando que há maior possibilidade da mesma estar na superfície de ruptura aumentando a resistência. Já as fibras mais longas permitem uma melhor ancoragem e uma maior ductilidade. Ambos fenômenos tiveram sua intensidade ampliada à medida que sua umidade era reduzida. Na Figura 2.10 mostra a comparação entre os dois comprimentos.

Figura 2.10 - Comparativo entre Comprimentos de Fibra (mesma quantidade de material adicionado)



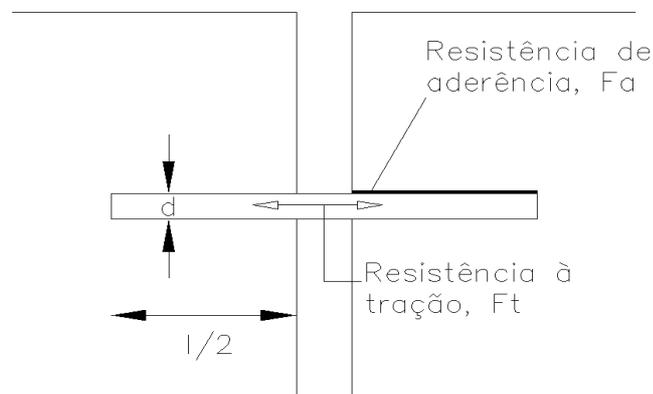
Fonte: Santos e Silva, 2014.

## 2.5.2 INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DAS FIBRAS

O comprimento da fibra tem uma influência principalmente na propriedade que se deseja melhorar, como referido anteriormente, para uma mesma taxa de material, comprimentos menores melhoravam a resistência e comprimentos maiores aumentava a ductilidade.

Um fenômeno que é de natureza primária para se definir as características mecânicas do compósito reforçado é o grau de transmissão das tensões na matriz para as fibras intercaladas na mesma. As condições de interface entre as fibras e a matriz são essenciais para se avaliar a eficiência da transmissão dos esforços internos. Taylor (1994), desenvolveu um modelo de interações que assume que a ligação entre a fibra e a matriz de solo cessa região de contorno entre as extremidades da fibra, o que por sua vez desenvolve os esforços internos como representado na Figura 2.11.

Figura 2.11: Desenvolvimento de Esforços nas Fibras



Fonte: Adaptado, Taylor, 1994.

Callister (2011) definiu o comprimento crítico de uma fibra como o valor que impõe um aumento efetivo na resistência e na rigidez do material. O comprimento crítico (atribuído como 'lc') é dependente do diâmetro da fibra (d) da resistência à tração última (Ft) e da resistência da interface entre a fibra e a parcela da matriz circundante, ou a tensão máxima cisalhante da matriz em si. Como em um material compósito a resistência é dada pela menor resistência das parcelas componente, utiliza-se na sua formulação o menor dos valores entre a resistência cisalhante do solo e da resistência oriunda da ligação fibra-matriz, representado na sua dedução como Fa.

$$\frac{\pi d^2}{4} \cdot Ft = \pi \cdot d \cdot \frac{l_c}{2} \cdot Fa \quad (2.3)$$

$$l_c = \frac{Ft \cdot d}{2 \cdot Fa} \quad (2.4)$$

Onde:

lc - comprimento crítico

d - diâmetro da fibra

Ft - resistência à tração última

Fa - o menor dos valores entre a resistência cisalhante do solo e da resistência oriunda da ligação fibra-matriz

Pelos modelos que associam a tensão efetiva normal, pode-se afirmar que um aumento da mesma implicará em um aumento também da resistência ao cisalhamento. Isso parte do princípio que o atrito entre o solo e a fibra é diretamente proporcional à tensão normal atuante no mesmo e conseqüentemente menor será o reforço necessário para se atingir um referido patamar de resistência.

Torna-se essencial, dessa forma, o conhecimento prévio das propriedades do solo que compões a matriz, de sua tensão efetiva à resistência à tração da fibra em si. Com esses dados, pode-se então definir de forma teórica o fator de forma da fibra, uma grandeza que é dado pela razão entre o comprimento e diâmetro da fibra.

Dotado do fator de forma de fibra pode-se então definir e determinar uma correlação entre a resistência cisalhante entre o reforço e a matriz e tração na seção transversal da fibra. Com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, representado na Equação 2.5 pode-se afirmar que os parâmetros de resistência de coesão (c') e φ (ângulo de atrito) serão determinantes para se calcular a tensão cisalhante.

$$\tau' = c' + \sigma' \cdot \tan\varphi \quad (2.5)$$

Onde:

$c'$  - coesão

$\varphi$  - ângulo de atrito

$\sigma'$  - tensão efetiva

$\tau'$  - resistência ao cisalhamento

Assumindo que as tensões confinantes são de pequena magnitude em relação às demais, afirma-se que a inclusão das fibras na matriz afeta a parcela friccional. Em uma situação onde as tensões confinantes são comparativamente elevadas, há um estado de tensões que altera o mecanismo de interação entre o reforço e o solo, isso pois a parcela friccional atinge uma resistência igual à do solo sem reforço, fazendo com que a adição de resistência vinda das fibras atue sobre a parcela coesiva da resistência.

### 2.5.3 INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO E DA CONCENTRAÇÃO DAS FIBRAS

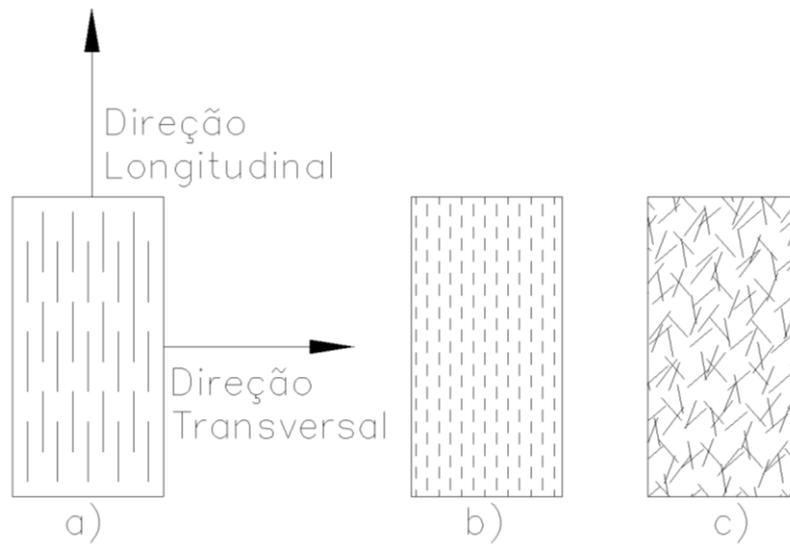
A disposição espacial das fibras entre si e a sua concentração no material compósito influenciam diretamente sobre as propriedades mecânicas da mistura, em especial as resistências aos esforços, ductilidade e deformabilidade.

Em relação à orientação, existem duas principais distribuições entre as fibras: paralelo ao eixo longitudinal, no qual as fibras estão paralelas entre si, alinhadas em um único sentido, ao longo do comprimento da matriz e um alinhamento randômico ou aleatório, em que não há uma única distribuição de alinhamento, mas sim variados ao longo de toda a matriz.

Em linhas gerais, as fibras contínuas são geralmente alinhadas e as fibras descontínuas, ou discretas são distribuídas aleatoriamente ou com alguma orientação geral. Independente do alinhamento, Callister (2011) afirma também que a melhora das propriedades dos compósitos reforçados está diretamente ligado à uniformidade da distribuição das fibras ao longo do material.

Uma disposição aleatória apresenta dessa forma duas vantagens sobre uma disposição alinhada a um eixo pré-determinado: Inexistem planos de ruptura preferenciais devido à dificuldade de deslizamento entre as fibras ou envoltórias de menor resistência e minimiza o surgimento de anisotropia. Na Figura 2.12 mostra as três disposições de Callister.

Figura 2.12: As Três Disposições de Callister, fibras contínuas e alinhadas (a), descontínuas e alinhadas (b) e descontínuas e distribuídas aleatoriamente (c)



Fonte: Adaptado, Callister 2011

### **3. METODOLOGIA**

Para a parte experimental, teve-se a divisão em três partes. A caracterização do solo, das fibras PET e avaliação das propriedades do compósito solo + fibra PET. A caracterização do solo e das fibras foi realizada anteriormente pelo grupo de pesquisa que vem estudando o assunto desde 2011, e serão comentadas posteriormente.

#### **3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO**

O solo coletado foi extraído da Região Administrativa de Samambaia, onde está prevista a construção do novo aterro sanitário do Distrito. A coleta de solo foi feita entre a DF-180, km 52 e o córrego Belchior, local próximo à Estação de Tratamento de Esgoto da CAESB.

A caracterização do solo com o destorroamento e homogeneização de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 1986). As misturas de solo com as devidas parcelas das fibras será comentado posteriormente.

Os ensaios de caracterização do solo puro foram:

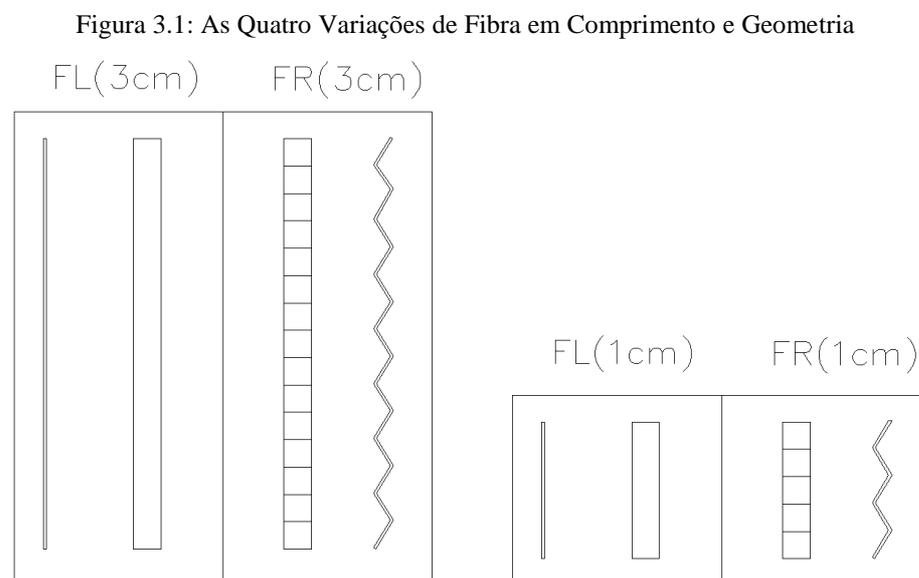
- Análise granulométrica por peneiramento (NBR 7181/ ABNT, 1984-a) e no granulômetro a laser;
- Determinação do limite de liquidez (NBR 6459 / ABNT, 1984-b);
- Determinação do limite de plasticidade (NBR 7180 / ABNT, 1984-c);
- Massa específica – procedimento descrito na NBR 6508 / ABNT, 1984-d;

#### **3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS PET**

As fibras PET, provenientes de garrafas PET, podem ser divididas em diferentes categorias em acordo com dois principais parâmetros: o comprimento e a geometria lateral. Em termos de comprimento, tem-se fibras de 1 e 3 cm e isso refere-se à medida da mesma no sentido longitudinal. Quando referindo-se à geometria lateral, a fibra divide-se em lisa e perfilada, dependendo do processo ou não usado para frisar a mesma. É importante reiterar que a largura das fibras é de 2mm e a espessura é da ordem de grandeza de décimos de milímetros e dependente da fonte do PET, na situação avaliada, polietileno de embalagens, primariamente refrigerantes.

As fibras de PET já haviam sido previamente produzidas no filete longo e cortadas na guilhotina para os comprimentos pré-determinados de 1 e 3 cm. Metade das amostras foi então perfilada, produzindo as fibras com a geometria lateral desejada, importantes em etapas futuras para comparar e entender o efeito da geometria espacial da fibra sobre a eficiência do reforço.

Como se desejava entender o impacto tanto do perfil lateral quanto do comprimento no resultado final, optou-se por usar dois comprimentos diferentes, e dois perfis laterais diferentes, criando uma combinação de pelo menos 4 tipos de fibra para serem testados, como exemplificado na Figura 3.1.



Fonte: Santos e Silva, 2014.

### 3.3 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO SOLO E DO COMPÓSITO SOLO + FIBRA PET

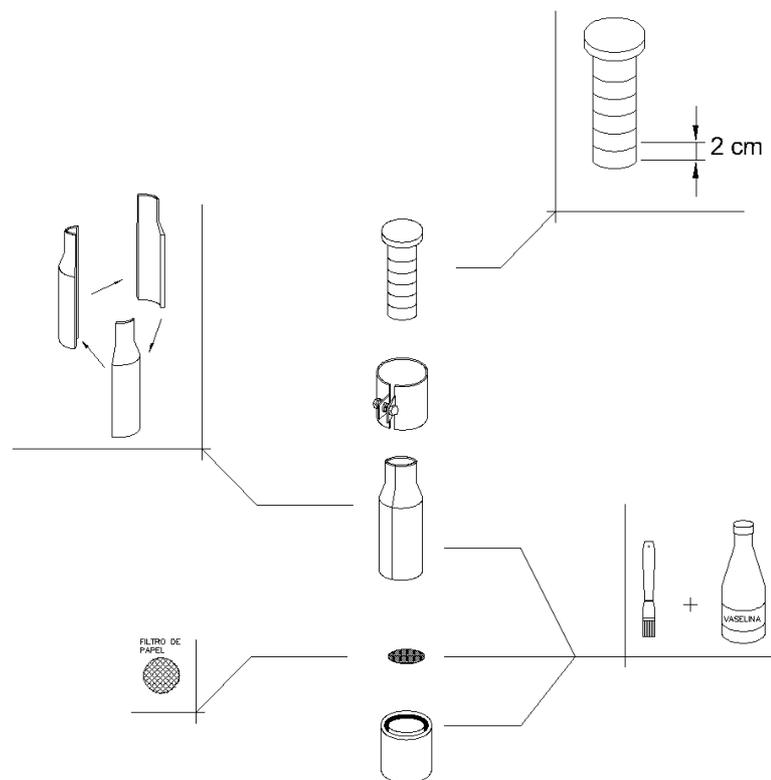
#### 3.3.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPACTAÇÃO SIMPLES - RCS

Preparo das amostras: As amostras foram preparadas previamente, com as parcelas correspondentes dos solos, água e fibra PET. O solo, mantido em um estado natural de umidade é corrigido para a umidade ótima por meio da adição da quantidade de água necessária para se atingir o valor. As fibras PET foram pesadas e adicionadas à mistura, no percentual de 0,4% em relação à massa de solo seco. A mistura foi realizada manualmente, garantindo uma distribuição espacial das fibras dentro do material. Essa mistura foi guardada

em embalagens individuais e movidas para a câmara úmida onde descansavam por um período de um dia.

Os corpos foram moldados por meio do procedimento definido na norma NBR 7182 / ABNT, 1986, executados de forma a simular uma situação de campo, compactando o mesmo em camadas de igual espessura, nessa situação, 2 cm utilizando-se uma prensa hidráulica. Foram produzidas 5 camadas dentro da forma do corpo de prova, atingindo a altura de 10 cm, e depois feito um controle de dimensões no mesmo, avaliando a geometria e massa de cada um dos corpos de prova produzidos. Na Figura 3.2 mostra o instrumento utilizado para produzir os corpos de prova.

Figura 3.2: Instrumentos usados para a Produção do Corpo de Prova



Fonte: Santos e Silva, 2014.

### 3.3.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de resistência a compressão simples está especificado na norma NBR 12770 (ABNT, 1992). Os corpos de prova que serão testados quanto à compressão são as misturas:

- Solo + 0,4% de fibras lisas de 1cm de PET– 3 amostras;

- Solo + 0,4% de fibras de perfiladas 1cm de PET – 3 amostras;
- Solo Puro, usado como controle – 3 amostras;

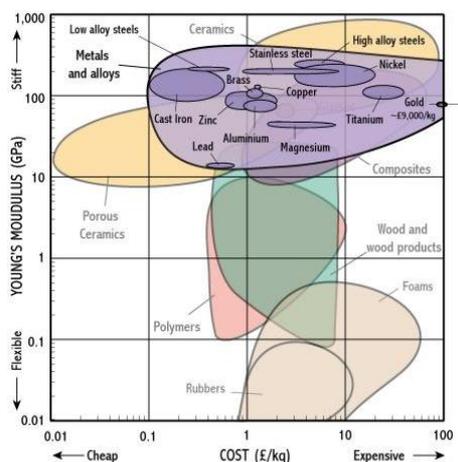
Os valores percentuais foram obtidos de etapas anteriores dentro da linha de pesquisa desenvolvida pelo grupo e são associados à relação das massas de solo na umidade ótima e da fibra . Serão moldados 3 corpos de prova para cada combinação de solo e fibra por meio do processo descrito na etapa anterior de ensaio de compressão. O rompimento desses corpos de prova se dará no mesmo dia que forem moldados e isso é um dia após à mistura do solo com as fibras.

A priori, assume-se que a fibra de PET não sofre com as condições de absorção de água que outros materiais de reforço como o RCC são sujeito, tornando a data de ruptura um fator de influência terciário. Com essa ruptura espera-se avaliar diferentes propriedade do material compósito, entre elas o impacto na resistência do corpo de prova, devido à presença das fibras, e uma potencial mudança das propriedades ou parâmetros geomecânicos do mesmo.

Um dos parâmetros que se deseja extrair do gráfico tensão-deformação é o módulo de elasticidade ou módulo de Young para o material compósito. É uma propriedade importante do material compósito para se avaliar em uma escala de parâmetros geomecânicos quanto é a influência da presença da fibra na mistura.

Deseja-se também averiguar se o resultado final, mesmo com a pequena adição de fibra, irá oscilar mais para um solo puro, um material compósito ou para o polietileno em si. A Figura 3.3 apresenta diferentes módulos de elasticidade que foram usados para verificar as tendências dos parâmetros do material compósito.

Figura 3.3: Diferentes Módulos de Elasticidade



Fonte: [http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive\\_charts/stiffness-cost/metals.jpg](http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/stiffness-cost/metals.jpg)

### 3.3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de tração por compressão diametral será realizado para os solos misturados com as fibras de comprimento igual a 1 cm e 3 cm, com suas respectivas geometrias, lisa e perfilada. O mesmo ensaio também será realizado para o solo puro, sem a presença de fibras, principalmente como valor de controle.

O procedimento descrevendo o ensaio de compressão diametral pode ser encontrado na ABNT NBR 7222:2011, e por meio de correlações pode-se então conseguir a resistência à tração do material compósito.

Dentro do contexto do solo reforçado, serão produzidos 4 corpos de prova de maneira análoga à descrita na etapa de ensaio de compressão, no entanto, nessa situação especificamente, os mesmos terão uma espessura de apenas dois centímetros, ou apenas a primeira camada da compactação.

Os corpos de prova feitos para o ensaio de tração passarão então pela compressão diametral usando a mesma prensa usada para a compressão simples. A diferença está no aparelho acoplado à mesma.

### 3.3.4 SIMULAÇÃO DE UMEDECIMENTO E RESSECAMENTO DO SOLO

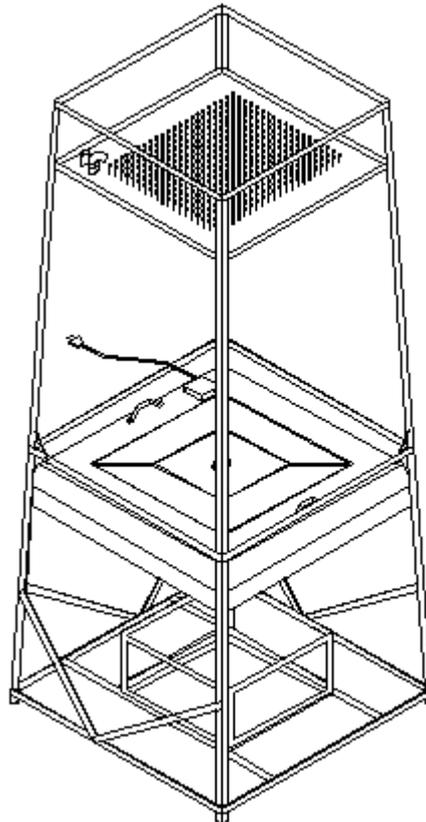
Na última fase do projeto é feita uma simulação no laboratório do umedecimento e ressecamento do solo, para analisar a abertura de fissuras. Este experimento tem a finalidade de avaliar e comparar o índice de fissuração de solo puro e do composto (solo + fibras PET); analisar os resultados obtidos deste simulador com os ensaios de compressão e tração feitos anteriormente de acordo com os itens 3.3.2 e 3.3.3.

O simulador atmosférico é um equipamento capaz de simular os efeitos da precipitação e da exposição à radiação solar dentro de um laboratório. Ele consiste em uma caixa de 60 cm de largura e comprimento e 30 cm de altura onde será colocado o solo as misturas. O simulador solar é uma placa de aço (0,9 x 0,9 m) com 16 lâmpadas de 250W distribuídas uniformemente pela placa, a altura desta placa pode ser ajustada para controlar a radiação e a temperatura dentro da caixa. As lâmpadas ficam acesas durante 12 horas simulando o dia e automaticamente elas desligam as outras 12 horas para simular a noite.

O simulador da precipitação foi baseado no projeto de Ribeiro et al. (2007), consiste em uma placa cheia de um formadores de gotas feitos de acrílico nas mesmas dimensões do

projeto original. O formador de gotas será alimentado diretamente pelas instalações hidráulicas do laboratório. Para que a carga hidráulica seja constante e produza chuvas uniformes durante o ciclo de umedecimento, foram instalados tubos de PVC de diferentes tamanhos que regulam o nível de água do reservatório e representam chuvas de diferentes intensidades. Na Figura 3.4 está representado o simulador atmosférico utilizado no experimento.

Figura 3.4: Figura representativa do simulador atmosférico



Fonte: Santos e Silva, 2014.

O solo utilizado no ensaio foi destorroado e peneirado pela peneira de 4,8mm, depois é acrescentado 0,4% de massa de fibras PET perfiladas de 3 cm e água para atingir a umidade ótima. Terminado este processo de mistura é feita a compactação manual em 3 camadas de 5 cm e inicia-se o primeiro ciclo de ressecamento da mistura. É coletada imagens durante todo o processo de ressecamento, por uma máquina fotográfica que tira fotos em intervalos regulares, é também instalada uma balança para o controle da perda de massa do solo e o controle da umidade e temperatura são feitos por tensiômetros e TH-5 instalados sobre a superfície da amostra.

O primeiro ciclo de ressecamento termina quando não tem mais perda de massa da mistura, e inicia-se o ciclo de umedecimento, precipitando água por toda a amostra até que a água cubra a amostra em 2 cm. Após este processo, a amostra é coberta com uma caixa para que não ocorram interferências decorrentes do desligamento do aparelho de chuvas e para que toda a água infiltre na amostra de solo. Terminado o ciclo de umedecimento, começará de novo um ciclo de ressecamento, e assim por diante até que termine o 3º ciclo de ressecamento onde foram avaliadas as fissuras e suas ramificações e foram comparados estes resultados com os resultados feitos anteriormente desta mesma caixa com solo puro.

## **4. RESULTADOS E ANÁLISES**

### **4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

#### **4.1.1 DESCRIÇÃO**

Para o ensaio de compressão foram produzidos 9 corpos de prova. Todos de geometria cilíndrica, com diâmetros nominais de 5 cm e altura de 10 cm. Os mesmos foram produzidos em acordo com o procedimento descrito no tópico 3.3.1, 'Ensaio de compactação'. Três corpos de prova para o solo puro, 3 para o solo com 0,4% de massa de fibras lisas de 1 cm de comprimento e 3 para o solo com 0,4% de massa de fibras perfiladas de 1 cm de comprimento. Os corpos produzidos dessa maneira foram então submetidos a alguns controles, ou medições referentes à massa dos mesmos e suas respectivas geometrias. Os resultados dos valores experimentais de diâmetro, altura e massa estão descritos na Tabela 4.1.

Os corpos e prova foram então levados à prensa do laboratório de geotecnia, PAVITEST 1099728, para serem rompidas na data de 11/11/2014, pelo período da tarde. Ajustando a prensa para uma taxa de deslocamento constante de 1mm e mantendo condições originais de carregamento nulo sobre os corpos, iniciou-se a compressão dos mesmos.

Tabela 4.1: Dados dos corpos de prova

|                        | Solo Puro |        |        | Fibra lisa |        |        | Fibra Perfilada |        |        |
|------------------------|-----------|--------|--------|------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|
|                        | SP 1      | SP 2   | SP 3   | FL1        | FL 2   | FL 3   | FR 1            | FR 2   | FR 3   |
| Diâmetro (mm)          | 51        | 50,7   | 50,5   | 50,7       | 50,4   | 50,5   | 50,6            | 50,5   | 50,5   |
| Altura (mm)            | 98        | 100,5  | 99,7   | 100        | 100,4  | 98,5   | 99,2            | 100,2  | 99     |
| Massa (g)              | 346,35    | 351    | 346,71 | 346,67     | 347,07 | 346,78 | 344,2           | 346,18 | 347,16 |
| W1 (%)                 | 30,48%    | 29,99% | 30,00% | 30,61%     | 30,11% | 30,44% | 30,07%          | 29,19% | 29,89% |
| W2 (%)                 | 30,53%    | 30,27% | 30,31% | 30,44%     | 30,09% | 30,53% | 30,06%          | 30,13% | 30,05% |
| Wmi (%)                | 30,5%     | 30,1%  | 30,2%  | 30,5%      | 30,1%  | 30,5%  | 30,1%           | 29,7%  | 30,0%  |
| Wm (%)                 | 30,3%     |        |        | 30,4%      |        |        | 29,9%           |        |        |
| V (cm <sup>3</sup> )   | 200,20    | 202,90 | 199,70 | 201,89     | 200,30 | 197,29 | 199,48          | 200,70 | 198,29 |
| D (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,730     | 1,730  | 1,736  | 1,717      | 1,733  | 1,758  | 1,725           | 1,725  | 1,751  |

#### 4.1.2 DADOS OBTIDOS

Os dados referentes ao processo de compressão foram coletados e estão descritos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Resultados do processo de compressão na prensa hidráulica

| SP1           |              | SP2           |              | SP3           |              | FL1           |              | FL2           |              |
|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| Def. Esp. (%) | Tensão (kPa) |
| 0             | 0,000        | 0             | 0,000        | 0             | 0,000        | 0             | 0,000        | 0             | 0,000        |
| 0,102         | 28,774       | 0,100         | 24,263       | 0,100         | 24,456       | 0,100         | 4,853        | 0,100         | 9,821        |
| 0,204         | 52,698       | 0,199         | 48,479       | 0,201         | 53,749       | 0,200         | 9,696        | 0,199         | 24,529       |
| 0,306         | 76,574       | 0,299         | 82,331       | 0,301         | 82,983       | 0,300         | 19,372       | 0,299         | 53,909       |
| 0,408         | 90,838       | 0,398         | 106,440      | 0,401         | 102,405      | 0,400         | 33,867       | 0,398         | 73,439       |
| 0,510         | 109,849      | 0,498         | 135,334      | 0,502         | 126,660      | 0,500         | 43,499       | 0,498         | 97,821       |

|       |         |       |         |       |             |       |             |       |         |
|-------|---------|-------|---------|-------|-------------|-------|-------------|-------|---------|
| 0,612 | 124,050 | 0,597 | 154,513 | 0,602 | 141,13<br>2 | 0,600 | 62,769      | 0,598 | 122,154 |
| 0,714 | 138,221 | 0,697 | 168,829 | 0,702 | 150,71<br>3 | 0,700 | 82,000      | 0,697 | 141,556 |
| 0,816 | 142,841 | 0,796 | 178,298 | 0,802 | 155,41<br>7 | 0,800 | 96,373      | 0,797 | 151,167 |
| 0,918 | 152,207 | 0,896 | 182,933 | 0,903 | 155,26<br>0 | 0,900 | 115,53<br>1 | 0,896 | 160,758 |
| 1,020 | 152,050 | 0,995 | 177,940 | 1,003 | 155,10<br>3 | 1,000 | 129,84<br>2 | 0,996 | 165,463 |
| 1,122 | 151,893 | 1,095 | 177,761 | 1,103 | 154,94<br>6 | 1,100 | 139,31<br>9 | 1,096 | 170,158 |
| 1,224 | 151,736 | 1,194 | 172,783 | 1,204 | 154,78<br>9 | 1,200 | 143,97<br>7 | 1,195 | 174,844 |
| 1,327 | 146,843 | 1,294 | 167,814 | 1,304 | 154,63<br>1 | 1,300 | 148,62<br>6 | 1,295 | 174,668 |
| 1,429 | 137,227 | 1,393 | 162,855 | 1,404 | 149,64<br>7 | 1,400 | 148,47<br>5 | 1,394 | 169,644 |
| 1,531 | 127,631 | 1,493 | 157,906 | 1,505 | 149,49<br>5 | 1,500 | 148,32<br>4 | 1,494 | 169,473 |
| 1,633 | 113,332 | 1,592 | 152,966 | 1,605 | 144,52<br>5 | 1,600 | 143,39<br>4 | 1,594 | 164,464 |
| 1,735 | 103,780 | 1,692 | 143,261 | 1,705 | 134,75<br>3 | 1,700 | 143,24<br>8 | 1,693 | 164,298 |
| 1,837 | 94,247  | 1,791 | 143,116 | 1,805 | 125,00<br>0 | 1,800 | 133,56<br>2 | 1,793 | 159,304 |
| 1,939 | 84,734  | 1,891 | 133,439 | 1,906 | 120,06<br>9 | 1,900 | 128,66<br>1 | 1,892 | 154,320 |
| 2,041 | 79,944  | 1,990 | 128,543 | 2,006 | 110,35<br>1 | 2,000 | 119,00<br>9 | 1,992 | 154,163 |
| 2,143 | 70,465  | 2,090 | 123,657 | 2,106 | 105,44<br>5 | 2,100 | 114,13<br>2 | 2,092 | 149,194 |
| 2,245 | 65,699  | 2,189 | 114,029 | 2,207 | 100,54<br>9 | 2,200 | 104,51<br>4 | 2,191 | 139,427 |
| 2,347 | 60,942  | 2,289 | 109,166 | 2,307 | 95,663      | 2,300 | 99,662      | 2,291 | 139,285 |
| 2,449 | 60,879  | 2,388 | 104,313 | 2,407 | 90,786      | 2,400 | 90,078      | 2,390 | 134,345 |
|       |         | 2,488 | 99,470  |       |             |       |             | 2,490 | 129,414 |
|       |         | 2,587 | 94,637  |       |             |       |             | 2,590 | 124,494 |
|       |         | 2,687 | 94,540  |       |             |       |             |       |         |

Tabela 4.2(continuação): Resultados do processo de compressão na prensa hidráulica

| FL3           |              | FR1           |              | FR2           |              | FR3           |              |
|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| Def. Esp. (%) | Tensão (kPa) |
| 0             | 0,000        | 0             | 0,000        | 0             | 0,000        | 0             | 0,000        |
| 0,100         | 14,673       | 0,101         | 9,744        | 0,100         | 24,456       | 0,101         | 34,238       |
| 0,201         | 34,204       | 0,202         | 9,734        | 0,200         | 58,636       | 0,202         | 78,179       |
| 0,301         | 53,695       | 0,302         | 48,620       | 0,299         | 87,865       | 0,303         | 112,268      |
| 0,401         | 82,899       | 0,403         | 72,856       | 0,399         | 112,160      | 0,404         | 141,412      |
| 0,502         | 107,173      | 0,504         | 97,043       | 0,499         | 136,406      | 0,505         | 165,626      |
| 0,602         | 131,398      | 0,605         | 121,181      | 0,599         | 155,736      | 0,606         | 180,057      |
| 0,702         | 155,574      | 0,706         | 135,585      | 0,699         | 165,304      | 0,707         | 189,597      |
| 0,802         | 184,558      | 0,806         | 149,960      | 0,798         | 169,994      | 0,808         | 194,260      |
| 0,903         | 189,223      | 0,907         | 154,640      | 0,898         | 169,823      | 0,909         | 198,914      |
| 1,003         | 193,879      | 1,008         | 154,483      | 0,998         | 169,652      | 1,010         | 198,711      |
| 1,103         | 198,524      | 1,109         | 159,148      | 1,098         | 169,481      | 1,111         | 198,509      |
| 1,204         | 198,323      | 1,210         | 158,986      | 1,198         | 164,473      | 1,212         | 198,306      |
| 1,304         | 202,954      | 1,310         | 154,011      | 1,297         | 164,307      | 1,313         | 193,271      |
| 1,404         | 197,920      | 1,411         | 153,853      | 1,397         | 159,313      | 1,414         | 188,247      |
| 1,505         | 197,719      | 1,512         | 153,696      | 1,497         | 154,329      | 1,515         | 188,054      |
| 1,605         | 192,700      | 1,613         | 148,741      | 1,597         | 154,173      | 1,616         | 183,044      |
| 1,705         | 192,504      | 1,714         | 148,588      | 1,697         | 144,390      | 1,717         | 178,044      |
| 1,805         | 182,692      | 1,815         | 143,648      | 1,796         | 139,436      | 1,818         | 177,861      |
| 1,906         | 182,505      | 1,915         | 138,717      | 1,896         | 134,491      | 1,919         | 168,074      |
| 2,006         | 177,521      | 2,016         | 129,017      | 1,996         | 129,555      | 2,020         | 163,104      |
| 2,106         | 167,753      | 2,117         | 124,111      | 2,096         | 124,630      | 2,121         | 158,143      |
| 2,207         | 167,581      | 2,218         | 114,446      | 2,196         | 119,714      | 2,222         | 148,405      |
| 2,307         | 157,843      | 2,319         | 109,564      | 2,295         | 114,809      | 2,323         | 138,687      |
| 2,407         | 152,903      | 2,419         | 99,934       | 2,395         | 109,912      | 2,424         | 128,989      |
| 2,508         | 147,972      | 2,520         | 95,077       | 2,495         | 105,026      | 2,525         | 124,083      |
| 2,608         | 143,052      |               |              | 2,595         | 100,150      | 2,626         | 114,420      |
| 2,708         | 138,141      |               |              | 2,695         | 95,283       | 2,727         | 104,776      |
| 2,808         | 133,240      |               |              | 2,794         | 95,185       | 2,828         | 99,910       |
| 2,909         | 128,349      |               |              |               |              |               |              |
| 3,009         | 123,468      |               |              |               |              |               |              |

### 4.1.3 ANÁLISE DOS DADOS

A primeira etapa da análise consiste na produção de gráficos de tensão-deformação para cada grupo de mistura. Os gráficos representados nas Figuras de 4.1 a 4.5.

Figura 4.1: Diagrama tensão-deformação para solo puro (SP)

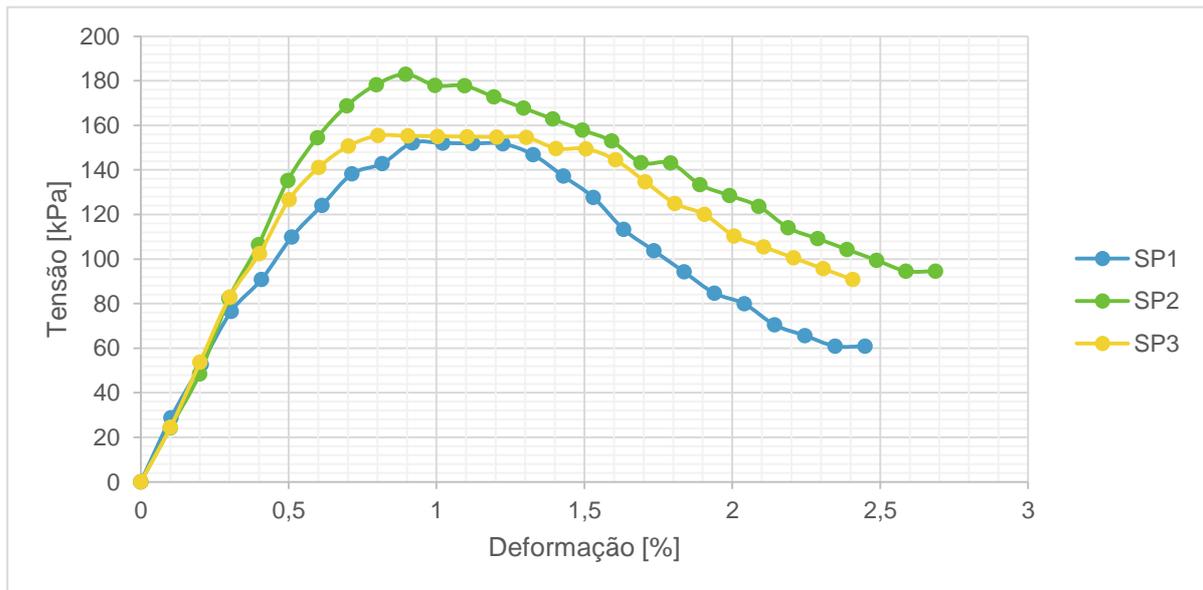


Figura 4.2: Diagrama tensão-deformação para 0,4% fibra lisa-1cm (FL)

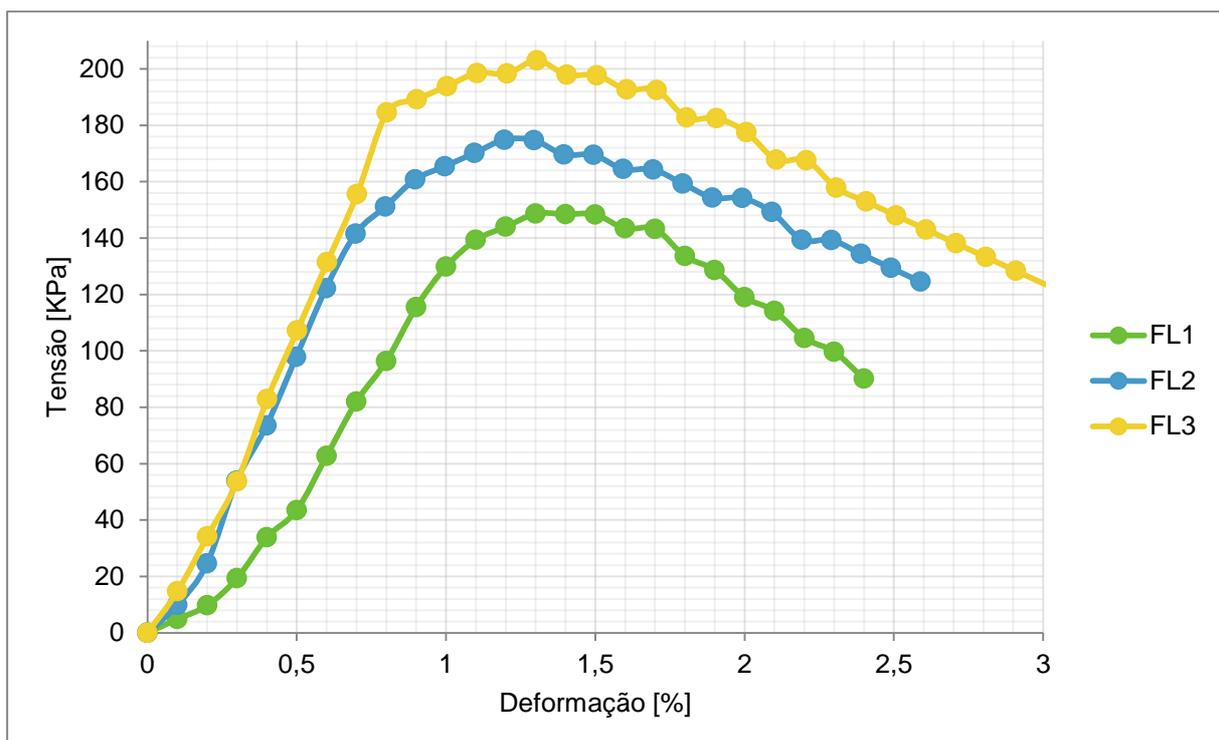


Figura 4.3: Diagrama tensão-deformação para 0,4% fibra perfilada-1cm (FR)

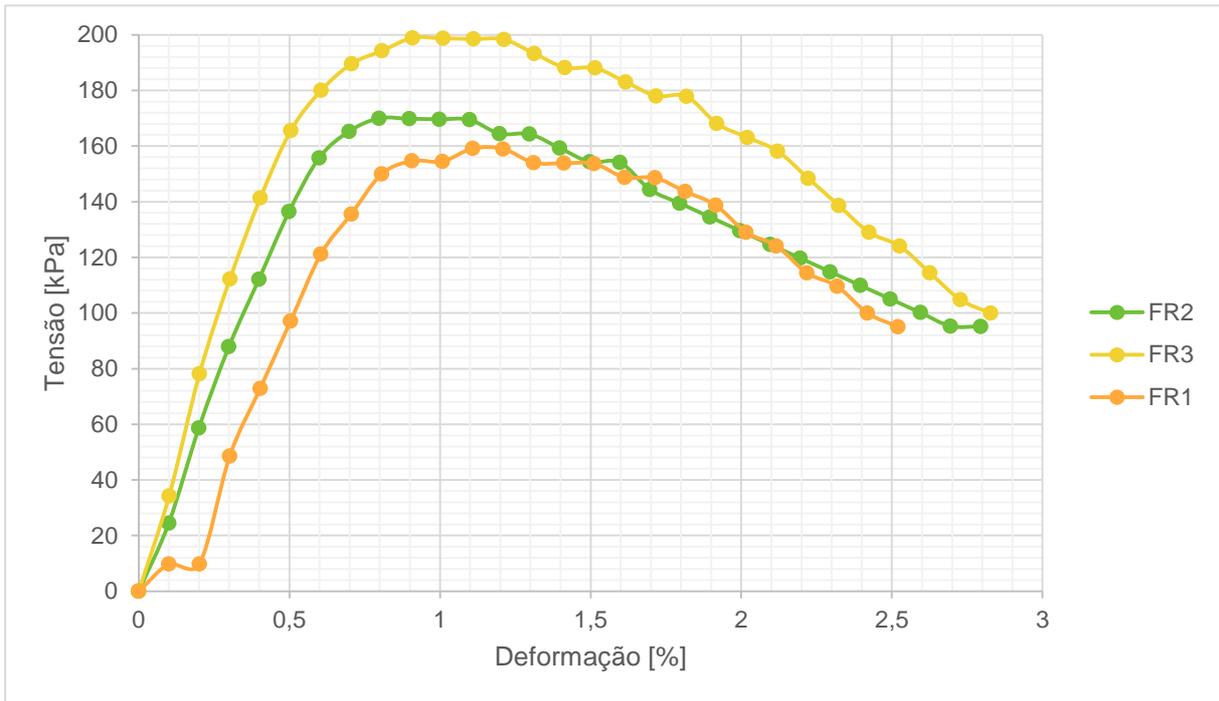


Figura 4.4: Diagrama tensão-deformação para todos os corpos de cada categoria

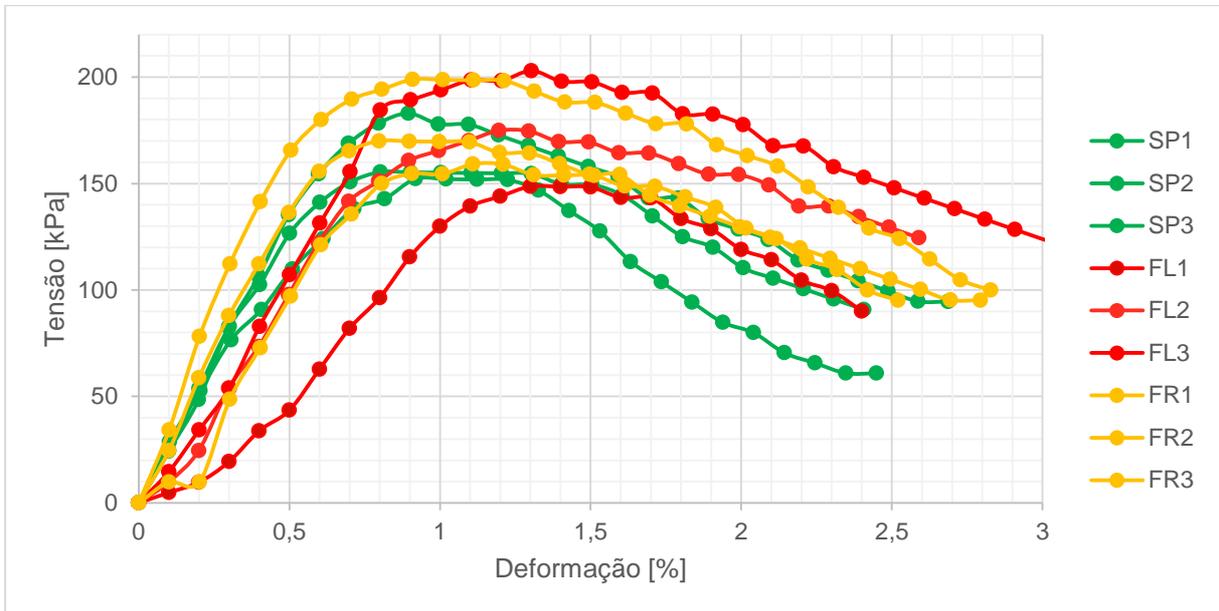
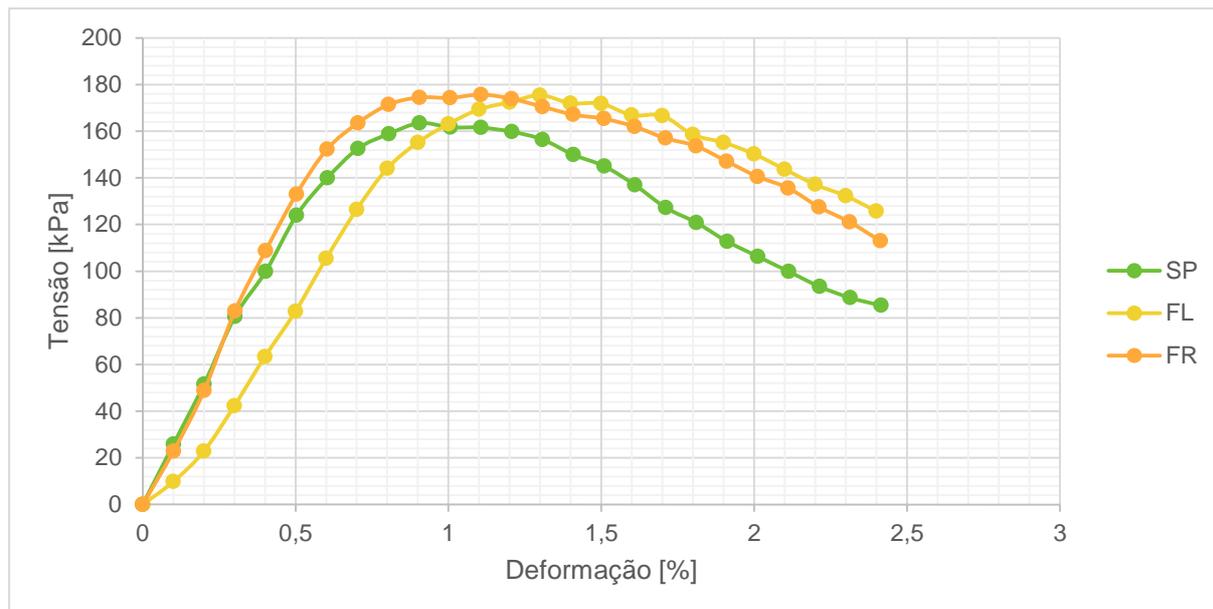


Figura 4.5 – Diagrama tensão-deformação para a média dos corpos de cada categoria



A primeira análise que se pode fazer está associada a forma dos gráficos, para o solo puro observa-se na fase inicial um comportamento elástico, dado a forma linear do gráfico. Após o pico de resistência, o solo perde a resistência diminuindo rapidamente como apontado no gráfico.

Nos corpos de prova com fibras lisas também observa-se um comportamento linear no início do gráfico, após o pico de resistência ocorre uma queda da resistência, porém não tão acentuada quanto do solo puro, outra diferença entre os gráficos das Figuras 4.1.e 4.2 é que o pico de resistência ocorre para diferentes valores de deformações.

No gráfico da Figura 4.3, mostra que na mistura com fibras perfiladas também há um comportamento elástico no instante inicial e após o pico de resistência há queda de tensões, porém de uma maneira mais suave.

Observando o gráfico da Figura 4.5, das médias de cada categoria, observa-se que a mistura de solo com fibras perfiladas e a de solo puro tem um comportamento bastante similar no começo e após atingir o pico de resistência há uma queda no gráfico do solo puro, mas no de fibra perfilada ele cai suavemente. O gráfico da mistura de fibra lisa está ligeiramente deslocado para a direita no momento inicial, mas após o pico de ruptura ele cai similarmente ao gráfico de fibra perfilada.

Não ocorre uma melhora significativa na resistência do solo com a adição de fibras, como pode se observar nos gráficos, portanto, a melhora das propriedades mecânicas do solo por adição de fibra não se dá por meio de um aumento na tensão de ruptura do solo em si.

## **4.2 RESISTÊNCIA Á TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**

### **4.2.1 DESCRIÇÃO**

Para o ensaio de tração, usou-se a metodologia da compressão diametral, ou do ensaio de Carneiro-Lobo. Um corpo de prova cilíndrico, de diâmetro de 5cm e altura de 2cm é produzido com o material que se deseja definir a resistência à tração. O mesmo é então movido à prensa hidráulica, onde é rompido no sentido diametral, medindo durante o processo, as leituras associadas à carga e à deformação. Os resultados obtidos são então calibrados para as situações do experimento, calculando-se depois os valores de tensão e deformação usados no diagrama de tensão-deformação.

O material a ser usado em cada um dos corpos de prova foi previamente produzido por meio da mistura do solo, com a quantidade necessária de água para que a mesma atinja o estado de umidade ótima e 0,4% da massa em fibras, quando as mesmas eram avaliadas. Das fibras, foram testadas quatro variações, fibra lisa de 1cm, fibra perfilada de 1cm, fibra lisa de 3cm, fibra perfilada de 3cm. Essa mistura é então lacrada em um invólucro plástico, e deixada de um dia para outro dentro da câmara úmida, de forma a garantir que a umidade seja homogeneizada.

Com o material nas condições necessárias, após o dia de homogeneização, os mesmos são moldados seguindo a metodologia descrita no ensaio de compactação, no tópico 3.3.1. A diferença central em relação aos corpos de prova usados no ensaio de compressão, é que nessa situação os corpos de prova produzidos são de 2 cm de espessura, ou o equivalente a uma única camada usada na moldagem dos corpos à compressão. Cada mistura de material gerou 4 corpos de prova, ou um grupo para cada tipo de dosagem.

Com os corpos devidamente identificados e já preparados, procede-se para a ruptura. Cada amostra é então disposta na prensa hidráulica em acordo com o método, alinhando os apoios com o diâmetro e acionando a prensa que estava configurada para uma taxa constante de elevação. Os dados lidos serão calibrados para as condições do laboratório, principalmente à natureza da própria prensa.

Posteriormente ao ensaio de tração, o material rompido passa por um processo de controle de produção. Nessa etapa, o material tem sua umidade medida exatamente após a ruptura completa. Para o controle do processo de mistura optou-se por determinar a quantidade de fibra em cada corpo individual, recuperando o que havia em cada amostra individual.

## 4.2.2 DADOS OBTIDOS

Representados nas Tabelas 4.3 até 4.9 estão os dados obtidos. Na Tabela 4.3 está representada a massa (M), diâmetro (D), altura (H) e umidade (W) para cada um dos vinte corpos de prova rompidos. As amostras individuais estão identificadas por 'CP<sub>i</sub>', onde o índice 'i' é o número do corpo dentro da sua categoria de dosagem, ou mistura. As cinco categorias de mistura são:

1. SP – solo puro;
2. FL-1 – 0,4% da massa em fibra lisa de 1cm
3. FR-1 – 0,4% da massa em fibra perfilada de 1cm
4. FL-3 – 0,4% da massa em fibra lisa de 3cm
5. FR-3 – 0,4% da massa em fibra perfilada de 3cm

Tabela 4.3: Geometria, massa e umidade dos corpos de prova

|      | Id  | M (g)  | D (mm) | H (mm) | W (%)  |
|------|-----|--------|--------|--------|--------|
| SP   | CP1 | 68,862 | 50,25  | 20,4   | 30,99% |
|      | CP2 | 69,77  | 50,5   | 19,5   | 31,28% |
|      | CP3 | 67,627 | 50,25  | 19,5   | 30,30% |
|      | CP4 | 69,786 | 50,25  | 19,7   | 29,73% |
| FL-1 | CP1 | 69,526 | 50,3   | 19,9   | 29,19% |
|      | CP2 | 69,835 | 50,25  | 20     | 29,52% |
|      | CP3 | 68,844 | 50,2   | 19,95  | 29,69% |
|      | CP4 | 69,768 | 50,3   | 19,7   | 30,18% |
| FR-1 | CP1 | 69,654 | 50,4   | 19,95  | 30,14% |
|      | CP2 | 69,505 | 50,4   | 19,95  | 31,06% |
|      | CP3 | 69,545 | 50,65  | 20     | 29,01% |
|      | CP4 | 69,642 | 50,6   | 20,2   | 29,42% |
| FL-3 | CP1 | 69,789 | 50,45  | 19,95  | 28,53% |
|      | CP2 | 69,79  | 50,5   | 19,95  | 29,07% |
|      | CP3 | 69,831 | 50,4   | 20     | 30,07% |
|      | CP4 | 68,56  | 50,7   | 20,6   | 29,28% |
| FR-3 | CP1 | 69,58  | 50,1   | 19,95  | 29,91% |
|      | CP2 | 69,69  | 50,5   | 20,1   | 30,00% |
|      | CP3 | 69,721 | 50,2   | 20,3   | 29,11% |
|      | CP4 | 69,652 | 50,2   | 20,4   | 29,60% |

Na Tabela 4.4 estão representados os valores de leitura para os vinte corpos de prova, novamente subdivididos nas suas respectivas categorias de dosagem. As deformações lidas (d) estão em milímetros, e as cargas (Q) estão em Kgf (10\*N).

Tabela 4.4: Valores de Leitura

| d (mm) | SP       |      |      |      | FL-1 |      |      |      | FR-1 |      |      |      | FL-3 |      |      |      | FR-3 |      |      |      |
|--------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|        | CP1      | CP2  | CP3  | CP4  | CP1  | CP2  | CP3  | CP4  | CP1  | CP2  | CP3  | CP4  | CP1  | CP2  | CP3  | CP4  | CP1  | CP2  | CP3  | CP4  |
|        | Ql (Kgf) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 0      | 0        | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 0,1    | 0,35     | 0,5  | 0,4  | 0,27 | 0,37 | 0,88 | 0,48 | 0,42 | 0,63 | 0,28 | 0,3  | 0,65 | 0,19 | 0,24 | 0,11 | 0,46 | 0,29 | 0,56 | 0,25 | 0,09 |
| 0,2    | 0,8      | 0,85 | 1,09 | 0,71 | 0,99 | 1,11 | 0,8  | 0,82 | 1,4  | 0,66 | 0,68 | 1,35 | 0,61 | 0,52 | 0,4  | 0,95 | 0,95 | 1,3  | 0,81 | 0,28 |
| 0,3    | 1,35     | 1,4  | 1,5  | 1,3  | 1,58 | 1,64 | 1,38 | 1,72 | 2,06 | 1,15 | 1,14 | 2    | 1,51 | 1,03 | 1,05 | 1,6  | 1,57 | 1,89 | 1,45 | 0,76 |
| 0,4    | 1,87     | 1,93 | 2,22 | 1,82 | 1,92 | 2,11 | 2,08 | 2,41 | 2,55 | 1,71 | 1,6  | 2,59 | 1,8  | 1,57 | 1,65 | 2,21 | 2,25 | 2,46 | 2,1  | 1,46 |
| 0,5    | 2,34     | 2,42 | 2,81 | 2,35 | 2,52 | 2,59 | 2,72 | 3,09 | 3,1  | 2,31 | 2,11 | 3,15 | 2,86 | 2,15 | 2,43 | 2,83 | 2,86 | 2,96 | 2,66 | 2,08 |
| 0,6    | 2,71     | 2,61 | 3,43 | 2,84 | 3,38 | 3    | 2,98 | 3,85 | 3,58 | 2,84 | 2,6  | 3,61 | 3,15 | 2,62 | 2,87 | 3,36 | 3,36 | 3,35 | 3,2  | 2,68 |
| 0,7    | 3,1      | 3,2  | 3,69 | 3,65 | 3,98 | 3,38 | 3,55 | 4,62 | 4,24 | 3,37 | 3,03 | 3,93 | 3,75 | 3,11 | 3,35 | 3,88 | 3,91 | 3,87 | 3,65 | 3,23 |
| 0,8    | 3,41     | 3,53 | 4,65 | 3,61 | 3,97 | 3,76 | 3,89 | 5,24 | 4,39 | 3,78 | 3,44 | 4,2  | 4,25 | 3,56 | 3,79 | 4,34 | 4,32 | 4,11 | 4,03 | 3,73 |
| 0,9    | 3,67     | 3,85 | 5    | 3,96 | 4,38 | 4,05 | 4,41 | 5,25 | 4,83 | 4,18 | 3,83 | 4,55 | 4,72 | 3,9  | 4,22 | 4,78 | 4,7  | 4,39 | 4,4  | 4,26 |
| 1      | 3,94     | 4,12 | 5,3  | 4,15 | 4,44 | 4,35 | 4,51 | 5,64 | 3,01 | 4,47 | 4,17 | 3,27 | 5,14 | 4,22 | 4,52 | 5,14 | 5,16 | 3,61 | 4,76 | 4,71 |
| 1,1    | 4,13     | 3,71 | 5,64 | 4,52 | 4,65 | 4,64 | 4,83 | 5,96 | 1,37 | 2,62 | 4,54 | 1,82 | 5,49 | 4,54 | 4,86 | 5,3  | 5,38 | 2,8  | 5    | 5,07 |
| 1,2    | 4,28     | 1,36 | 5,71 | 4,7  | 4,82 | 5,08 | 5,09 | 6,2  | 1    | 1,13 | 4,85 | 1,83 | 5,83 | 4,74 | 4,7  | 2,33 | 2,7  | 2,62 | 5,31 | 5,48 |
| 1,3    | 4,39     | 0,2  | 5,9  | 2,54 | 5,29 | 5,49 | 5,46 | 6,27 | 1,54 | —    | 5,07 | 2,22 | 6,12 | 2,9  | 3,51 | 1,49 | 1,49 | 2,57 | 5,51 | 5,8  |
| 1,4    | 4,54     | —    | 1,88 | 0,68 | 5,21 | 3,46 | 1,67 | 4,19 | 1,75 | —    | 2,98 | 2,18 | 3,51 | 1,02 | 2,53 | 1,87 | 1,87 | 2,82 | 5,62 | 4,5  |
| 1,5    | 4,8      | —    | 1,22 | —    | 2,71 | 2,6  | 0,42 | 2,57 | —    | —    | 2,23 | 1,74 | 2,38 | 0,58 | 2,28 | 1,98 | 1,98 | 3,41 | 2,35 | 3,69 |
| 1,6    | 4,95     | —    | 0,82 | —    | 1,93 | 1,49 | 0,79 | 2,17 | —    | —    | 2,26 | 1,5  | 1,76 | 0,68 | 2,46 | 1,98 | 1,99 | 3,56 | 1,21 | 3,36 |
| 1,7    | 1,58     | —    | —    | —    | 2,46 | 1,05 | 1,59 | 2,76 | —    | —    | 2,83 | 1,39 | 1,7  | 1,12 | 2,93 | 2,15 | 2,17 | 3,68 | 0,88 | 3,23 |
| 1,8    | 0,38     | —    | —    | —    | 2,09 | 1,41 | 1,54 | 2,1  | —    | —    | 3,02 | 1,43 | 2,46 | 1,67 | 3,49 | 2,48 | 2,48 | 3,93 | 1,44 | 3,19 |
| 1,9    | —        | —    | —    | —    | 2,38 | 1,48 | 1,53 | —    | —    | —    | 2,82 | 1,58 | 2,46 | 2,34 | 3,35 | 2,97 | 2,95 | 4,55 | 2,26 | 3,47 |
| 2      | —        | —    | —    | —    | 2,61 | —    | 1,32 | —    | —    | —    | 2,75 | 1,95 | 2,42 | 2,15 | 3,25 | 3,43 | 3,41 | 5,02 | 2,65 | 3,68 |
| 2,1    | —        | —    | —    | —    | 2    | —    | 1,36 | —    | —    | —    | 2,9  | 2,79 | 2,56 | 2,39 | 3,26 | 3,72 | 3,72 | 5,3  | 2,89 | 3,99 |
| 2,2    | —        | —    | —    | —    | 2,17 | —    | 2,06 | —    | —    | —    | 3,12 | 3,18 | 3,26 | 2,86 | 3,53 | 3,78 | 3,77 | 5,54 | 3    | 4,49 |

Tabela 4.4 (continuação): Valores de Leitura

| d (mm) | SP       |     |     |     | FL-1 |     |     |     | FR-1 |     |      |      | FL-3 |      |      |      | FR-3 |      |      |      |
|--------|----------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|        | CP1      | CP2 | CP3 | CP4 | CP1  | CP2 | CP3 | CP4 | CP1  | CP2 | CP3  | CP4  | CP1  | CP2  | CP3  | CP4  | CP1  | CP2  | CP3  | CP4  |
|        | QI (Kgf) |     |     |     |      |     |     |     |      |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 2,3    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | 3,21 | 3,12 | 4,15 | 3,5  | 4,26 | 3,69 | 3,7  | 5,76 | 3,17 | 5,17 |
| 2,4    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | 3,16 | ___  | 5,08 | 3,97 | 4,95 | 3,69 | 3,69 | 5,91 | 3,25 | 6,08 |
| 2,5    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | 3,12 | ___  | 5,84 | 4,23 | 5,35 | 2,73 | 3,75 | 5,94 | 3,16 | 6,93 |
| 2,6    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | 2,85 | ___  | 6,46 | 4,01 | 5,68 | 3,82 | 3,79 | 5,93 | ___  | 7,68 |
| 2,7    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | 2,65 | ___  | 6,82 | 2,82 | 5,77 | 4,23 | 4,25 | 5,9  | ___  | 8,23 |
| 2,8    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | 2,8  | ___  | 6,86 | 2,37 | 5,36 | 4,72 | 4,72 | 5,92 | ___  | 8,82 |
| 2,9    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | 3,09 | ___  | 6,69 | 2,03 | 4,95 | 5,16 | 5,16 | 5,93 | ___  | 9,18 |
| 3      | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | 3,38 | ___  | 6,19 | 1,85 | 4,61 | 5,35 | 5,34 | 5,94 | ___  | 9,35 |
| 3,1    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___  | ___  | 5,1  | 1,77 | 4,3  | 5,27 | 5,28 | 5,91 | ___  | 9,46 |
| 3,2    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___  | ___  | 4,68 | 1,73 | 3,99 | 5,03 | 5,03 | 5,88 | ___  | 9,28 |
| 3,3    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___  | ___  | 4,3  | ___  | 3,61 | 4,66 | 4,66 | 5,78 | ___  | 8,75 |
| 3,4    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___  | ___  | 4,08 | ___  | 3,48 | 3,52 | 3,57 | 5,65 | ___  | 8,07 |
| 3,5    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___  | ___  | 3,83 | ___  | 3,39 | 3,07 | 3,07 | 5,42 | ___  | 7,06 |
| 3,6    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___  | ___  | 3,66 | ___  | ___  | ___  | ___  | 5,11 | ___  | 5,99 |
| 3,7    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___  | ___  | 3,59 | ___  | ___  | ___  | ___  | 4,67 | ___  | 5,15 |
| 3,8    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___  | ___  | 3,53 | ___  | ___  | ___  | ___  | 4,23 | ___  | 4,26 |
| 3,9    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___  | ___  | 3,46 | ___  | ___  | ___  | ___  | 3,3  | ___  | 3,6  |
| 4      | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___  | ___  | 3,4  | ___  | ___  | ___  | ___  | 2,54 | ___  | 2,9  |
| 4,1    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___  | ___  | 3,38 | ___  | ___  | ___  | ___  | ___  | ___  | 2,53 |
| 4,2    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___  | ___  | 3,35 | ___  | ___  | ___  | ___  | ___  | ___  | 2,28 |
| 4,3    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___  | ___  | 3,27 | ___  | ___  | ___  | ___  | ___  | ___  | 2,07 |
| 4,4    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___  | ___  | 3,21 | ___  | ___  | ___  | ___  | ___  | ___  | 1,91 |
| 4,5    | ___      | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___ | ___ | ___  | ___ | ___  | ___  | 3,07 | ___  | ___  | ___  | ___  | ___  | ___  | 1,75 |

Os valores das cargas representados na Tabela 4.4 referem-se aos valores lidos ( $Q_l$ ). Esses valores foram então calibrados para representarem valores reais ( $Q_r$ ) em acordo com a Equação de calibração 4.1 .

$$Q_r = 475,8Q_l - 4,6351 \quad (4.1)$$

Com o carregamento real, deformação e propriedades geométricas, definiu-se a tensão (KPa) e deformação (%). Na Tabela 4.5 estão representados os resultados para solo puro.

Tabela 4.5: Tensão-Deformação para o solo puro

| d<br>[mm] | CP1            |             |                 | CP2            |             |                 | CP3            |             |                 | CP4            |             |                 |
|-----------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|
|           | Carga<br>[Kgf] | Def.<br>[%] | Tensão<br>[KPa] |
| 0         | 0,0            | 0,00%       | 0,00            | 0,0            | 0,00%       | 0,00            | 0,0            | 0,00%       | 0,00            | 0,0            | 0,00%       | 0,00            |
| 0,1       | 1,6            | 0,20%       | 0,99            | 2,3            | 0,20%       | 1,48            | 1,9            | 0,20%       | 1,18            | 1,2            | 0,20%       | 0,78            |
| 0,2       | 3,8            | 0,40%       | 2,29            | 4,0            | 0,40%       | 2,53            | 5,1            | 0,40%       | 3,28            | 3,3            | 0,40%       | 2,10            |
| 0,3       | 6,4            | 0,60%       | 3,88            | 6,6            | 0,59%       | 4,19            | 7,1            | 0,60%       | 4,52            | 6,1            | 0,60%       | 3,87            |
| 0,4       | 8,9            | 0,80%       | 5,39            | 9,1            | 0,79%       | 5,79            | 10,5           | 0,80%       | 6,70            | 8,6            | 0,80%       | 5,43            |
| 0,5       | 11,1           | 1,00%       | 6,75            | 11,5           | 0,99%       | 7,27            | 13,3           | 1,00%       | 8,49            | 11,1           | 1,00%       | 7,02            |
| 0,6       | 12,8           | 1,19%       | 7,83            | 12,4           | 1,19%       | 7,84            | 16,3           | 1,19%       | 10,37           | 13,5           | 1,19%       | 8,49            |
| 0,7       | 14,7           | 1,39%       | 8,96            | 15,2           | 1,39%       | 9,62            | 17,5           | 1,39%       | 11,16           | 17,3           | 1,39%       | 10,92           |
| 0,8       | 16,2           | 1,59%       | 9,85            | 16,8           | 1,58%       | 10,62           | 22,1           | 1,59%       | 14,07           | 17,1           | 1,59%       | 10,80           |
| 0,9       | 17,4           | 1,79%       | 10,61           | 18,3           | 1,78%       | 11,59           | 23,7           | 1,79%       | 15,13           | 18,8           | 1,79%       | 11,86           |
| 1         | 18,7           | 1,99%       | 11,39           | 19,6           | 1,98%       | 12,40           | 25,2           | 1,99%       | 16,04           | 19,7           | 1,99%       | 12,43           |
| 1,1       | 19,6           | 2,19%       | 11,94           | 17,6           | 2,18%       | 11,16           | 26,8           | 2,19%       | 17,07           | 21,5           | 2,19%       | 13,54           |
| 1,2       | 20,3           | 2,39%       | 12,38           | 6,4            | 2,38%       | 4,07            | 27,1           | 2,39%       | 17,28           | 22,3           | 2,39%       | 14,08           |
| 1,3       | 20,8           | 2,59%       | 12,69           | 0,9            | 2,57%       | 0,57            | 28,0           | 2,59%       | 17,86           | 12,0           | 2,59%       | 7,59            |
| 1,4       | 21,6           | 2,79%       | 13,13           | —              | —           | —               | 8,9            | 2,79%       | 5,67            | 3,2            | 2,79%       | 2,01            |
| 1,5       | 22,8           | 2,99%       | 13,88           | —              | —           | —               | 5,8            | 2,99%       | 3,67            | —              | —           | —               |
| 1,6       | 23,5           | 3,18%       | 14,32           | —              | —           | —               | 3,9            | 3,18%       | 2,46            | —              | —           | —               |
| 1,7       | 7,5            | 3,38%       | 4,55            | —              | —           | —               | —              | —           | —               | —              | —           | —               |
| 1,8       | 1,8            | 3,58%       | 1,07            | —              | —           | —               | —              | —           | —               | —              | —           | —               |

Na Tabela 4.6 estão representados os resultados de tensão-deformação para mistura com a fibra lisa de 1cm de comprimento. Os valores foram definidos de forma análoga ao solo puro.

Tabela 4.6: Tensão-Deformação, 0,4% de fibra lisa de 1cm

| d<br>[mm] | CP1            |             |                 | CP2            |             |                 | CP3            |             |                 | CP4            |             |                 |
|-----------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|
|           | Carga<br>[Kgf] | Def.<br>[%] | Tensão<br>[KPa] |
| 0         | 0,00           | 0,00%       | 0,00            | 0,00           | 0,00%       | 0,00            | 0,00           | 0,00%       | 0,00            | 0,00           | 0,00%       | 0,00            |
| 0,1       | 1,71           | 0,20%       | 1,07            | 4,14           | 0,20%       | 2,57            | 2,24           | 0,20%       | 1,40            | 1,95           | 0,20%       | 1,23            |
| 0,2       | 4,66           | 0,40%       | 2,91            | 5,24           | 0,40%       | 3,25            | 3,76           | 0,40%       | 2,34            | 3,86           | 0,40%       | 2,43            |
| 0,3       | 7,47           | 0,60%       | 4,66            | 7,76           | 0,60%       | 4,82            | 6,52           | 0,60%       | 4,06            | 8,14           | 0,60%       | 5,13            |
| 0,4       | 9,09           | 0,80%       | 5,67            | 9,99           | 0,80%       | 6,21            | 9,85           | 0,80%       | 6,14            | 11,42          | 0,80%       | 7,20            |
| 0,5       | 11,95          | 0,99%       | 7,45            | 12,28          | 1,00%       | 7,63            | 12,90          | 1,00%       | 8,04            | 14,66          | 0,99%       | 9,24            |
| 0,6       | 16,04          | 1,19%       | 10,00           | 14,23          | 1,19%       | 8,84            | 14,13          | 1,20%       | 8,81            | 18,27          | 1,19%       | 11,51           |
| 0,7       | 18,89          | 1,39%       | 11,78           | 16,04          | 1,39%       | 9,96            | 16,85          | 1,39%       | 10,50           | 21,94          | 1,39%       | 13,82           |
| 0,8       | 18,85          | 1,59%       | 11,75           | 17,85          | 1,59%       | 11,09           | 18,46          | 1,59%       | 11,51           | 24,89          | 1,59%       | 15,68           |
| 0,9       | 20,80          | 1,79%       | 12,97           | 19,23          | 1,79%       | 11,94           | 20,94          | 1,79%       | 13,05           | 24,94          | 1,79%       | 15,71           |
| 1         | 21,08          | 1,99%       | 13,15           | 20,65          | 1,99%       | 12,83           | 21,42          | 1,99%       | 13,35           | 26,79          | 1,99%       | 16,88           |
| 1,1       | 22,08          | 2,19%       | 13,77           | 22,03          | 2,19%       | 13,69           | 22,94          | 2,19%       | 14,30           | 28,32          | 2,19%       | 17,84           |
| 1,2       | 22,89          | 2,39%       | 14,28           | 24,13          | 2,39%       | 14,99           | 24,18          | 2,39%       | 15,07           | 29,46          | 2,39%       | 18,56           |
| 1,3       | 25,13          | 2,58%       | 15,67           | 26,08          | 2,59%       | 16,20           | 25,94          | 2,59%       | 16,17           | 29,79          | 2,58%       | 18,77           |
| 1,4       | 24,75          | 2,78%       | 15,43           | 16,42          | 2,79%       | 10,20           | 7,90           | 2,79%       | 4,93            | 19,89          | 2,78%       | 12,53           |
| 1,5       | 12,85          | 2,98%       | 8,01            | 12,33          | 2,99%       | 7,66            | 1,95           | 2,99%       | 1,22            | 12,18          | 2,98%       | 7,68            |
| 1,6       | 9,14           | 3,18%       | 5,70            | 7,04           | 3,18%       | 4,38            | 3,71           | 3,19%       | 2,31            | 10,28          | 3,18%       | 6,48            |
| 1,7       | 11,66          | 3,38%       | 7,27            | 4,95           | 3,38%       | 3,08            | 7,52           | 3,39%       | 4,69            | 13,09          | 3,38%       | 8,25            |
| 1,8       | 9,90           | 3,58%       | 6,17            | 6,66           | 3,58%       | 4,14            | 7,28           | 3,59%       | 4,54            | 9,95           | 3,58%       | 6,27            |
| 1,9       | 11,28          | 3,78%       | 7,03            | 7,00           | 3,78%       | 4,35            | 7,23           | 3,78%       | 4,51            | _____          | _____       | _____           |
| 2         | 12,37          | 3,98%       | 7,72            | _____          | _____       | _____           | 6,24           | 3,98%       | 3,89            | _____          | _____       | _____           |
| 2,1       | 9,47           | 4,17%       | 5,91            | _____          | _____       | _____           | 6,43           | 4,18%       | 4,01            | _____          | _____       | _____           |
| 2,2       | 10,28          | 4,37%       | 6,41            | _____          | _____       | _____           | 9,76           | 4,38%       | 6,08            | _____          | _____       | _____           |

Na Tabela 4.7 estão representados os resultados de tensão-deformação para mistura com a fibra perfilada de 1cm de comprimento. Os valores foram definidos de forma análoga ao solo puro.

Tabela 4.7: Tensão-Deformação, 0,4% de fibra perfilada de 1cm

| d<br>[mm] | CP1            |             |                 | CP2            |             |                 | CP3            |             |                 | CP4            |             |                 |
|-----------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|
|           | Carga<br>[Kgf] | Def.<br>[%] | Tensão<br>[KPa] |
| 0         | 0,00           | 0,00%       | 0,00            | 0,00           | 0,00%       | 0,00            | 0,00           | 0,00%       | 0,00            | 0              | 0,00%       | 0,00            |
| 0,1       | 2,95           | 0,20%       | 1,83            | 1,29           | 0,20%       | 0,80            | 1,38           | 0,20%       | 0,85            | 3,05           | 0,20%       | 1,86            |
| 0,2       | 6,62           | 0,40%       | 4,11            | 3,09           | 0,40%       | 1,92            | 3,19           | 0,39%       | 1,97            | 6,38           | 0,40%       | 3,90            |
| 0,3       | 9,76           | 0,60%       | 6,06            | 5,43           | 0,60%       | 3,37            | 5,38           | 0,59%       | 3,31            | 9,47           | 0,59%       | 5,78            |
| 0,4       | 12,09          | 0,79%       | 7,51            | 8,09           | 0,79%       | 5,02            | 7,57           | 0,79%       | 4,66            | 12,28          | 0,79%       | 7,50            |
| 0,5       | 14,71          | 0,99%       | 9,13            | 10,95          | 0,99%       | 6,80            | 9,99           | 0,99%       | 6,16            | 14,94          | 0,99%       | 9,13            |
| 0,6       | 16,99          | 1,19%       | 10,55           | 13,47          | 1,19%       | 8,36            | 12,33          | 1,18%       | 7,60            | 17,13          | 1,19%       | 10,46           |
| 0,7       | 20,13          | 1,39%       | 12,50           | 15,99          | 1,39%       | 9,93            | 14,37          | 1,38%       | 8,86            | 18,66          | 1,38%       | 11,39           |
| 0,8       | 20,84          | 1,59%       | 12,94           | 17,94          | 1,59%       | 11,14           | 16,32          | 1,58%       | 10,06           | 19,94          | 1,58%       | 12,18           |
| 0,9       | 22,94          | 1,79%       | 14,24           | 19,85          | 1,79%       | 12,32           | 18,18          | 1,78%       | 11,20           | 21,61          | 1,78%       | 13,20           |
| 1         | 14,28          | 1,98%       | 8,86            | 21,23          | 1,98%       | 13,18           | 19,80          | 1,97%       | 12,20           | 15,51          | 1,98%       | 9,48            |
| 1,1       | 6,47           | 2,18%       | 4,02            | 12,42          | 2,18%       | 7,71            | 21,56          | 2,17%       | 13,29           | 8,61           | 2,17%       | 5,26            |
| 1,2       | 4,71           | 2,38%       | 2,93            | 5,33           | 2,38%       | 3,31            | 23,03          | 2,37%       | 14,20           | 8,66           | 2,37%       | 5,29            |
| 1,3       | 7,28           | 2,58%       | 4,52            | _____          | _____       | _____           | 24,08          | 2,57%       | 14,84           | 10,52          | 2,57%       | 6,42            |
| 1,4       | 8,28           | 2,78%       | 5,14            | _____          | _____       | _____           | 14,13          | 2,76%       | 8,71            | 10,33          | 2,77%       | 6,31            |
| 1,5       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 10,57          | 2,96%       | 6,51            | 8,23           | 2,96%       | 5,03            |
| 1,6       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 10,71          | 3,16%       | 6,60            | 7,09           | 3,16%       | 4,33            |
| 1,7       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 13,42          | 3,36%       | 8,27            | 6,57           | 3,36%       | 4,01            |
| 1,8       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 14,32          | 3,55%       | 8,83            | 6,76           | 3,56%       | 4,13            |
| 1,9       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 13,37          | 3,75%       | 8,24            | 7,47           | 3,75%       | 4,56            |
| 2         | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 13,04          | 3,95%       | 8,04            | 9,23           | 3,95%       | 5,64            |
| 2,1       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 13,75          | 4,15%       | 8,48            | 13,23          | 4,15%       | 8,08            |
| 2,2       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 14,80          | 4,34%       | 9,12            | 15,09          | 4,35%       | 9,21            |
| 2,3       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 15,23          | 4,54%       | 9,39            | 14,80          | 4,55%       | 9,04            |
| 2,4       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 14,99          | 4,74%       | 9,24            | _____          | _____       | _____           |
| 2,5       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 14,80          | 4,94%       | 9,12            | _____          | _____       | _____           |
| 2,6       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 13,52          | 5,13%       | 8,33            | _____          | _____       | _____           |
| 2,7       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 12,56          | 5,33%       | 7,74            | _____          | _____       | _____           |
| 2,8       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 13,28          | 5,53%       | 8,18            | _____          | _____       | _____           |
| 2,9       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 14,66          | 5,73%       | 9,03            | _____          | _____       | _____           |
| 3         | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 16,04          | 5,92%       | 9,88            | _____          | _____       | _____           |

Na Tabela 4.8 estão representados os resultados de tensão-deformação para mistura com a fibra lisa de 3 cm de comprimento. Os valores foram definidos de forma análoga ao solo puro.

Tabela 4.8: Tensão-Deformação, 0,4% de fibra lisa de 3 cm

| d<br>[mm] | CP1            |             |                 | CP2            |             |                 | CP3            |             |                 | CP4            |             |                 |
|-----------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|
|           | Carga<br>[Kgf] | Def.<br>[%] | Tensão<br>[KPa] |
| 0         | 0,00           | 0,00%       | 0,00            | 0,00           | 0,00%       | 0,00            | 0,00           | 0,00%       | 0,00            | 0,00           | 0,00%       | 0,00            |
| 0,1       | 0,86           | 0,20%       | 0,53            | 1,10           | 0,20%       | 0,68            | 0,48           | 0,20%       | 0,30            | 2,14           | 0,20%       | 1,28            |
| 0,2       | 2,86           | 0,40%       | 1,77            | 2,43           | 0,40%       | 1,50            | 1,86           | 0,40%       | 1,15            | 4,47           | 0,39%       | 2,67            |
| 0,3       | 7,14           | 0,59%       | 4,43            | 4,86           | 0,59%       | 3,01            | 4,95           | 0,60%       | 3,07            | 7,57           | 0,59%       | 4,52            |
| 0,4       | 8,52           | 0,79%       | 5,28            | 7,42           | 0,79%       | 4,60            | 7,81           | 0,79%       | 4,83            | 10,47          | 0,79%       | 6,26            |
| 0,5       | 13,56          | 0,99%       | 8,41            | 10,18          | 0,99%       | 6,31            | 11,52          | 0,99%       | 7,13            | 13,42          | 0,99%       | 8,02            |
| 0,6       | 14,94          | 1,19%       | 9,27            | 12,42          | 1,19%       | 7,70            | 13,61          | 1,19%       | 8,43            | 15,94          | 1,18%       | 9,53            |
| 0,7       | 17,80          | 1,39%       | 11,04           | 14,75          | 1,39%       | 9,14            | 15,90          | 1,39%       | 9,84            | 18,42          | 1,38%       | 11,01           |
| 0,8       | 20,18          | 1,59%       | 12,52           | 16,89          | 1,58%       | 10,47           | 17,99          | 1,59%       | 11,14           | 20,61          | 1,58%       | 12,32           |
| 0,9       | 22,41          | 1,78%       | 13,90           | 18,51          | 1,78%       | 11,47           | 20,04          | 1,79%       | 12,41           | 22,70          | 1,78%       | 13,57           |
| 1         | 24,41          | 1,98%       | 15,14           | 20,04          | 1,98%       | 12,42           | 21,46          | 1,98%       | 13,29           | 24,41          | 1,97%       | 14,59           |
| 1,1       | 26,08          | 2,18%       | 16,18           | 21,56          | 2,18%       | 13,36           | 23,08          | 2,18%       | 14,30           | 25,17          | 2,17%       | 15,05           |
| 1,2       | 27,70          | 2,38%       | 17,18           | 22,51          | 2,38%       | 13,95           | 22,32          | 2,38%       | 13,82           | 11,04          | 2,37%       | 6,60            |
| 1,3       | 29,08          | 2,58%       | 18,04           | 13,75          | 2,57%       | 8,52            | 16,66          | 2,58%       | 10,32           | 7,04           | 2,56%       | 4,21            |
| 1,4       | 16,66          | 2,78%       | 10,33           | 4,81           | 2,77%       | 2,98            | 11,99          | 2,78%       | 7,43            | 8,85           | 2,76%       | 5,29            |
| 1,5       | 11,28          | 2,97%       | 7,00            | 2,71           | 2,97%       | 1,68            | 10,80          | 2,98%       | 6,69            | 9,38           | 2,96%       | 5,60            |
| 1,6       | 8,33           | 3,17%       | 5,17            | 3,19           | 3,17%       | 1,98            | 11,66          | 3,17%       | 7,22            | 9,38           | 3,16%       | 5,60            |
| 1,7       | 8,04           | 3,37%       | 4,99            | 5,28           | 3,37%       | 3,27            | 13,90          | 3,37%       | 8,61            | 10,18          | 3,35%       | 6,09            |
| 1,8       | 11,66          | 3,57%       | 7,23            | 7,90           | 3,56%       | 4,90            | 16,56          | 3,57%       | 10,26           | 11,76          | 3,55%       | 7,03            |
| 1,9       | 11,66          | 3,77%       | 7,23            | 11,09          | 3,76%       | 6,87            | 15,90          | 3,77%       | 9,84            | 14,09          | 3,75%       | 8,42            |
| 2         | 11,47          | 3,96%       | 7,11            | 10,18          | 3,96%       | 6,31            | 15,42          | 3,97%       | 9,55            | 16,28          | 3,94%       | 9,73            |
| 2,1       | 12,14          | 4,16%       | 7,53            | 11,33          | 4,16%       | 7,02            | 15,47          | 4,17%       | 9,58            | 17,66          | 4,14%       | 10,55           |
| 2,2       | 15,47          | 4,36%       | 9,59            | 13,56          | 4,36%       | 8,41            | 16,75          | 4,37%       | 10,38           | 17,94          | 4,34%       | 10,72           |
| 2,3       | 19,70          | 4,56%       | 12,22           | 16,61          | 4,55%       | 10,29           | 20,23          | 4,56%       | 12,53           | 17,51          | 4,54%       | 10,47           |
| 2,4       | 24,13          | 4,76%       | 14,97           | 18,85          | 4,75%       | 11,68           | 23,51          | 4,76%       | 14,56           | 17,51          | 4,73%       | 10,47           |
| 2,5       | 27,74          | 4,96%       | 17,21           | 20,08          | 4,95%       | 12,44           | 25,41          | 4,96%       | 15,74           | 12,94          | 4,93%       | 7,74            |
| 2,6       | 30,69          | 5,15%       | 19,04           | 19,04          | 5,15%       | 11,80           | 26,98          | 5,16%       | 16,71           | 18,13          | 5,13%       | 10,84           |
| 2,7       | 32,41          | 5,35%       | 20,10           | 13,37          | 5,35%       | 8,29            | 27,41          | 5,36%       | 16,98           | 20,08          | 5,33%       | 12,00           |
| 2,8       | 32,60          | 5,55%       | 20,22           | 11,23          | 5,54%       | 6,96            | 25,46          | 5,56%       | 15,77           | 22,41          | 5,52%       | 13,40           |

Tabela 4.8 (continuação): Tensão-Deformação, 0,4% de fibra lisa de 3 cm

| d<br>[mm] | CP1            |             |                 | CP2            |             |                 | CP3            |             |                 | CP4            |             |                 |
|-----------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|
|           | Carga<br>[Kgf] | Def.<br>[%] | Tensão<br>[KPa] |
| 2,9       | 31,79          | 5,75%       | 19,72           | 9,61           | 5,74%       | 5,96            | 23,51          | 5,75%       | 14,56           | 24,51          | 5,72%       | 14,65           |
| 3         | 29,41          | 5,95%       | 18,24           | 8,76           | 5,94%       | 5,43            | 21,89          | 5,95%       | 13,56           | 25,41          | 5,92%       | 15,19           |
| 3,1       | 24,22          | 6,14%       | 15,03           | 8,38           | 6,14%       | 5,19            | 20,42          | 6,15%       | 12,64           | 25,03          | 6,11%       | 14,96           |
| 3,2       | 22,22          | 6,34%       | 13,79           | 8,19           | 6,34%       | 5,07            | 18,94          | 6,35%       | 11,73           | 23,89          | 6,31%       | 14,28           |
| 3,3       | 20,42          | 6,54%       | 12,66           | —              | —           | —               | 17,13          | 6,55%       | 10,61           | 22,13          | 6,51%       | 13,23           |
| 3,4       | 19,37          | 6,74%       | 12,01           | —              | —           | —               | 16,51          | 6,75%       | 10,23           | 16,70          | 6,71%       | 9,99            |
| 3,5       | 18,18          | 6,94%       | 11,28           | —              | —           | —               | 16,09          | 6,94%       | 9,96            | 14,56          | 6,90%       | 8,71            |
| 3,6       | 17,37          | 7,14%       | 10,77           | —              | —           | —               | —              | —           | —               | —              | —           | —               |
| 3,7       | 17,04          | 7,33%       | 10,57           | —              | —           | —               | —              | —           | —               | —              | —           | —               |
| 3,8       | 16,75          | 7,53%       | 10,39           | —              | —           | —               | —              | —           | —               | —              | —           | —               |
| 3,9       | 16,42          | 7,73%       | 10,18           | —              | —           | —               | —              | —           | —               | —              | —           | —               |
| 4         | 16,13          | 7,93%       | 10,01           | —              | —           | —               | —              | —           | —               | —              | —           | —               |
| 4,1       | 16,04          | 8,13%       | 9,95            | —              | —           | —               | —              | —           | —               | —              | —           | —               |
| 4,2       | 15,90          | 8,33%       | 9,86            | —              | —           | —               | —              | —           | —               | —              | —           | —               |
| 4,3       | 15,51          | 8,52%       | 9,62            | —              | —           | —               | —              | —           | —               | —              | —           | —               |
| 4,4       | 15,23          | 8,72%       | 9,45            | —              | —           | —               | —              | —           | —               | —              | —           | —               |
| 4,5       | 14,56          | 8,92%       | 9,03            | —              | —           | —               | —              | —           | —               | —              | —           | —               |

Na Tabela 4.9 estão representados os resultados de tensão-deformação para mistura com a fibra perfilada de 3 cm de comprimento. Os valores foram definidos de forma análoga ao solo puro.

Tabela 4.9: Tensão-Deformação, 0,4% de fibra perfilada de 3 cm

| d<br>[mm] | CP1            |             |                 | CP2            |             |                 | CP3            |             |                 | CP4            |             |                 |
|-----------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|
|           | Carga<br>[Kgf] | Def.<br>[%] | Tensão<br>[KPa] |
| 0         | 0,00           | 0,00%       | 0,00            | 0,00           | 0,00%       | 0,00            | 0,00           | 0,00%       | 0,00            | 0,00           | 0,00%       | 0,00            |
| 0,1       | 1,33           | 0,20%       | 0,83            | 2,62           | 0,20%       | 1,61            | 1,14           | 0,20%       | 0,70            | 0,38           | 0,20%       | 0,23            |
| 0,2       | 4,47           | 0,40%       | 2,79            | 6,14           | 0,40%       | 3,78            | 3,81           | 0,40%       | 2,33            | 1,29           | 0,40%       | 0,78            |
| 0,3       | 7,42           | 0,60%       | 4,64            | 8,95           | 0,59%       | 5,50            | 6,85           | 0,60%       | 4,20            | 3,57           | 0,60%       | 2,18            |
| 0,4       | 10,66          | 0,80%       | 6,66            | 11,66          | 0,79%       | 7,17            | 9,95           | 0,80%       | 6,09            | 6,90           | 0,80%       | 4,21            |
| 0,5       | 13,56          | 1,00%       | 8,47            | 14,04          | 0,99%       | 8,63            | 12,61          | 1,00%       | 7,73            | 9,85           | 1,00%       | 6,01            |
| 0,6       | 15,94          | 1,20%       | 9,96            | 15,90          | 1,19%       | 9,78            | 15,18          | 1,20%       | 9,30            | 12,71          | 1,20%       | 7,75            |
| 0,7       | 18,56          | 1,40%       | 11,59           | 18,37          | 1,39%       | 11,30           | 17,32          | 1,39%       | 10,61           | 15,32          | 1,39%       | 9,34            |
| 0,8       | 20,51          | 1,60%       | 12,81           | 19,51          | 1,58%       | 12,00           | 19,13          | 1,59%       | 11,72           | 17,70          | 1,59%       | 10,79           |
| 0,9       | 22,32          | 1,80%       | 13,94           | 20,84          | 1,78%       | 12,82           | 20,89          | 1,79%       | 12,80           | 20,23          | 1,79%       | 12,33           |
| 1         | 24,51          | 2,00%       | 15,31           | 17,13          | 1,98%       | 10,54           | 22,61          | 1,99%       | 13,85           | 22,37          | 1,99%       | 13,64           |
| 1,1       | 25,56          | 2,20%       | 15,96           | 13,28          | 2,18%       | 8,17            | 23,75          | 2,19%       | 14,55           | 24,08          | 2,19%       | 14,68           |
| 1,2       | 12,80          | 2,40%       | 8,00            | 12,42          | 2,38%       | 7,64            | 25,22          | 2,39%       | 15,45           | 26,03          | 2,39%       | 15,87           |
| 1,3       | 7,04           | 2,59%       | 4,40            | 12,18          | 2,57%       | 7,49            | 26,17          | 2,59%       | 16,04           | 27,55          | 2,59%       | 16,80           |
| 1,4       | 8,85           | 2,79%       | 5,53            | 13,37          | 2,77%       | 8,23            | 26,70          | 2,79%       | 16,36           | 21,37          | 2,79%       | 13,03           |
| 1,5       | 9,38           | 2,99%       | 5,86            | 16,18          | 2,97%       | 9,95            | 11,14          | 2,99%       | 6,82            | 17,51          | 2,99%       | 10,68           |
| 1,6       | 9,42           | 3,19%       | 5,89            | 16,89          | 3,17%       | 10,39           | 5,71           | 3,19%       | 3,50            | 15,94          | 3,19%       | 9,72            |
| 1,7       | 10,28          | 3,39%       | 6,42            | 17,47          | 3,37%       | 10,74           | 4,14           | 3,39%       | 2,54            | 15,32          | 3,39%       | 9,34            |
| 1,8       | 11,76          | 3,59%       | 7,34            | 18,66          | 3,56%       | 11,47           | 6,81           | 3,59%       | 4,17            | 15,13          | 3,59%       | 9,23            |
| 1,9       | 13,99          | 3,79%       | 8,74            | 21,61          | 3,76%       | 13,29           | 10,71          | 3,78%       | 6,56            | 16,47          | 3,78%       | 10,04           |
| 2         | 16,18          | 3,99%       | 10,11           | 23,84          | 3,96%       | 14,66           | 12,56          | 3,98%       | 7,70            | 17,47          | 3,98%       | 10,65           |

Tabela 4.9 (continuação): Tensão-Deformação, 0,4% de fibra perfilada de 3 cm

| d<br>[mm] | CP1            | CP2         | CP3             | CP4            | CP1         | CP2             | CP3            | CP4         | CP1             | CP2            | CP3         | CP4             |
|-----------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|
|           | Carga<br>[Kgf] | Def.<br>[%] | Tensão<br>[KPa] |
| 2,1       | 17,66          | 4,19%       | 11,03           | 25,17          | 4,16%       | 15,48           | 13,71          | 4,18%       | 8,40            | 18,94          | 4,18%       | 11,55           |
| 2,2       | 17,89          | 4,39%       | 11,18           | 26,32          | 4,36%       | 16,19           | 14,23          | 4,38%       | 8,72            | 21,32          | 4,38%       | 13,00           |
| 2,3       | 17,56          | 4,59%       | 10,97           | 27,36          | 4,55%       | 16,83           | 15,04          | 4,58%       | 9,21            | 24,56          | 4,58%       | 14,97           |
| 2,4       | 17,51          | 4,79%       | 10,94           | 28,08          | 4,75%       | 17,27           | 15,42          | 4,78%       | 9,45            | 28,89          | 4,78%       | 17,61           |
| 2,5       | 17,80          | 4,99%       | 11,12           | 28,22          | 4,95%       | 17,36           | 14,99          | 4,98%       | 9,18            | 32,93          | 4,98%       | 20,08           |
| 2,6       | 17,99          | 5,19%       | 11,24           | 28,17          | 5,15%       | 17,33           | _____          | _____       | _____           | 36,50          | 5,18%       | 22,25           |
| 2,7       | 20,18          | 5,39%       | 12,60           | 28,03          | 5,35%       | 17,24           | _____          | _____       | _____           | 39,12          | 5,38%       | 23,85           |
| 2,8       | 22,41          | 5,59%       | 14,00           | 28,13          | 5,54%       | 17,30           | _____          | _____       | _____           | 41,93          | 5,58%       | 25,56           |
| 2,9       | 24,51          | 5,79%       | 15,31           | 28,17          | 5,74%       | 17,33           | _____          | _____       | _____           | 43,64          | 5,78%       | 26,60           |
| 3         | 25,37          | 5,99%       | 15,84           | 28,22          | 5,94%       | 17,36           | _____          | _____       | _____           | 44,45          | 5,98%       | 27,10           |
| 3,1       | 25,08          | 6,19%       | 15,67           | 28,08          | 6,14%       | 17,27           | _____          | _____       | _____           | 44,97          | 6,18%       | 27,42           |
| 3,2       | 23,89          | 6,39%       | 14,92           | 27,93          | 6,34%       | 17,18           | _____          | _____       | _____           | 44,11          | 6,37%       | 26,89           |
| 3,3       | 22,13          | 6,59%       | 13,82           | 27,46          | 6,53%       | 16,89           | _____          | _____       | _____           | 41,59          | 6,57%       | 25,36           |
| 3,4       | 16,94          | 6,79%       | 10,58           | 26,84          | 6,73%       | 16,51           | _____          | _____       | _____           | 38,36          | 6,77%       | 23,38           |
| 3,5       | 14,56          | 6,99%       | 9,10            | 25,75          | 6,93%       | 15,84           | _____          | _____       | _____           | 33,55          | 6,97%       | 20,45           |
| 3,6       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 28,46          | 7,17%       | 17,35           |
| 3,7       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 24,46          | 7,37%       | 14,91           |
| 3,8       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 20,23          | 7,57%       | 12,33           |
| 3,9       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 17,08          | 7,77%       | 10,42           |
| 4         | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 13,75          | 7,97%       | 8,38            |
| 4,1       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 11,99          | 8,17%       | 7,31            |
| 4,2       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 10,80          | 8,37%       | 6,59            |
| 4,3       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 9,80           | 8,57%       | 5,98            |
| 4,4       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 9,04           | 8,76%       | 5,51            |
| 4,5       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 8,28           | 8,96%       | 5,05            |
| 4,6       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 7,47           | 9,16%       | 4,56            |
| 4,7       | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | _____          | _____       | _____           | 6,85           | 9,36%       | 4,18            |

### 4.2.3 ANÁLISE DOS DADOS

A primeira etapa da análise consiste em produzir gráficos de tensão-deformação para cada grupo de mistura. Os gráficos representados nas Figuras de 4.6 a 4.13.

Figura 4.6: Diagrama tensão-deformação para solo puro (SP)

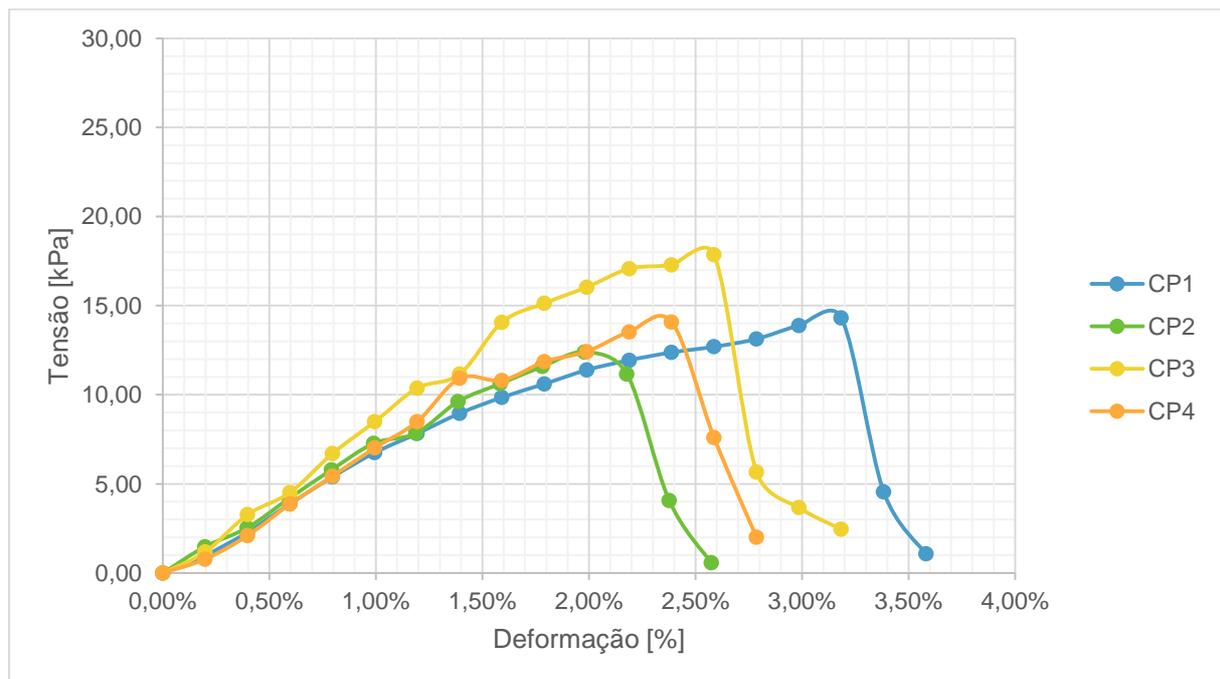


Figura 4.7: Diagrama tensão-deformação para 0,4% de fibra lisa de 1cm (FL-1)

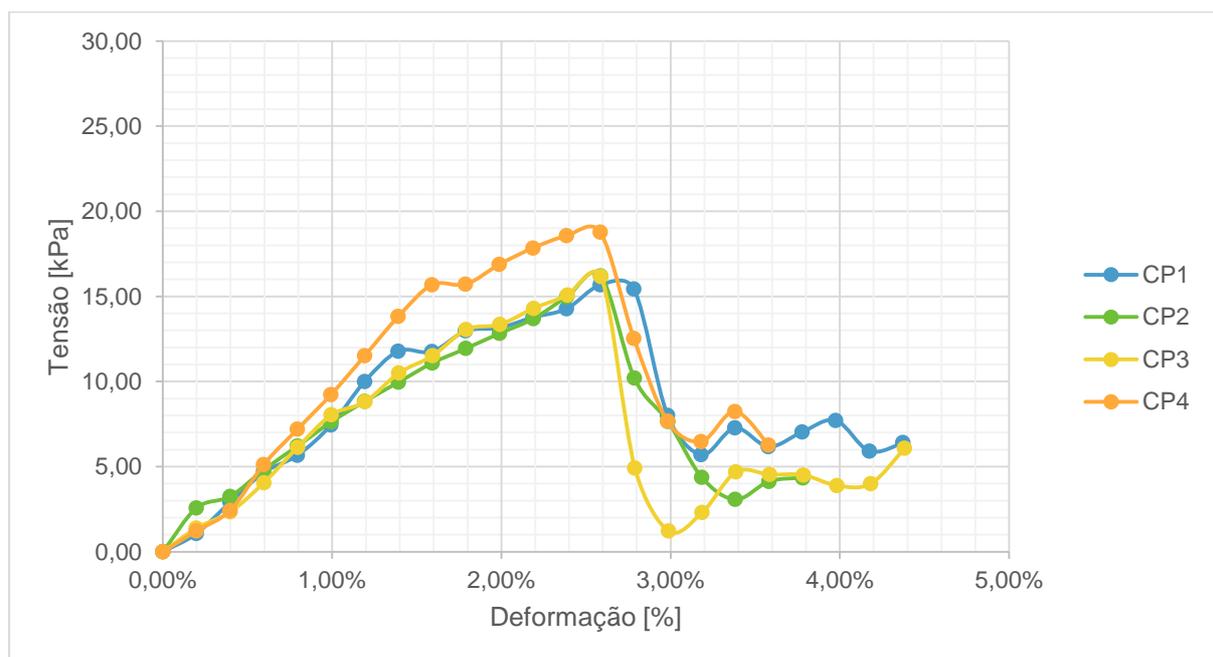


Figura 4.8: Diagrama tensão-deformação para 0,4% de fibra perfilada de 1cm (FR-1)

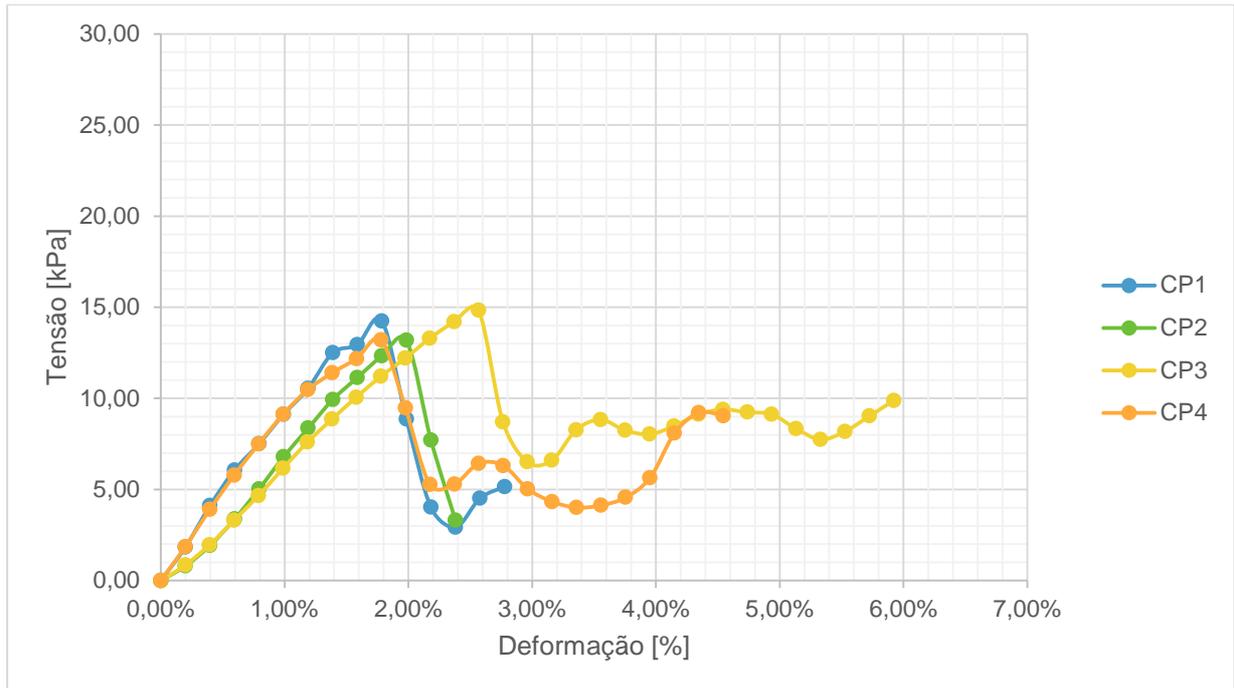


Figura 4.9: Diagrama tensão-deformação para 0,4% de fibra lisa de 3cm (FL-3)

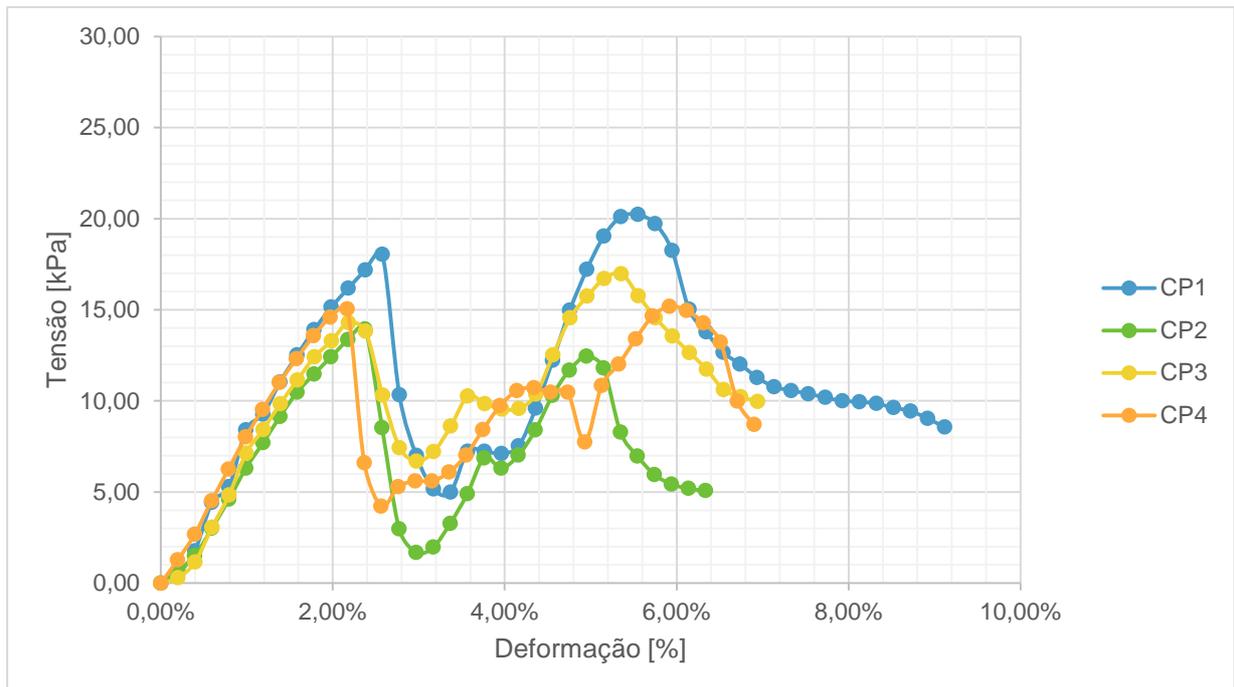


Figura 4.10: Diagrama tensão-deformação para 0,4% de fibra lisa de 3 cm (FR-3)

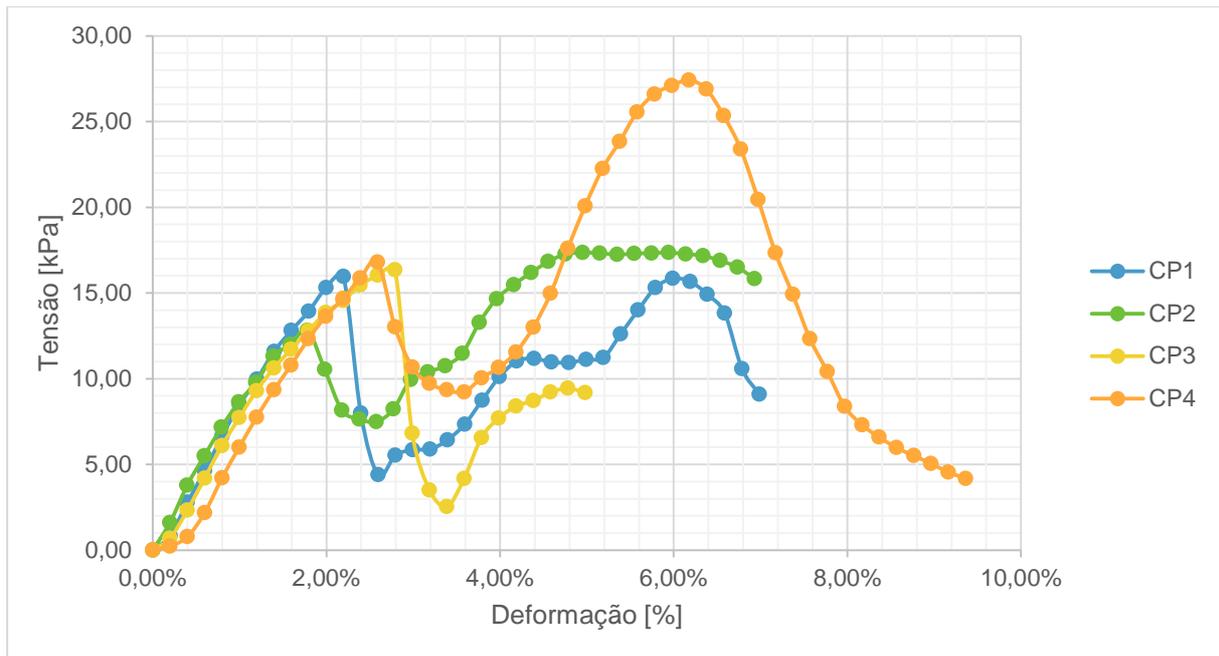


Figura 4.11: Diagrama tensão-deformação para todos os corpos de cada categoria

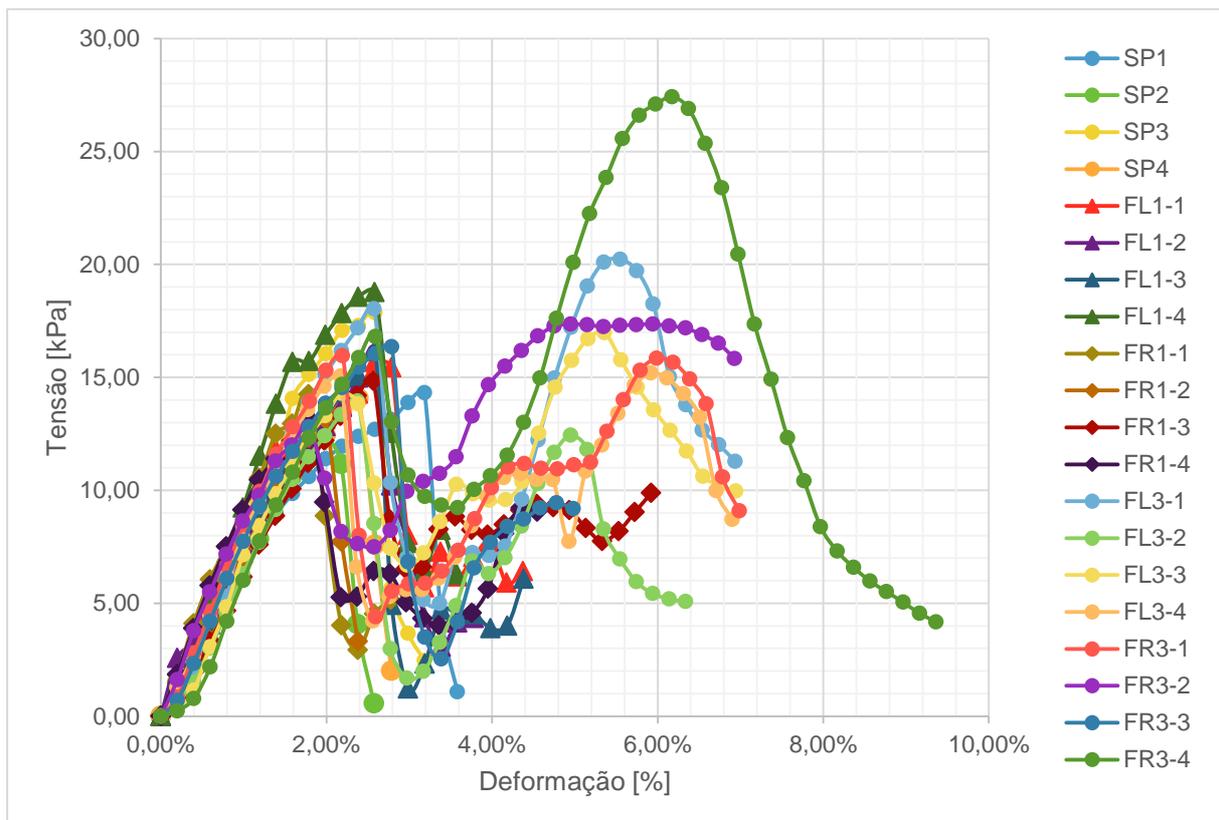


Figura 4.12: Diagrama tensão-deformação para a média dos corpos de cada categoria

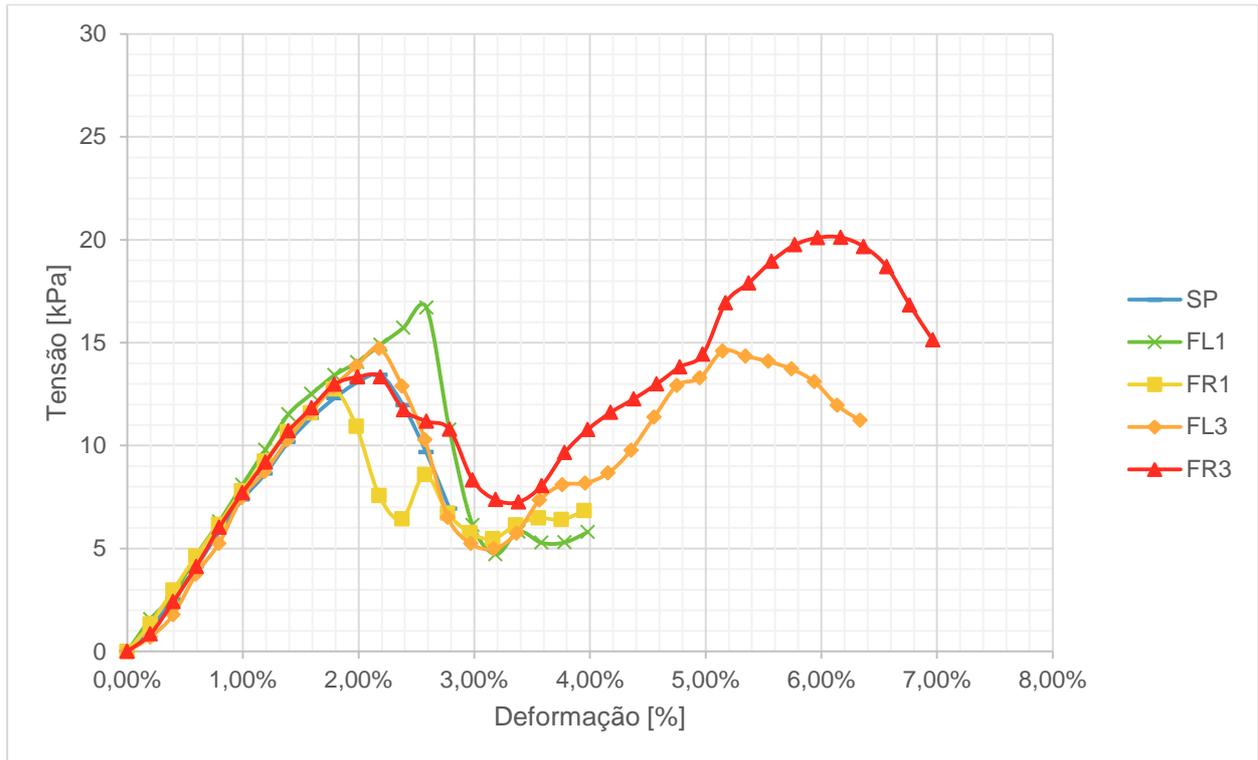
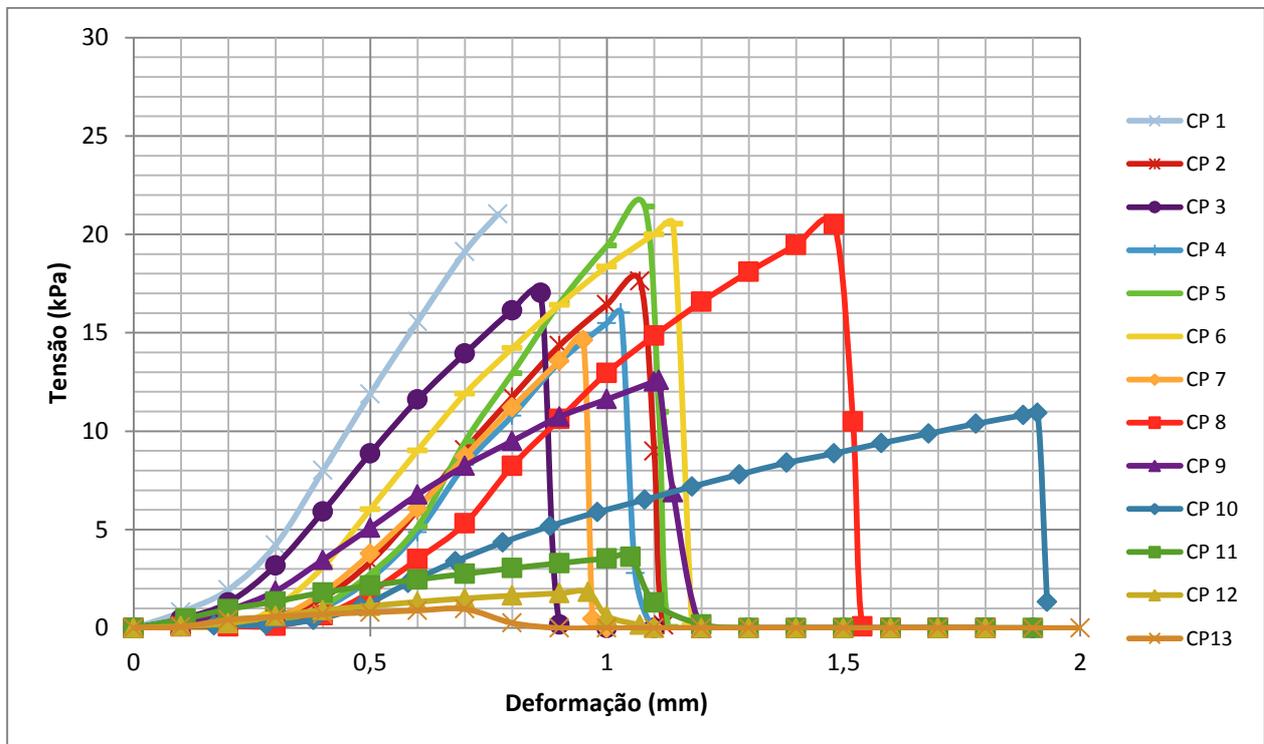


Figura 4.13: Diagrama tensão-deformação para solo puro com umidade variável



Após averiguar o perfil dos diferentes diagramas para os grupos de misturas, optou-se por adotar uma nomenclatura que identificaria de forma sucinta pontos importantes dentro do gráfico e como os mesmos seriam associados aos valores representados.

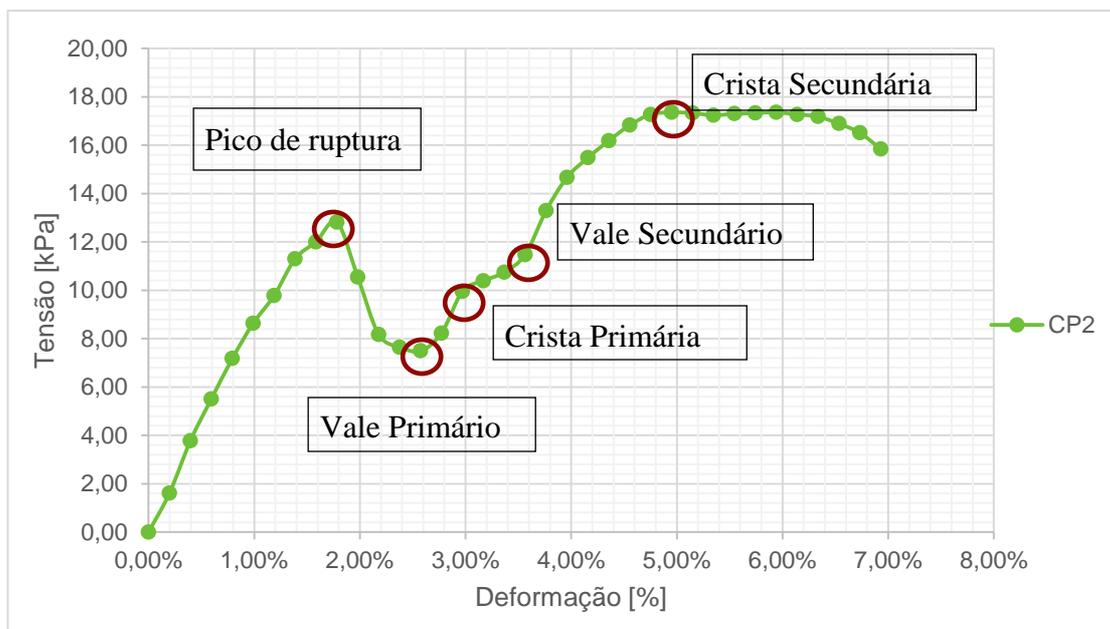
Os pontos foram denominados como:

1. Pico de ruptura do solo: tensão máxima atingida pelo solo ou pela mistura, ponto onde ocorre a ruptura do solo;
2. Vale primário: tensão mínima para que a fibra comece a atuar, primeiro ponto de inflexão da curva pós-ruptura do solo;
3. Crista primária: segundo ponto de inflexão pós-ruptura do solo;
4. Vale secundário: terceiro ponto de inflexão pós-ruptura do solo;
5. Crista Secundária: tensão máxima atingida pela fibra.

Supôs-se que esses picos e vales não poderiam ser resultados de uma variação natural dos corpos de prova dentro da margem de erro. No entanto, como o fenômeno quase-ondulatório na região pós-ruptura é visível em todas misturas com diferentes graus de intensidade, com fibras longas, curtas, perfiladas ou lisas, optou-se por manter essa nomenclatura, pela facilidade de referência.

Os termos descritos estão exemplificados na Figura 4.14.

Figura 4.14: Identificação dos pontos de interesse adotados pela nomenclatura



A partir dos gráficos pode-se visualizar que o solo puro teve o comportamento esperado para o mesmo, com uma faixa inicial comportando de forma linear, em um comportamento aparentemente elástico. Mas assim que o mesmo atinge o pico de resistência a queda é abrupta, sem um patamar de plastificação.

Em todos os corpos de prova em que havia fibras apareceu uma resistência secundária, onde a fibra começava atuar. Na região pós-ruptura, todos os corpos que tinham fibras apresentaram patamares plásticos.

A melhora de resistência do solo em si é marginal, na melhor das situações, sofrendo um aumento mínimo. Para se avaliar de forma mais conservadora os resultados, tirou-se uma média das três menores resistências de ruptura de solo de cada grupo. Essa solução foi usada para remover um potencial valor exagerado. As médias de cada grupo, solo puro e diferentes fibras foram comparadas com a base de solo puro. Representados na Tabela 4.10 estão o valor da média descrita anteriormente (m) e a variação (v) de cada grupo em relação à média do solo puro.

Tabela 4.10: Aumento da resistência de ruptura do solo (solo)

|         | SP    | FL-1  | FR-1  | FL-3  | FR-3   |
|---------|-------|-------|-------|-------|--------|
| m [Kpa] | 14,66 | 16,70 | 13,86 | 15,47 | 15,958 |
| v [%]   | 0,0%  | 13,9% | -5,4% | 5,5%  | 8,7%   |

Durante a execução do ensaio para a mistura com fibra lisa de 1cm de comprimento e solo puro, a fonte de alimentação da prensa começou a oscilar sensivelmente, a ponto da prensa operar em períodos interrompidos, alternando entre ligada, operando e desligada. Como resultado, pode-se visualizar que na faixa elástica, ou linear do diagrama de tensão deformação dessa fibra existem vários pequenos picos de resistência que surgiam sempre a prensa hidráulica voltava a funcionar.

Na Tabela 4.10 estão representados numericamente os resultados nos quais se baseiam a análise dos parágrafos prévios. Como descrito anteriormente, a adição de fibras mais longas (3cm) melhorou marginalmente os resultados da resistência de ruptura do solo em si, com a fibra perfilada sendo um pouco melhor. A fibra lisa de um centímetro gerou os melhores resultados mas como descrito anteriormente, as condições do ensaio da mesma não foram ótimas, podendo alterar o resultado. Em conclusão, a melhora das propriedades mecânicas do solo por adição de fibra não se dá por meio de um aumento na tensão de ruptura do solo em si.

A influência do material compósito seguiu o comportamento interessante as fibras maiores ofereceram resultados melhores em relação à resistência do material compósito em relação às fibras menores.

Mantida a mesma geometria lateral e comparando apenas a partir do comprimento, as fibras mais longas demonstraram cristas mais largas, maiores valores de resistência última. Isso, em acordo com o modelo é devido à melhor ancoragem que surge naturalmente quando a fibra mais longa se encontra espacialmente na matriz de solo, como ilustrados nas Figuras 4.15 e 4.16.

Figura 4.15: Médias das fibras lisas de 1 e 3cm

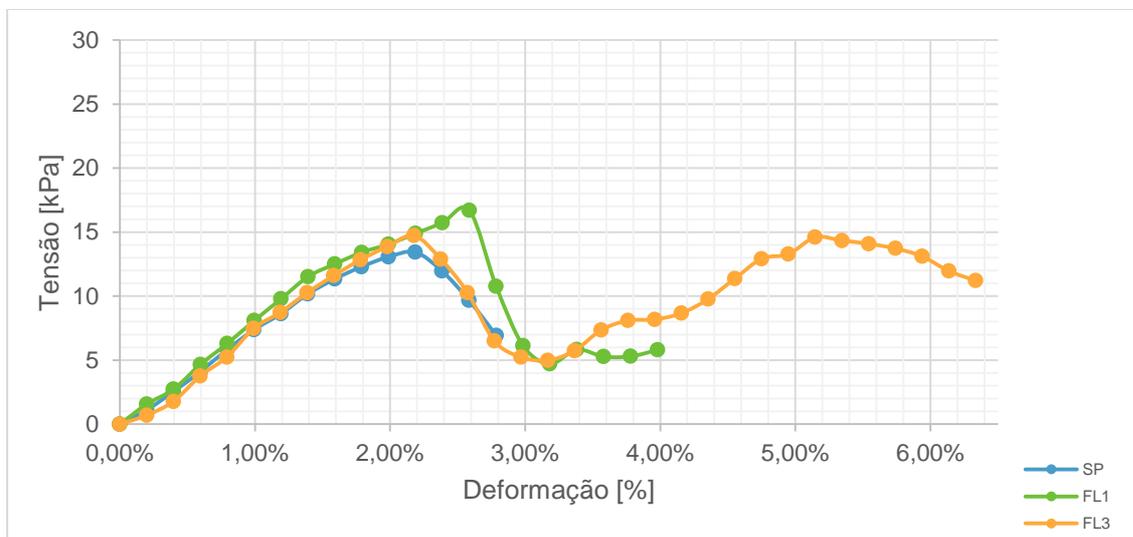
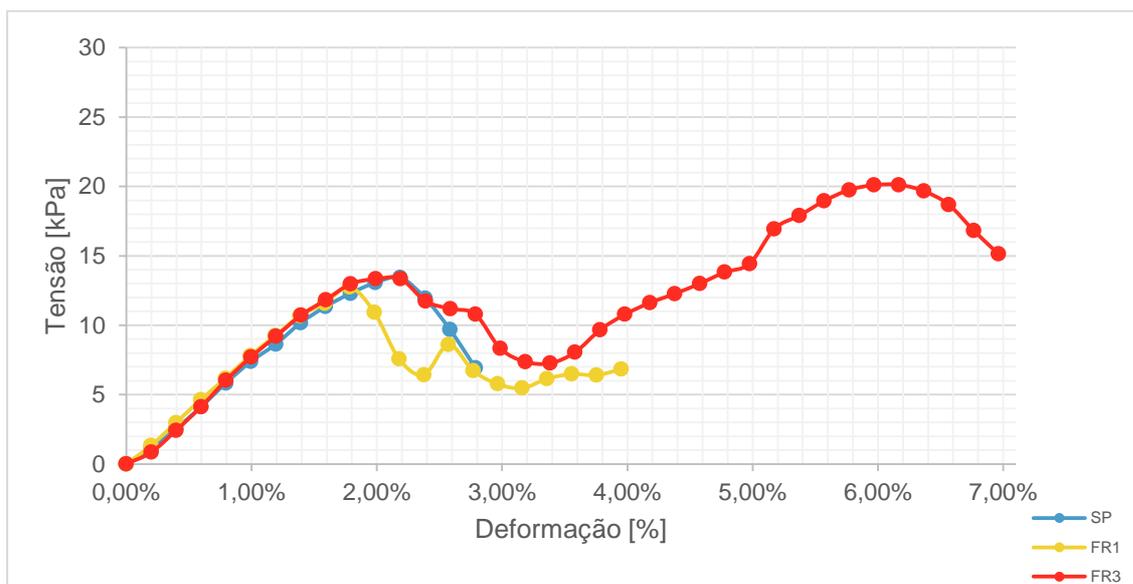


Figura 4.16: Médias das fibras perfiladas de 1 e 3cm



Um outro ponto importante que não é tão visível quando os valores das médias são analisadas é o fato dos corpos que tinham fibras de menor comprimento (1cm) apresentaram um número maior de vales e cristas na região pós-ruptura do solo.

O surgimento de uma crista na região de plastificação é um evento comum a materiais poliméricos como o polietileno e está associado com o efeito do alongamento, que modifica a seção (DIAS, 2011). Esse fenômeno está representado na Figura 4.17.

Figura 4.17: Diagrama de tensão-deformação de um polímero

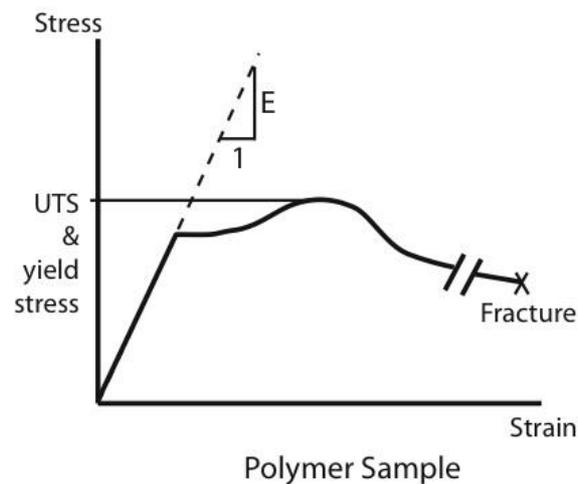


Imagem adaptada de: [<https://alliance.seas.upenn.edu/~medesign/wiki/index.php/Courses/MEAM247-11C-P2P1-background>, acessado 05/02/2015]

Mas essas são cristas individuais e não uma série alternada como pode ser visto nos gráficos de tensão-deformação do solo. Uma solução proposta para essa situação é que o conjunto de todas as fibras dispostas espacialmente não trabalham de forma homogênea. Dessa forma uma tensão inicial seria distribuída primariamente a uma fibra ou a um grupo menor de fibras. Assim que atingido a um certo valor, as mesmas iriam escoar e a tensão seria redistribuída a outras fibras.

Essa hipótese de fibras em estados de tensão diferentes também explicaria a maior frequência de vales e cristas na mistura de fibras de 1cm. Como as fibras de 1 cm são mais curtas a deformação absoluta que cada uma é menor a redistribuição é mais frequente. Como a ancoragem das fibras é menor, e seu arrancamento é mais fácil, também explicando dessa forma a menor amplitude das cristas em comparação com as fibras de 3cm.

No entanto, para se obter confirmação dessa hipótese, seriam necessárias mais medidas para comprovar a natureza ondulatória na região pós ruptura e vários testes com célula de carga distribuídos em corpos de prova para analisar a distribuição de tensão.

Para melhor analisar a influência da geometria lateral das fibras, optou-se por representar os resultados de pontos importantes em uma tabela-resumo com os valores de interesse para as diferentes misturas. Na Tabela 4.11 estão representadas as tensões de ruptura do solo, ou pico de ruptura, identificado como Pr, os vales ( $V_i$ ) e as cristas ( $C_i$ ), onde o índice ‘i’ representa o número da mesma, em ordem crescente na região pós-ruptura do solo.

Tabela 4.11: Pontos de interesse para as diferentes misturas

| Categoria | ID    | Pr [KPa] | $V_1$ [KPa] | $C_1$ [KPa] | $V_2$ [KPa] | $C_2$ [KPa] | $R_{\text{último}}$ [KPa] |
|-----------|-------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|
| SP        | CP1   | 14,32    | _____       | _____       | _____       | _____       | 14,32                     |
|           | CP2   | 12,40    | _____       | _____       | _____       | _____       | 12,40                     |
|           | CP3   | 17,86    | _____       | _____       | _____       | _____       | 17,86                     |
|           | CP4   | 14,08    | _____       | _____       | _____       | _____       | 14,08                     |
|           | Média | 14,67    | _____       | _____       | _____       | _____       | 14,67                     |
| FL-1      | CP1   | 15,67    | 5,70        | 7,27        | 6,17        | 7,72        | 15,67                     |
|           | CP2   | 16,20    | 3,08        | 4,35        | _____       | _____       | 16,20                     |
|           | CP3   | 16,70    | 1,22        | 4,69        | 3,89        | 6,08        | 16,70                     |
|           | CP4   | 18,77    | 6,48        | 8,25        | 6,27        | _____       | 18,77                     |
|           | Média | 16,84    | 4,12        | 6,14        | 5,44        | 6,90        | 16,84                     |
| FR-1      | CP1   | 14,24    | 2,93        | 5,14        | _____       | _____       | 14,24                     |
|           | CP2   | 13,18    | 3,31        | _____       | _____       | _____       | 13,18                     |
|           | CP3   | 14,84    | 6,51        | 9,39        | 8,33        | 9,88        | 14,84                     |
|           | CP4   | 13,20    | 5,26        | 6,31        | 4,01        | 9,04        | 13,20                     |
|           | Média | 13,87    | 4,50        | 6,95        | 6,17        | 9,46        | 13,87                     |
| FL-3      | CP1   | 18,04    | 4,99        | 7,23        | 7,11        | 20,22       | 20,22                     |
|           | CP2   | 13,95    | 1,68        | 6,87        | 6,31        | 12,44       | 13,95                     |
|           | CP3   | 14,84    | 6,69        | 10,26       | 9,55        | 16,98       | 16,98                     |
|           | CP4   | 15,05    | 4,21        | 10,47       | 7,74        | 15,19       | 15,19                     |
|           | Média | 15,47    | 4,39        | 8,71        | 7,68        | 16,21       | 16,59                     |
| FR-3      | CP1   | 15,96    | 4,40        | 11,18       | 10,94       | 15,84       | 15,96                     |
|           | CP2   | 14,66    | 7,49        | 17,36       | _____       | _____       | 17,36                     |
|           | CP3   | 16,36    | 3,50        | 9,45        | _____       | _____       | 16,36                     |
|           | CP4   | 16,80    | 9,34        | 27,10       | _____       | _____       | 27,10                     |
|           | Média | 15,95    | 6,18        | 16,27       | 9,18        | 15,84       | 19,20                     |

Se mantido o mesmo comprimento, mas modificada a geometria lateral, há um alargamento das cristas. Também há um efeito de mudança da primeira inflexão pós-ruptura ou do vale primário. Nas fibras perfiladas, houve um aumento da tensão na qual as fibras começam a trabalhar, ponto identificado como  $V_1$ , ou primeiro vale.

A partir do primeiro vale, as misturas que contém parcelas de fibras tem uma região nova, com características próprias. Para avaliar quanto foi a diferença nos pontos de interesse entre as fibras de mesmo comprimento mas diferentes geometrias laterais, produziu-se uma tabela comparado as mesmas.

Na Tabela 4.12 estão descritos os valores médios dos pontos de interesse, também há uma comparação entre os valores obtidos pelas misturas com fibras perfiladas em comparação com os valores obtidos pela dosagem com fibras lisas.  $V_{FR1-FL1}$ , refere-se ao comparativo entre as fibras perfiladas de 1cm e as lisas de mesmo comprimento,  $V_{FR3-FL3}$  é a mesma comparação, mas com as fibras de 3cm.

Tabela 4.12: Valores comparados entre as fibras

| Categoria         | ID    | Pr [KPa] | V1 [KPa] | C1 [KPa] | V2 [KPa] | C2 [KPa] | R último [KPa] |
|-------------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------|
| FL-1              | Média | 16,84    | 4,12     | 6,14     | 5,44     | 6,90     | 16,84          |
| FR-1              | Média | 13,87    | 4,50     | 6,95     | 6,17     | 9,46     | 13,87          |
| $V_{FR1-FL1}$ [%] |       | -17,64%  | 9,28%    | 13,14%   | 13,35%   | 37,10%   | -17,64%        |
| FL-3              | Média | 15,47    | 4,39     | 8,71     | 7,68     | 16,21    | 16,59          |
| FR-3              | Média | 15,945   | 6,1825   | 16,2725  | 10,94    | 15,84    | 19,195         |
| $V_{FR3-FL3}$ [%] |       | 3,07%    | 40,75%   | 86,88%   | 19,7%    | -2,27%   | 15,74%         |

Para as fibras de 3 cm de comprimento aumento do valor do primeiro vale é de 40,75%, e nas fibras de 1cm, a mudança entre os pontos é de 9,28% a mais para a fibra perfilada.

Após o solo fissurar, sua resistência cai até um certo ponto onde a fibra começa a atuar. Para as fibras perfiladas, o solo fissurado teve que perder menos resistência até que a fibra começasse a trabalhar. Isso, supõe-se que seja devido à melhor ancoragem e superfície mais aderente da fibra perfilada.

Na crista primária, a fibra de 3cm, perfilada teve uma diferença de 86,88% a mais que a fibra lisa, e a fibra de 1cm foi 13,14% melhor que sua contrapartida lisa. Em termos de crista primária, a fibra perfilada demonstrou resultados superiores em termos de resistência em ambos os casos

Os vales secundários tanto para as misturas com fibras de 3 cm quanto para a fibra de 1 cm perfiladas foram superiores à sua parcela lisa, por uma margem de 19,7% e 37,10%, respectivamente. Os vales secundários, nessa situação estão associados à uma diminuição da

resistência da fibra, e nessa situação, a mudança da geometria lateral foi positiva, diminuindo a perda de resistência do material, majoritariamente na fibra de menor comprimento.

Assumindo que a resistência última de um material, nesse caso, compósito, seja o máximo valor antes do mesmo romper-se por completo pode-se reparar que nas fibras de 1cm de comprimento não houve uma melhora sensível na resistência última. Isso deve-se primariamente porque em quase todas as misturas com fibras de 1 cm, as cristas na região de pós-ruptura não atingiram valores maiores ou iguais ao valor de pico de ruptura do solo. E nessa situação, a adição de fibras é primariamente para gerar uma região plástica após a ruptura do solo, permitindo maiores deformações, mas não aumentando a resistência última.

Já nos corpos de prova em que havia a fibra de 3 cm, houve uma melhora razoável da resistência última, pois a fibra mais longa e melhor ancorada pode resistir de forma mais eficiente às tensões.

## **4.3 SIMULADOS ATMOSFÉRICO**

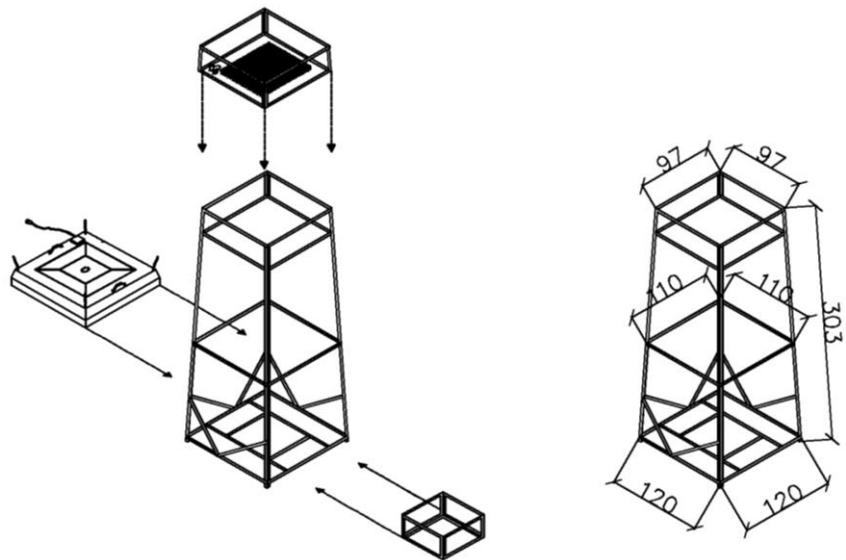
### **4.3.1 DESCRIÇÃO**

O simulador atmosférico é um sistema criado de forma a simular em laboratório uma série de ciclos de exposição e chuva, de forma análoga ao que aconteceria na natureza. Em linhas gerais, os elementos do simulador são:

1. Grid ou esqueleto
2. Simulador de insolação
3. Simulador de chuvas
4. Caixa de solo

O grid é composto por uma grelha metálica tridimensional onde os outros elementos são alternados em acordo com a etapa do ciclo. A disposição dos elementos dentro do grid está representada na Figura 4.18.

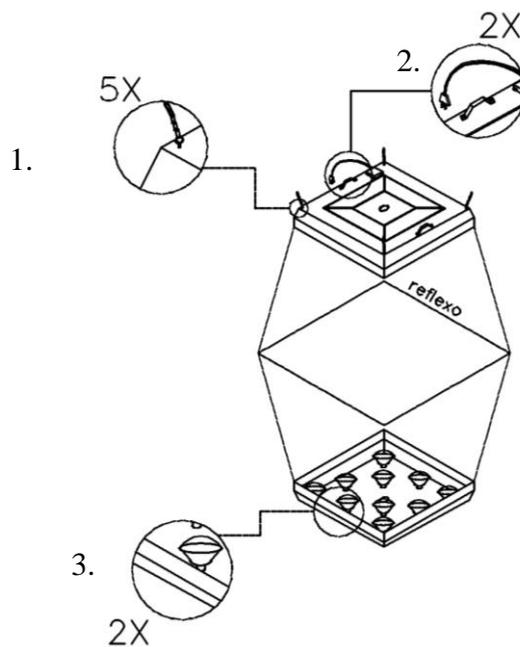
Figura 4.18: Simulador atmosféricos com elementos individualizados



Fonte: Santos e Silva, 2014.

O simulador de insolação é composto por uma peça metálica onde estão dispostas várias lâmpadas de alta potência de forma a simular com boa aproximação o processo de secagem. Nessa peça está especificamente a região onde a câmera é disposta de forma a capturar as imagens usadas na análise da fissuração. As lâmpadas dispostas são ligadas em um circuito conectado a um timer, regulando o período de tempo em que a luz fica ligada e desligada. O simulador de insolação pode ser visualizado de forma mais detalhada na Figura 4.19.

Figura 4.19: Simulador de Insolação



Fonte: Santos e Silva, 2014.

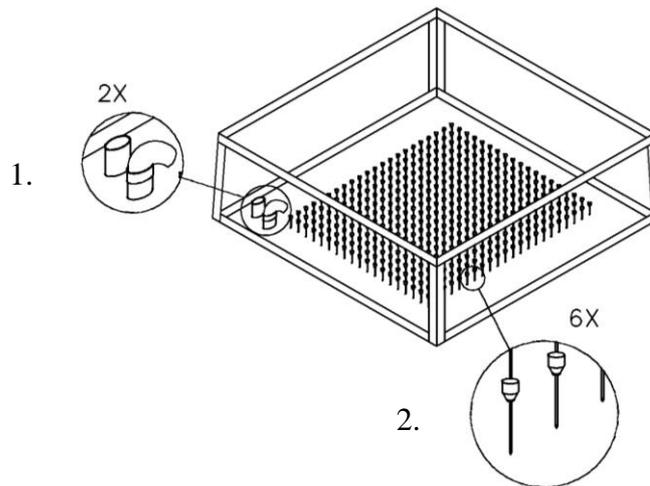
O detalhe número 1. Representa o sistema de correntes que permite que o simulador de insolação tenha uma altura variável dependendo da condição necessário. As correntes estão demarcadas em pontos específicos ao longo do seu comprimento e fixada em cada canto do simulador de forma a permitir uma disposição nivelada da mesma.

No detalhe número 3 do simulador estão representadas as lâmpadas de potência de filamento. O circuito de alimentação das mesmas é disposto do lado superior da caixa de alumínio onde as mesmas ficam.

O circuito é vinculado a uma chave com fusível de onde sai a sua conexão com a fonte de energia e o timer. Essa parte pode ser visualizada no detalhe número 2. No furo central permanece fixada a câmera tirando fotos a intervalos regulares da formação de fissuras.

O simulador de chuva é composto de uma caixa de acrílico presa a um frame de alumínio. Na parte inferior está uma matriz de múltiplas agulhas hipodérmicas que simulam, a precipitação de chuvas. O desenho detalhado da caixa e seus elementos está representado na Figura 4.20.

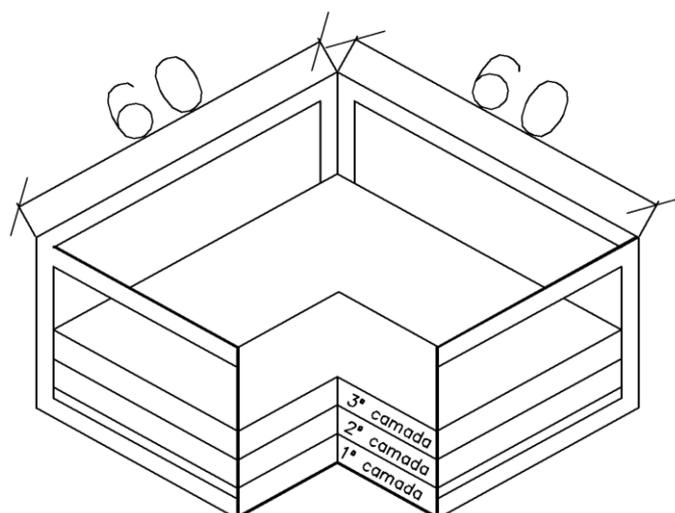
Figura 4.20: Simulador de chuvas



Fonte: Santos e Silva, 2014.

No detalhe 1 estão representados o conduto de bombeamento ou entrada de água na caixa de acrílico e o ladrão, ou controlador de nível. No detalhe 2 estão representadas as agulhas hipodérmicas que são fixadas à base de acrílico, responsáveis pelo gotejamento da água. A última parte integrante do simulador atmosférico é a caixa de amostra, onde é disposto o solo. A caixa tem dimensões de 60cmx60cm e profundidade de 30cm, na qual geralmente são feitas 3 camadas de 5 cm de solo compactado.

Figura 4.21: Caixa de amostra



Fonte: Santos e Silva, 2014.

A primeira etapa do ensaio de ressecamento é a preparação do solo para ser usado na caixa. O solo é previamente destorroado pelo processo descrito na NBR 6457:1986, e tem sua umidade medida. Dotado da umidade natural do solo, calcula-se a quantidade de água necessária para atingir a umidade ótima (30,8%) em cada uma das parcelas do solo usado.

Mistura-se então o solo destorroado com água em sacos que variavam de cujo volume comportava de 9 a 12 kg de solo individualmente. O solo já misturado com a água necessária e a fibra e ensacado é movido para a câmara úmida para que a umidade possa ser homogeneizada ao longo de toda a amostra.

Após ter sido deixado por um período de 24h a câmara úmida, o solo está pronto para a compactação na caixa, ilustrada na Figura 4.21. A massa de solo necessária para se produzir a primeira camada na caixa é disposta e compactada manualmente até que se atinja a espessura desejada de 5 cm. A segunda e a terceira camada são feitas pela mesma metodologia.

Com o solo já compactado, inicia-se o ciclo de secagem, no qual por um período fixo de tempo a amostra na sua umidade ótima inicial é exposta a um período de insolação no qual perde água.

Finalizada a primeira secagem ou insolação, simula-se uma chuva, com intensidade constante por uma hora, ou até que se forme uma lâmina d'água de 2 cm sobre a terceira camada de solo. Por um período de tempo a lâmpada permanece desligada pra que a água seja absorvida e então liga-se de novo a lâmpada para mais um ciclo de secagem.

### 4.3.2 DADOS OBTIDOS

Na situação verificada no laboratório, misturou-se o solo com 0,4% em massa de fibra perfilada de 3 cm e usou o mesmo na caixa. Durante os ciclos de molhagem e secagem fora tiradas fotos e a massa foi constantemente medida.

A primeira fissura visível ocorreu às 13:31 do dia 24/01/2015, ocorrendo após um período de 91min a partir do momento em que a insolação inicia-se. A Figura 4.22 representa a foto original cortada somente na região interna da caixa, no momento da primeira fissura registrada e ao seu lado a imagem com as fissuras ressaltadas e a instrumentação removida.

Figura 4.22: Primeira fissura do solo com 0,4% em massa de fibra perfilada de 3cm



Para fins comparativos também utilizou-se os resultados da caixa feita apenas com o solo puro. A primeira fissura do solo puro ocorreu dia 22/10/2014 às 10h e 21min, passados 650min, ou 10 horas e 50 minutos do início da secagem, como mostra a Figura 4.23.

Figura 4.23: Primeira fissura do solo puro

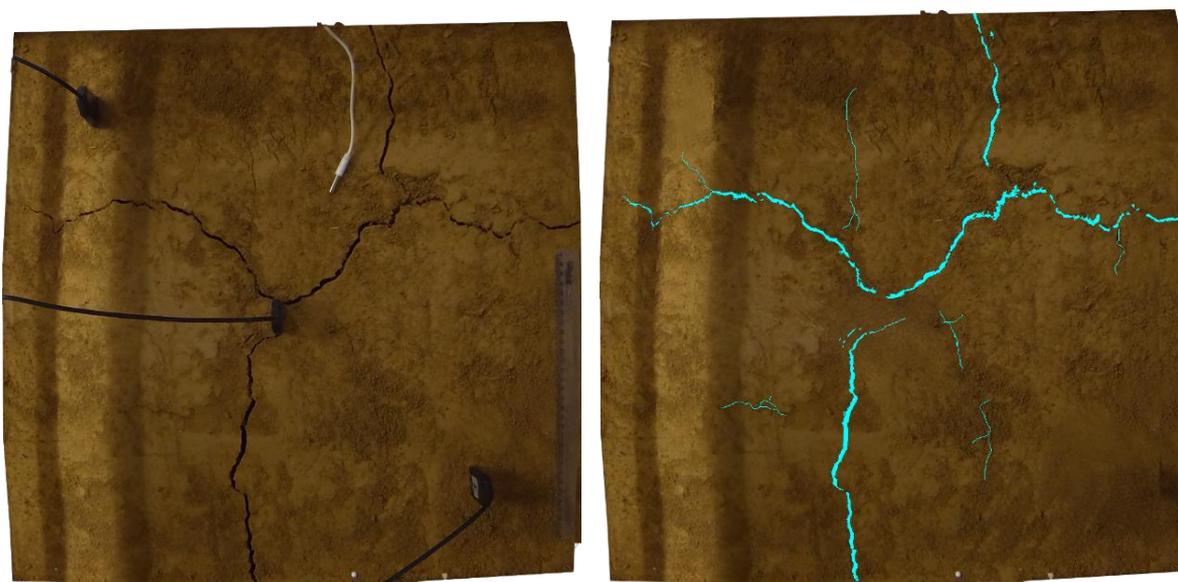


Um segundo ponto de importância para a análise é o estado de fissuração ao fim dos ciclos. Nesse momento estão representadas algumas das fissuras ou pelo menos sub-regiões onde o fissuramento será mais intenso. Na Figura 4.24 está a foto da caixa com material dosado com fibras logo após o primeiro ciclo e com as fissuras ressaltadas. E a Figura 4.25 representa o solo puro após o primeiro ciclo.

Figura 4.24: Estado de fissuração não fim do ciclo, para o solo com 0,4% em massa de fibra perfilada de 3cm



Figura 4.25: Estado de fissuração não fim do ciclo, para o solo puro



De forma análoga, os ciclos subsequentes têm suas fotos analisadas e tratadas. Nas Figuras 4.26 e 4.27 pode-se visualizar o estado de fissuração das caixas com solo puro e com a fibra perfilada de 3cm.

Figura 4.26: Estado de fissuração ao fim do segundo ciclo, para o solo com fibra



Figura 4.27: Estado de fissuração não fim do segundo ciclo, para o solo puro

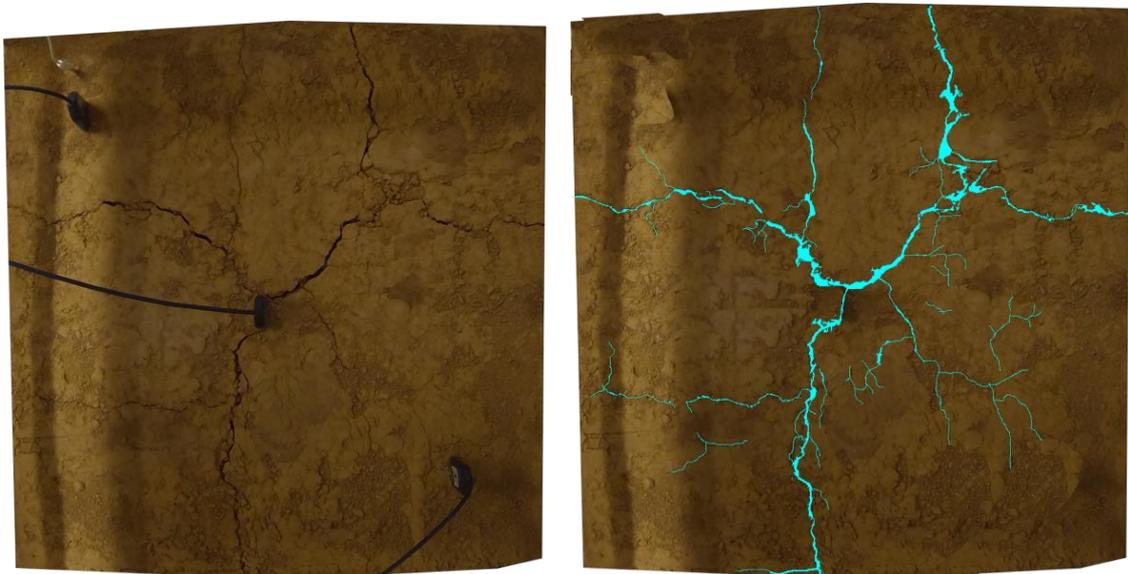


O último ciclo analisado é o terceiro, a partir do qual as fissuras tem poucas mudanças em relação ao número do ciclo, como ilustrado nas Figuras 4.28 e 4.29.

Figura 4.28: Estado de fissuração ao fim do terceiro ciclo, para o solo com fibra



Figura 4.29: Estado de fissuração não fim do terceiro ciclo, para o solo puro



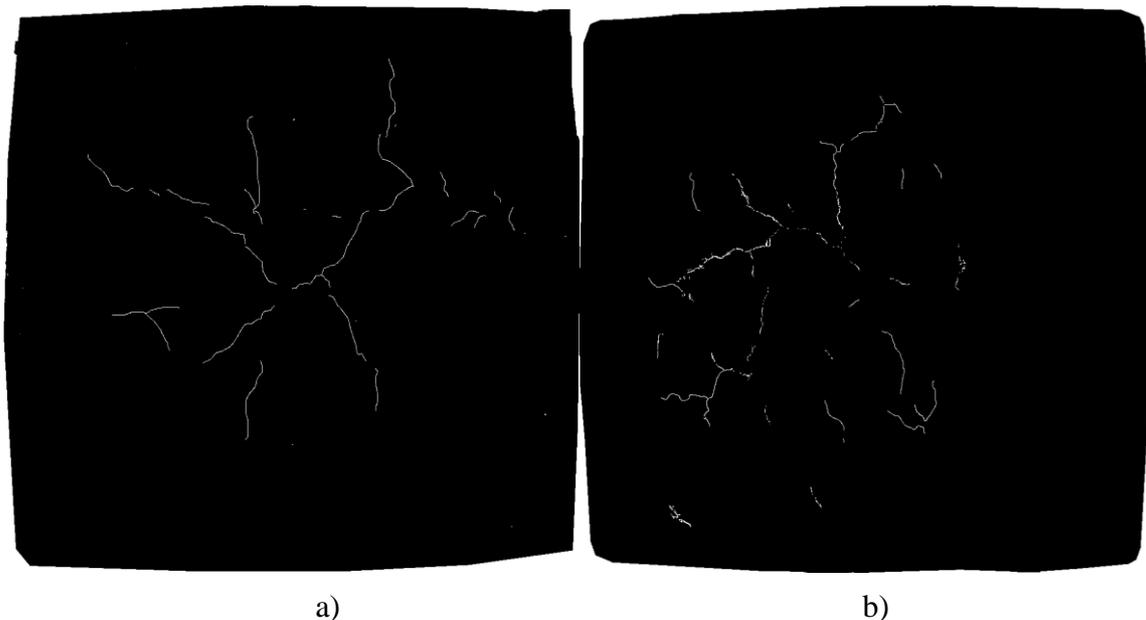
### 4.3.3 ANÁLISE DOS DADOS

Uma das primeiras etapas de análise é determinar qual é a área ocupada pela fissura. Para isso, as imagens têm que passar por um processo de tratamento. O passo inicial é a remoção de fatores que poderiam dificultar ou afetar diretamente a análise ou contagem de pixels (área unitária proporcional) pertencentes à fissura. A região circundante à caixa é removida, qualquer medidor ou aparelho restante é removida da figura e sua área preenchida com solo genérico, tomando-se o cuidado de não se alterar qualquer fissura que possa estar cruzando a região.

Os tratamentos seguintes são executados de forma a ressaltar as fissuras, o que pode tornar-se muito difícil caso elas sejam finas e rasas. Com as fissuras de certa forma destacadas, empregou-se o programa ImageJ para ‘planificar’ as cores, ou tornar a imagem bicromáticas (preto e branco) a partir de um certo limite, ou ‘treshold’. Com a imagem inteiramente representada em apenas duas cores, tira-se o histograma da figura. Nesse histograma só estarão representadas duas regiões com os pixels associados a cada uma das cores: preto e branco.

Extraíndo-se a contagem de pixels para as duas cores, pode-se determinar quanto da caixa se divide em mistura fissurada e não fissurada. Na Figura 4.30 estão as figuras em preto e branco na qual foram feitas as contagens.

Figura 4.30: Primeiras fissuras para o solo puro (a) e com fibras (b)



Os pixels em cada região, fissurada e não fissurada foram então contados e distribuídos na Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Contagem de pixels, primeira fissura

| Mistura | Região        | Pixels  | Percentual [%] | Área [cm <sup>2</sup> ] |
|---------|---------------|---------|----------------|-------------------------|
| FR3     | Fissura       | 34830   | 3,12%          | 112,4424                |
|         | Não-fissurado | 1080301 | 96,88%         | 3487,558                |
| SP      | Fissura       | 37396   | 3,41%          | 122,6932                |
|         | Não-fissurado | 1059858 | 96,59%         | 3477,307                |

A área inicialmente fissurada é relativamente pequena tanto para o solo puro quanto para a mistura com fibras perfiladas de 3cm. Cada uma das misturas apresentou fissuras que correspondiam em torno de 3% da área total.

Procede-se então para a análise do primeiro ciclo até o terceiro, em que serão comparados novamente as áreas fissuradas de cada caixa. A Figura 4.31 representa as fissuras isoladas para o primeiro ciclo.

Figura 4.31: Fissuras ao final do primeiro ciclo para o solo puro (a) e com fibras (b)

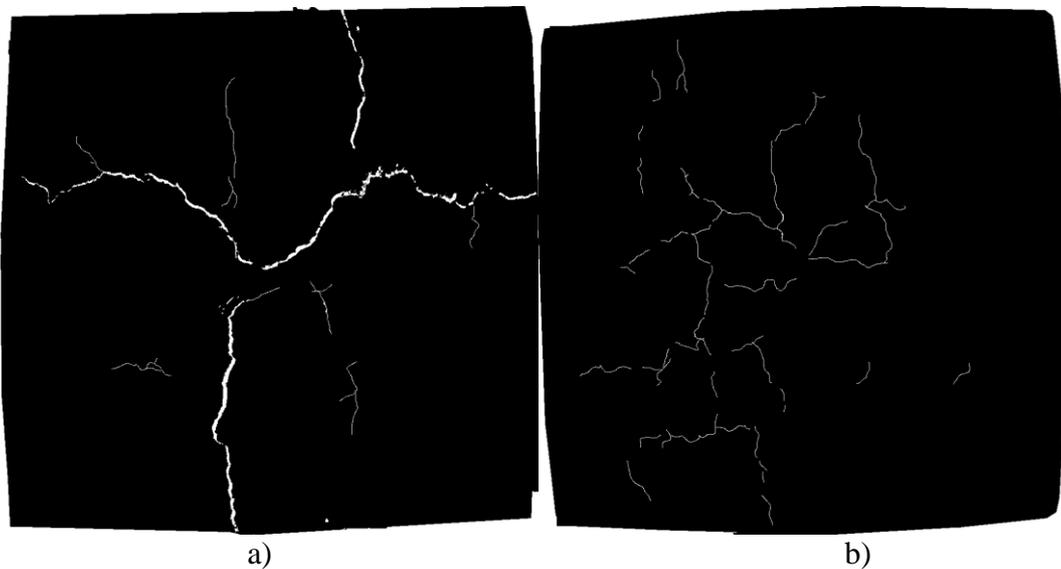


Tabela 4.14: Contagem de pixels, fim do primeiro ciclo

| Mistura | Região        | Pixels  | Percentual [%] | Área [cm <sup>2</sup> ] |
|---------|---------------|---------|----------------|-------------------------|
| FR3     | Fissura       | 45187   | 4,09%          | 147,1016                |
|         | Não-fissurado | 1060669 | 95,91%         | 3452,898                |
| SP      | Fissura       | 47772   | 4,31%          | 155,2677                |
|         | Não-fissurado | 1059858 | 95,69%         | 3444,732                |

De forma interessante, como mostra na Tabela 4.14, novamente não houve uma diferença sensível entre as áreas fissuradas. Cada uma das misturas apresentou fissuras que correspondiam em torno de 4% da área total. No entanto, houve algumas melhoras no carácter qualitativo das fissuras:

- As fissuras do solo puro apresentaram em média uma abertura individual maior que será embasado por uma análise posterior;

- As fissuras do solo com a fibra perfilada apresentaram fissuras menos profundas;

A próxima avaliação é feita para o fim do segundo ciclo. A Figura 4.32 representa as fissuras isoladas para essa situação.

Figura 4.32: Fissuras ao final do segundo ciclo para o solo puro (a) e com fibras (b)

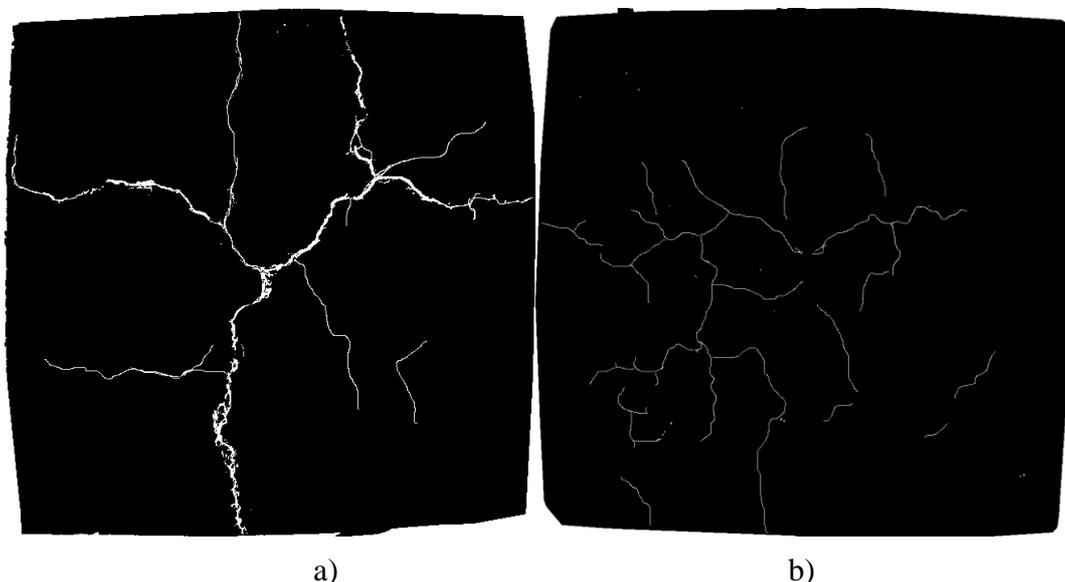


Tabela 4.15: Contagem de pixels, fim do segundo ciclo

| Mistura | Região        | Pixels  | Percentual [%] | Área [cm <sup>2</sup> ] |
|---------|---------------|---------|----------------|-------------------------|
| FR3     | Fissura       | 43133   | 4,00%          | 143,8453                |
|         | Não-fissurado | 1036352 | 96,00%         | 3456,155                |
| SP      | Fissura       | 22367   | 5,17%          | 186,2606                |
|         | Não-fissurado | 409937  | 94,83%         | 3413,739                |

Na Tabela 4.15 mostra que houve a redução da área ocupada por fissuras no solo com fibras e as mesmas continuam estreitas. Um fato notável a ser comentado é que no solo puro as fissuras centrais alargaram-se um pouco e que fissuras menores interconectaram-se com as centrais. A Figura 4.33 representa as fissuras ao final do terceiro ciclo.

Figura 4.33: Fissuras ao final do terceiro ciclo para o solo com fibras (a) e puro (b)

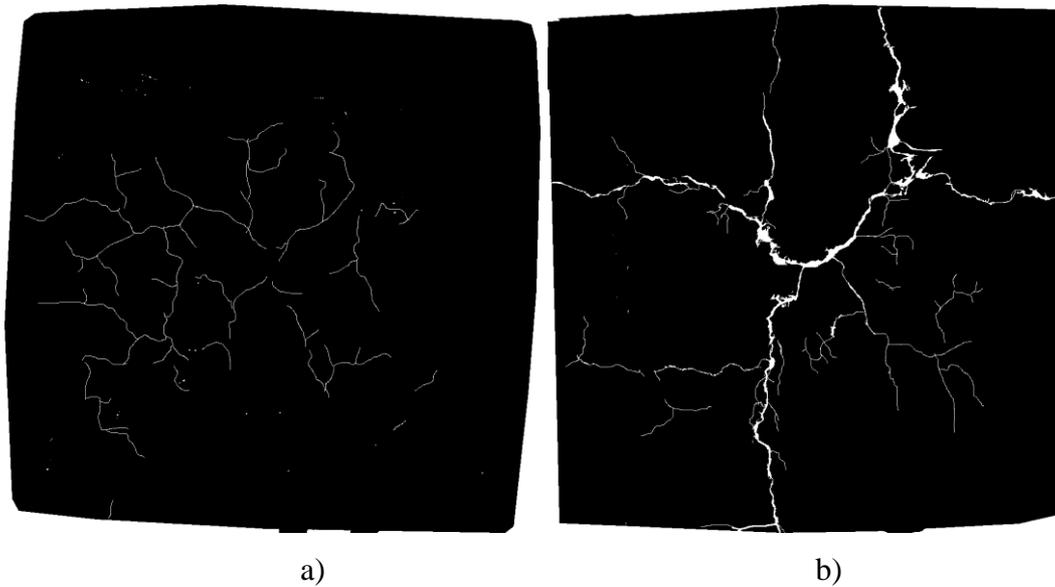


Tabela 4.16: Contagem de pixels, fim do terceiro ciclo

| Mistura | Região        | Pixels  | Percentual [%] | Área [cm <sup>2</sup> ] |
|---------|---------------|---------|----------------|-------------------------|
| FR3     | Fissura       | 55231   | 4,99%          | 179,5741                |
|         | Não-fissurado | 1052009 | 95,01%         | 3420,426                |
| SP      | Fissura       | 55953   | 5,31%          | 191,0251                |
|         | Não-fissurado | 998520  | 94,69%         | 3408,975                |

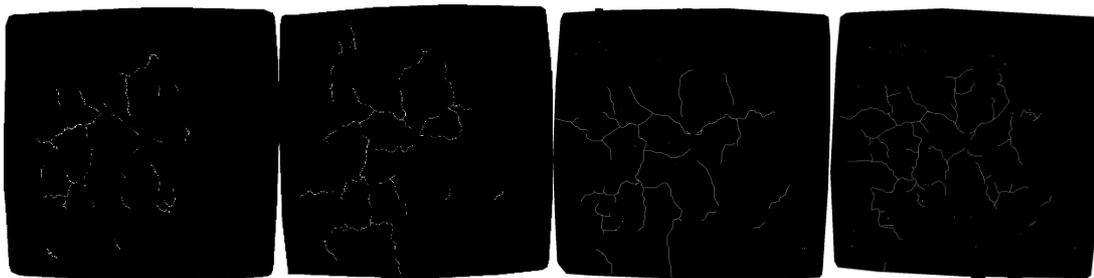
Ao fim do terceiro ciclo, identificado na Tabela 4.16, mostra que houve um aumento da quantidade de fissuras em ambas as amostras. O percentual da área fissuras na amostra com fibras subiu para em torno de 5% e e no solo puro para 5,3%.

Pôde-se notar que o crescimento das fissuras no solo puro é majoritariamente “vertical”, com um grupo pequeno de fissuras tornando-se mais aberta e mais profunda a cada iteração do simulador atmosférico.

Já o material com fibras apresentou uma alternância “horizontal” das fissuras, com o crescimento e fechamento de maior número de fissuras pequenas e rasas, geralmente em uma sub-região específica da caixa.

Representado nas Figuras 4.34 e 4.35 está a progressão das fissuras nas caixas com o solo + fibras e o solo puro. Todas as imagens estão em ordem crescente de ciclo, da esquerda para a direita, começando no surgimento das primeiras fissuras e terminando com o final do terceiro ciclo.

Figura 4.34: Progressão das fissuras no solo com fibra



Não há um desenvolvimento sensível no sentido do aumento da abertura individual das fissuras. Do primeiro para o segundo ciclo, não há uma grande variação da quantidade de fissuras, mas há a abertura de várias outras fissuras rasas ao fim do terceiro ciclo.

No solo com as fibras, não é tão intenso o processo de interconexão das fissuras, inclusive, pode-se notar que entre um ciclo e outro, pequenas fissuras que tinham se formado fecham, sendo substituídas por outras. Diferente do solo puro onde uma fissura fixa gera outras e as mesmas interconectam-se entre si, o solo com fibra apresenta regiões onde a geração de fissuras é mais recorrente, podendo algumas desaparecerem.

Figura 4.35: Progressão das fissuras no solo puro



No solo puro, há a partir da primeira fissura um processo de alargamento das fissuras, no qual a abertura de fissuras individuais aumenta até certo ponto. A partir desse patamar as fissuras começam a se conectar uma com as outras.

Em um segundo momento, foram criadas superfícies tridimensionais de regiões de interesse. O software a partir de uma escala de cor cria superfícies que então por sua vez podem ser usadas para avaliar, em um estado inicialmente qualitativo, a profundidade das fissuras.

Nesse ponto, as imagens originais voltam a ser utilizadas, sem o tratamento para reforçar a presença das fissuras, isso pois a mudança do tom original pode alterar a profundidade da curva. Essa técnica poderia ser calibrada, fazendo uma correlação entre a profundidade representada no gráfico, em pixels, com o resultado real em cm. Mas aqui ela será usada para uma análise qualitativa em relação à profundidade das fissuras.

As Figuras 4.36 e 4.37 representam a profundidade relativa da fissura, dado a partir da tonalidade das imagens em comparação com as regiões circundantes.

Figura 4.36: Profundidade da fissura, solo puro

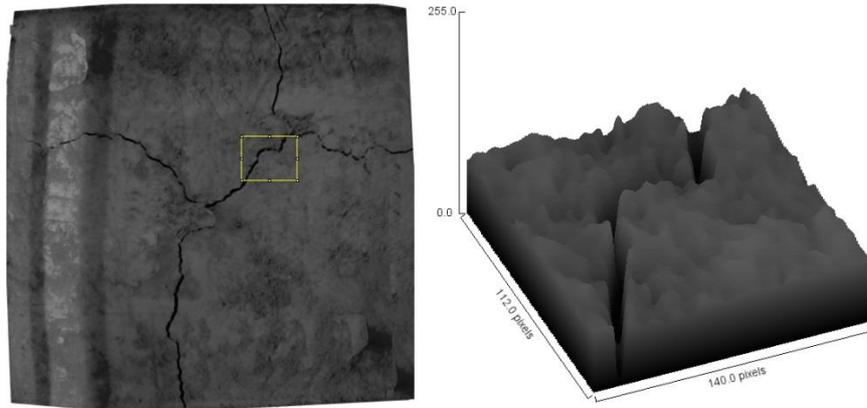
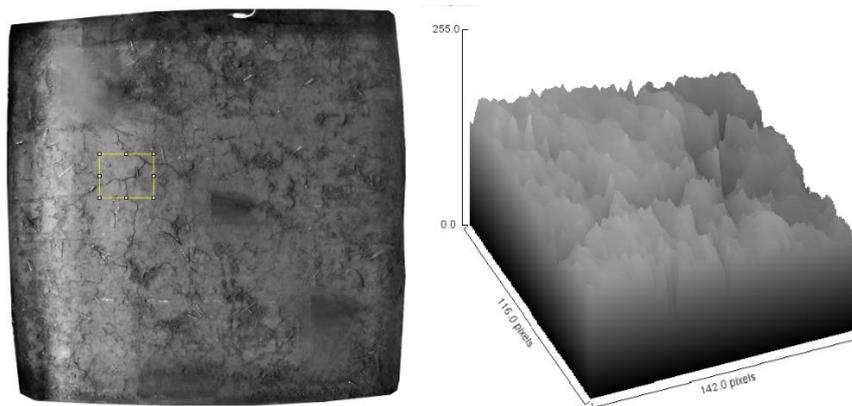


Figura 4.37: Profundidade da fissura, solo com fibra de 3cm de comprimento



O programa reconhece de forma clara a fissura e sua abertura sensível. Como a profundidade da mesma é relativamente alta, sua tonalidade mais escura ressalta. No solo com fibras a fissura é tão rasa que mal se distingue do material circundante como representada na Figura 4.37.

## 5. CONCLUSÃO

Após feito todos ensaios apresentados neste projeto, pode-se chegar a algumas conclusões. Pelo ensaio de compressão, se percebe que não há um ganho significativo de resistência da mistura de solo com fibras PET de 1cm. Porém o gráfico mostra que na mistura do solo com fibras após o pico de resistência, o composto se comporta de maneira diferente do solo puro. Enquanto que neste há uma queda brusca de resistência, na mistura a queda se dá suavemente. Já no ensaio de tração foi notado que a adição de fibras permitiu uma nova região de plastificação do material compósito, prolongando sensivelmente a faixa de deformação do mesmo. As fibras de maior comprimento tiveram um maior impacto sobre a resistência última do material, e criaram cristas mais largas, ou patamares de plastificação mais longos. As fibras perfiladas obtiveram uma melhor ancoragem, patamares mais largos (em comparação com a fibra lisa de comprimento equivalente) e melhores resultados em termos do controle da perda de resistência do material.

Para o ensaio de simulação do ressecamento e umedecimento da amostra, se observa que não houve uma mudança sensível nos valores de área fissurada comparando os resultados do solo puro com a caixa com material compósito (solo+0,4% da massa em fibras perfiladas de 3cm). Houve no entanto uma mudança no comportamento das fissuras.

Na situação do solo puro, há a formação de fissuras mais abertas e mais profundas, de carácter persistente ou perene, da qual se originam ou interconectam fissuras menores. Mas quando a amostra era o solo com as fibras, as fissuras eram mais rasas, menos abertas mas mais numerosas e algumas eram até transitórias, fechando entre ciclos e sendo substituídas por outras.

Portanto, conclui-se que a adição de fibras PET é eficiente no combate as fissuras do solo, mesmo visualmente é possível observar que a abertura das fissuras é maior na caixa de solo puro que na mistura (solo + fibras PET). No entanto, outros experimentos podem ser feitos nesta área para reafirmar ou melhor explicar este comportamento. Como por exemplo o ensaio de tração diametral e compressão com células de tensão para verificar a distribuição da tensão internamente no corpo de prova; outros ensaios mecânicos de maior escala de forma que o tamanho de corpo de prova não seja da mesma ordem de magnitude que as fibras e por último um ensaio de campo, produzindo uma camada de aterro experimental da mistura solo + fibras PET e verificar em escala real algumas hipóteses e averiguar a presença de outros fenômenos não esperados pelo modelo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS *Classificação dos Resíduos*. NBR 10004/2004. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos*. NBR 8419/1992. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Solos Coesivos – Determinação da resistência á compressão não confinada – Método de Ensaio*. NBR 12770/1992. Rio de Janeiro, 1992.

AGUIAR, A. B. O emprego do permeâmetro de guelph da determinação da permeabilidade do solo, de camadas de lixo e sua cobertura. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

BARROS, M. C. Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema de cobertura. 2005. 96p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

BOSCOV, M.E.G. Contribuição ao Projeto de Sistemas de Contenção de Resíduos Perigosos Utilizando Solos Lateríticos. Tese de Doutorado. EPUSP, São Paulo, 1997.

BOSCOV, M. E. G. Geotecnia Ambiental, São Paulo: Oficina de Textos, 2008

BUDINSK, K. G. Engineering Materials. Properties and selection. New Jersey. Prentice Hall International, 5 ed. 1996. 653 p.

CALLISTER, W. D. JR. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 7 ed. 2011. 705p.

CURCIO, D. S. Comportamento hidromecânico de compósito solo-fibra. 2008. 149p. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

DENARDIN, G. P. Estudo dos Recalques do Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio. 2013. 154p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

DIAS; F.W.R. Comportamento mecânico do polímero PTFE sujeito a diferentes taxas de deformação, 2011, UFF

FALCÃO, M.F.B., SOARES, J.B. Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação.

HEINECK, K. S. Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis. 2002. 251p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

HUSE, K. Estudo da influência da adição de bentonita em um solo areno-siltoso para uso com cobertura de aterros. 2007.126p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

IBGE, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000. Rio de Janeiro, 2002.

MANUAL DE OPERAÇÃO DE ATERROS SANITÁRIOS, SEPLANTEC – Secretária de Planejamento, Ciência e Tecnologia, CONDER – Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia.

MAHER, M. H., HO, Y. C. Mechanical properties of kaolinite/fibre soil composite. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,. 1994

PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos. São Paulo, Oficina de textos, 2000. 247 p.

RIBEIRO, B. T. *ET al.* Calibração e uso de minissimulador de chuva para estudos de erosão e poluição do solo. In: **Boletim Técnico**, n. 77. Lavras: Ufla, 1-17, 2007

SAARELA, J. Hydraulic Approximation of Infiltration Characteristics of Surface Structures on Closed Landfills. Finnish Environment Institute, Finland.1997.

SUZUKI, D. K., BOSCOV, M. E. G., SCHMIDT, C. Viabilidade técnica de verificação de aterros sanitários por meio de alteamentos sucessivos com diques reforçados. São Paulo, Brasil.

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

TOZZI, R. F. *D Estudo da influência do gerenciamento na geração dos resíduos da construção civil (RCC) – Estudo de caso de duas obras em Curitiba/PR.* Paraná, 2006. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos) Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

ZANTA, V. M., FERREIRA, C. F. A. Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos, 2009.

.

## SITES CONSULTADOS

<http://www.infoescola.com/ecologia/definicao-de-residuos-solidos/> > Acesso em Novembro de 2014.

[http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3528/3528\\_15.PDF](http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3528/3528_15.PDF) > Acesso em Novembro de 2014.

<http://www.lixo.com.br/content/view/144/251/> > Acesso em Novembro de 2014.

<https://alliance.seas.upenn.edu/~medesign/wiki/index.php/Courses/MEAM247-11C-P2P1-background> > Acessado em Fevereiro de 2015.