



Universidade Federal do Pampa

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MICHELI KAUFMANN BIANCHINI

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE UM SOLO ARGILO-
ARENOSO COM A INCLUSÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO**

**Alegrete
2013**

MICHELI KAUFMANN BIANCHINI

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE UM SOLO ARGILO-
ARENOSO COM A INCLUSÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Magnos Baroni

Coorientador: Prof. Dr. Ederli Marangon

Alegrete

2013

MICHELI KAUFMANN BIANCHINI

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE UM SOLO ARGILO-
ARENOSO COM A INCLUSÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 25 de setembro de 2013.
Banca Examinadora:

Prof. Me. Magnos Baroni
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Ederli Marangon
Co-orientador
UNIPAMPA

Prof. Me. Jaelson Budny
UNIPAMPA

Prof. Dr. Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco
UNIPAMPA

Dedico este trabalho...

... Aos meus pais, Leci e Mauro, por tudo o que fizeram para que meu sonho se tornasse realidade.

... Aos meus irmãos Alexsandro e Eduarda por serem exemplo de amizade e companheirismo.

... Ao meu avô Ivo pelas palavras de incentivo e conselhos sábios e sinceros.

AGRADECIMENTOS

Agradeço de forma especial ao meu orientador Prof. Magnos Baroni, pelo interesse e dedicação, pela disponibilidade e otimismo sempre presentes nas conversas e e-mails ao longo das dificuldades encontradas e primeiros resultados obtidos, pela força e apoio nas horas difíceis. E agradeço, também, pela competência e profissionalismo em todos os momentos desta orientação, não deixando que houvesse desânimo quando de encontro com as adversidades da pesquisa. Muito obrigada pelo incentivo e pela confiança em mim depositados.

Ao meu co-orientador, Prof. Ederli Marangon, que apesar dos meus atrasos e "quebra" de prazos, sempre deu sua opinião sobre o andamento desta pesquisa, colaborando de forma significativa no que se refere à utilização de fibras de polipropileno como material de reforço.

Ao laboratorista, Eng. Cleber Millani Rodrigues, por toda ajuda na realização desta pesquisa, pelos conselhos, críticas e sugestões, pelo apoio e café a mim oferecidos... Por todas as vezes que me ajudou a "cortar" os corpos de prova, pelas vezes em que carregou no "muque" a batedeira planetária de um laboratório ao outro, pela execução do dispositivo de compactação da amostra de solo e pelo conselho de apertar a célula de medição de carga, muito obrigada.

Ao meu colega Luís Urbano Durlo Tambara Júnior, pelos cinco anos de amizade, por todas as mensagens de "Calma, tudo vai dar certo!", pela paciência, pelos ouvidos emprestados durante minhas crises de existência e por estar ao meu lado em todos os momentos. Por ter sido mais que um amigo pra mim nesse tempo, tu és pra mim um irmão. Obrigada por tudo.

Aos colegas Wagner Dambrós Fernandes e Flávio Silva Vieira Junior por todo apoio, pelo solo coletado, pela ajuda com os ensaios e pelas horas que passaram me ajudando a destorroar as amostras.

Às minhas ex colegas de apartamento, Aline Magni e Luana Elicker, por toda a paciência, apoio e amizade ao longo de todos esses anos. Graças a vocês o Alegrete ficou melhor e mais parecido com um lar. Obrigada por tudo meninas.

Às minhas amigas-irmãs de sempre e pra sempre; Evelin Dal Castel, Elietti Hendges e Iasmin da Silva Vargas; pelas horas e horas de ligações, pelas conversas de apoio e incentivo e por não me deixarem fraquejar. Obrigada por caminharem comigo de encontro ao meu sonho.

À MACCAFERRI pelas fibras cedidas para a realização deste estudo.

Ao Saed Hassan Husein Kanaan, por toda compreensão, apoio, espera, paciência, por ter aturado minhas crises de "TCC", incentivo, carinho, amizade e, principalmente, amor... Obrigada por ter enfrentado esse desafio junto comigo!

À minha Mãe e meu Pai. Pelo imenso amor, amizade, exemplo, carinho e dedicação que sempre recebi de vocês. Agradeço por me ensinarem, diante das dificuldades financeiras, o valor da educação, do respeito e do amor. De nada valeria cada obstáculo que passei se não existissem pais como vocês. Tudo o que sou e que conquistei até aqui, devo a vocês.

Aos meus irmãos, Alexsandro e Eduarda, pelos momentos de descontração, pelas palavras de apoio e pela força. Amo muito vocês.

A todos os meus amigos, que de uma forma ou outra me ajudaram, não preciso citar nomes pois cada um sabe da sua participação. Aos demais professores pelos ensinamentos passados ao longo da graduação.

E finalmente... Agradeço a Deus... Pela vida... Por tudo!!

RESUMO

A utilização de fibras como reforço de solos é fundamentada na tecnologia de materiais compósitos, onde se busca criar um novo material com propriedades e características específicas através da combinação de dois ou mais materiais conhecidos. O presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno, submetidos a ensaios de cisalhamento direto. O programa experimental consistiu na realização de ensaios de caracterização do solo natural e ensaios de cisalhamento direto para as amostras de solo natural e solo adicionado de fibras de polipropileno nos comprimentos de 6 mm, 12mm e 24 mm, nas porcentagens de 0,25%; 0,5% e 0,75%. Nesta pesquisa busca-se investigar o comportamento tensão-deformação de misturas reforçadas e não reforçadas, os efeitos do comprimento e porcentagem nas propriedades mecânicas. A análise global dos resultados permite identificar alterações provocadas pela inclusão aleatória de fibras de polipropileno à matriz estudada. A adição de fibras influencia no aumento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico e pós-pico. O efeito da inclusão de fibras é mais evidente para maiores comprimentos e maiores porcentagens, sendo a mistura ótima alcançada neste trabalho a com 0,5% de adição de fibra com 12 mm de comprimento.

Palavras- chave: solo reforçado, fibras de polipropileno, ensaio de cisalhamento direto.

ABSTRACT

The use of fibers as a reinforcement of soils is grounded on technology of composites materials, where it is searched to created a new material with especific properties and characteristics trough the combination of two or more well-known materials. This work has the object to study the behavior of reinforced soils with fibers of polypropylene submitted in essays of direct shear. The experimental program was made on essays realizations of characterization of natural soil and added soil of polypropylene fibers in the length of 6 mm, 12 mm e 24 mm, in the percentages of 0.25%; 0.5% e 0.75%. In this research it is searched investigate the behaviourism of deformation-tension of reinforced and non-reinforced blended, the effects of length and percentage in the mechanical properties. The global analises of results allow identify changes made by of aleatory inclusion of polypropylene fibers in the studied matrix. The addiction of fibers influences on the upper of parameters of resistency in sheir from peak and after-peak. The effect of fibers inclusion is more evident for larger lenghts and percentages, being the great blend achieved in this work with 0.5% of fibers addiction with 12 mm of length.

Keywords: reinforced soil, polypropylene fibers, direct sheir essay.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Análise Granulométrica do solo natural.....	50
Gráfico 2 - Curva de Compactação Solo Natural	51
Gráfico 3 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo Natural - Ensaio Seco.....	58
Gráfico 4 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo Natural - Ensaio Saturado ...	59
Gráfico 5- Envoltória de resistência, solo natural- Ensaio seco.	60
Gráfico 6 - Envoltória de resistência, solo natural - Ensaio saturado.....	60
Gráfico 7 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo + 0,25% Fibra.....	61
Gráfico 8 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo + 0,5% Fibra.....	62
Gráfico 9 - Comparação entre Solo Natural e Solo + Fibra de 6mm de comprimento	62
Gráfico 10 - Envoltória de resistência - Comparação.....	63
Gráfico 11- Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo + 0,25% Fibra - SATURADO	64
Gráfico 12 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo + 0,25% Fibra - SECO	65
Gráfico 13 -Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo + 0,5% Fibra - SATURADO	65
Gráfico 14 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo + 0,5% Fibra - SECO	66
Gráfico 15 -Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo + 0,75% Fibra - SATURADO	66
Gráfico 16 - Comparação entre Solo Natural e Solo + Fibra de 12mm de comprimento – SECO.....	67
Gráfico 17 - Comparação entre Solo Natural e Solo + Fibra de 12mm de comprimento - SATURADO	68
Gráfico 18 - Envoltória de resistência – Comparação.....	69
Gráfico 19 - Envoltória de resistência - Comparação.....	70
Gráfico 20 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo + 0,25% Fibra.....	71
Gráfico 21 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo + 0,5% Fibra.....	71
Gráfico 22 - Comparação entre Solo Natural e Solo + Fibra de 24 mm de comprimento	72
Gráfico 23 - Envoltória de resistência - Comparação.....	73
Gráfico 24 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - 0,25% de adição - 25 kPa	74
Gráfico 25 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - 0,5% de adição - 25 kPa.....	75
Gráfico 26 -Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - 0,25% de adição - 50 kPa.	76

Gráfico 27 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - 0,5% de adição - 50 kPa.	76
Gráfico 28 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - 0,25% de adição - 100 kPa	77
Gráfico 29 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - 0,5% de adição - 100 kPa.	78
Gráfico 30 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - 0,25% de adição - 200 kPa.	79
Gráfico 31 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - 0,5% de adição - 200 kPa.	79
Gráfico 32 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Fibra de 12 mm - 25 kPa	80
Gráfico 33 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Fibra de 12 mm - 50 kPa	81
Gráfico 34 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Fibra de 12 mm - 100 kPa	82
Gráfico 35 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Fibra de 12 mm - 200 kPa	83
Gráfico 36 - Envoltórias de Resistência	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Zigueate da Mesopotâmia	23
Figura 2 - Grande Muralha da China.....	24
Figura 3 - Disposição fibra/fissura ideal.....	27
Figura 4 - Acréscimo da resistência em função da inclinação da fibra	33
Figura 5 - Localização georeferenciada da jazida da Pedra Rosada.....	39
Figura 6 - Fibras de Polipropileno	40
Figura 7 – (A) Solo no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UNIPAMPA; (B) Solo em processo de destorroamento.....	41
Figura 8 - Fluxograma de Ensaio.....	42
Figura 9 - (A) CP moldado com fibras mal abertas; (B) CP moldado com fibras bem abertas; (C) Detalhe da abertura e distribuição das fibras.	43
Figura 10 - (A) Batedeira planetária utilizada; (B) Amostra antes de misturada; (C) Amostra após 10 minutos na bateadeira planetária.....	44
Figura 11 - (A) Fibra de 6 mm; (B) Fibra de 12 mm e (C) Fibra de 24 mm.	44
Figura 12 - (A) Molde Utilizado; (B) Soquete utilizado.	45
Figura 13 - (A) Cilindro usado na compactação, energia normal do Proctor; (B) Corpo de Prova obtido.....	45
Figura 14 - Moldagem das amostras indeformadas a partir do CP: (A) Cravamento do molde; (B) Desbastes e nivelamento das faces.....	46
Figura 15 - Dispositivo para moldagem: (A) Papel filtro; (B) Célula superior da caixa bipartida fixada; (C) Amostra acondicionada na célula; (D) Amostra após compactação.	47
Figura 16 - Compactação Estática: (A) Tarugo de madeira disposto sobre amostra; (B) Amostra compactada com 16 golpes na energia normal do Proctor.	47
Figura 17 - Realização do Ensaio de Sedimentação: (A) Amostra com defloculante; (B) Amostra no dispersor; (C) Aparelho de dispersão; (D) Ensaio de Sedimentação; (E) Amostra após ensaio.....	48
Figura 18 - Realização do Ensaio de Análise Granulométrica.....	49
Figura 19 - Aparelho de Casagrande	49
Figura 20 - Material utilizado para determinação do LP.....	49

Figura 21 - Ensaio de Compactação: (A) Materiais Utilizados; (B) Realização do ensaio; (C) Amostras.....	51
Figura 22 - Esquema da Caixa Bipartida.....	53
Figura 23 - Conjunto da célula de ensaio	53
Figura 24 - Equipamento para ensaios de Cisalhamento Direto utilizado.	54
Figura 25 - Amostra após ensaio de cisalhamento: (A) Caixa bipartida com célula superior deslocada; (B) Amostra de solo após ensaio saturado.....	54
Figura 26 - Pesos Utilizados: (1) 25kPa; (2) 50kPa; (3) 100kPa e (4) 200kPa.	55
Figura 27 - Amostra no equipamento, durante ensaio.....	55
Figura 28 - Envoltória de Resistência de Mohr.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características Mecânicas da Fibra de Polipropileno.....	39
Tabela 2 - Envoltória de Resistência - Ensaio Seco e Saturado	59
Tabela 3 - Envoltória de Resistência - Solo Natural e Solo + Fibra.....	63
Tabela 4 - Envoltória de Resistência - Solo Natural e Solo + Fibras - Ensaio SATURADO..	69
Tabela 5 - Envoltória de Resistência - Solo Natural e Solo + Fibras - Ensaio SECO.....	70
Tabela 6 - Envoltória de Resistência - Solo Natural e Solo + Fibra.....	72
Tabela 7- Ângulo de atrito interno (ϕ') e intercepto coesivo (c') para as amostras ensaiadas..	83
Tabela 8 - Resistência de Pico (τ máx) alcançadas - Ensaio Seco	84
Tabela 9 - Resistência de Pico (τ máx) alcançadas - Ensaio Saturado.....	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Coordenadas geográficas da jazida	38
Quadro 2 - Amostras ensaiadas	57

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

' - Relativo a tensões efetivas

γ_d máx – Peso Específico Seco Máximo

ϕ' - Ângulo de Atrito

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

c' - Intercepto Coesivo

CBR - Índice de Suporte Califórnia

d - Diâmetro da fibra

D_h - Deslocamento Horizontal

IG – Índice de Grupo

IP – Índice de Plasticidade

LC – Limite de Contração

LL – Limite Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

kPa – KiloPascal

MPa - MegaPascal

GPa - GigaPascal

μ_m - Micrometro

Kgf - KiloGrammaForça

w% – Teor de Umidade Ótimo

σ - Tensão Normal

τ - Tensão Cisalhante

N - Força Vertical

T - Força Horizontal

cm - centímetros

mm - milímetros

m - metros

G_0 . Módulo de cisalhamento inicial ou elástico

l - Comprimento da fibra

l/d - Fator de forma (relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra)

NBR - Norma Brasileira

PET - Polietileno tereftalato

SUCS - Sistema Unificado de Classificação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Contextualização do tema e do problema de pesquisa.....	19
1.2 Justificativa	21
1.3 Objetivos.....	21
1.3.1 Objetivo Geral	21
1.3.2 Objetivos Específicos.....	21
1.5 Estrutura do Trabalho	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Solos Reforçados.....	23
2.1.1 Fibras como reforço de solos	23
2.1.2 Materiais Compósitos Cimentados Reforçados com Fibras.....	25
2.1.3 Tipos de Fibras Empregadas como Reforço	27
2.1.3.1 Fibras Naturais	28
2.1.3.2 Fibras Poliméricas	29
2.1.3.3 Fibras Minerais.....	30
2.1.3.4 Fibras Metálicas.....	31
2.1.4 Alterações nas Propriedades dos solos pela inclusão de Fibras	32
2.1.4.1 Compactação.....	32
2.1.4.2 Resistência ao Cisalhamento de Pico	32
2.1.4.2.1 Materiais Argilosos.....	34
2.1.4.2.2 Materiais Granulares	34
2.1.4.2 Resistência ao Cisalhamento Pós-Pico.....	35
2.1.4.3 Deformabilidade	35
2.1.4.4 Modo de Ruptura	35
2.1.4.5 Variação Volumétrica	36
2.1.4.6 Rigidez Inicial	36
2.1.4.7 Condutividade Hidráulica e outras Propriedades.....	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1 Materiais.....	38
3.1.1 Solo.....	38
3.1.2 Fibras	39
3.1.3 Água	40

3.2 Metodologia.....	40
3.2.1 Etapa de laboratório.....	40
3.2.1.1 Coleta e Preparação do Solo.....	41
3.2.1.2 Dosagem e Mistura.....	41
3.2.1.3 Ensaio de Caracterização.....	48
3.2.1.4 Ensaio de Compactação.....	50
3.2.1.4 Ensaio de Cisalhamento direto.....	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
4.1 Resistência ao cisalhamento.....	57
4.1.1 Solo Natural.....	58
4.1.2 Solo + Fibras de 6 mm de comprimento.....	60
4.1.2 Solo + Fibras de 12 mm de comprimento.....	64
4.1.2 Solo + Fibras de 24 mm de comprimento.....	70
4.1.4 Análise global dos resultados.....	73
4.1.4.1 Ensaio Seco.....	73
4.1.4.1.1 Solo Natural e Solo adicionado de fibras - Tensão Normal de 25 kPa.....	73
4.1.4.1.2 Solo Natural e Solo adicionado de fibras - Tensão Normal de 50 kPa.....	75
4.1.4.1.3 Solo Natural e Solo adicionado de fibras - Tensão Normal de 100 kPa.....	77
4.1.4.1.4 Solo Natural e Solo adicionado de fibras - Tensão Normal de 200 kPa.....	78
4.1.4.2 Ensaio Saturado.....	80
4.1.4.2.1 Solo Natural e Solo adicionado de fibras - Tensão Normal de 25 kPa.....	80
4.1.4.2.2 Solo Natural e Solo adicionado de fibras - Tensão Normal de 50 kPa.....	80
4.1.4.2.3 Solo Natural e Solo adicionado de fibras - Tensão Normal de 100 kPa.....	81
4.1.4.2.4 Solo Natural e Solo adicionado de fibras - Tensão Normal de 200 kPa.....	82
4.1.4.3 Envoltórias de resistência.....	83
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES.....	86
5.1 Considerações Finais.....	86
5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras.....	87
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema e do problema de pesquisa

O atual crescimento da engenharia civil, no país, e a exploração demasiada de recursos naturais, levam a pensar por quanto tempo este sistema se sustentará. Fica, assim, a reflexão sobre como podem ser melhorados os recursos naturais de que se dispõe, para que estes tenham suas características aperfeiçoadas, tanto no que se refere à sua qualidade, quanto à possibilidade de utilização em obras correntes.

Assim, novos materiais têm sido investigados a cerca de sua possível vantagem quando adicionados ao solo, gerando um material compósito, que, segundo Budinski e Budinski (2005), são misturas de dois ou mais materiais com características inferiores ao do material resultante. A adição de materiais ao solo com a intenção de melhorar as suas qualidades é prática comum desde 3000 a.C., conforme Aguiar e Vertematti (2004), o emprego de materiais sintéticos, como o polipropileno, ocorreu em meados de 1954 com o desenvolvimento da indústria têxtil.

Segundo Vendruscolo (2003) os métodos de estabilização de solos são classificados em três grupos: estabilização mecânica, cujo objetivo é melhorar as características do solo com a melhor "arrumação" de suas partículas constituintes e/ou recorrendo a correções da sua composição granulométrica; a física, onde as propriedades do solo são alteradas pela ação do calor, eletricidade, entre outros; e a química, que modifica permanentemente as propriedades do solo com a aplicação de aditivos, onde a cal e o cimento Portland são os dois agentes estabilizadores mais empregados.

Quando se fala em melhoramento do solo, instantaneamente pensa-se em estabilização química deste, que no Brasil, teve sua utilização iniciada em meados da década de 1930 e, ainda hoje, é a técnica mais difundida de melhoramento de solos. Sabe-se que um solo adicionado de cimento ou cal, apresenta entre outras melhorias, um aumento de resistência e rigidez, o que geralmente o torna apto a ser usado como base e sub-base de pavimentos, mas seu comportamento frágil e sua fissuração acabam por desmotivar o seu uso por gerarem projetos muito conservadores. O aparecimento de trincas em solos artificialmente cimentado acontece, segundo Specht (2000), por este estar submetido a tensões/deformações de tração, ou por terem uma rigidez elevada.

Como alternativa a este método, vem sendo estudada a adição de fibras ao solo, com capacidade de suportar a tração, amostras de solo com este tipo de adição têm apresentado

mudanças em certos parâmetros da engenharia, que as tornam aptas a serem utilizadas em obras que anteriormente não apresentavam resistência suficiente (TRINDADE et al.,2004).

Grande parte dos pavimentos no Brasil são classificados como flexíveis, tendo como base camadas granulares, ou de solos que, quando não são de boa qualidade, ou foram mau executados, são causadores de problemas como trincas e afundamento de trilhos de roda no pavimento; tais problemas podem ser evitados se adicionados geossintéticos na mistura das camadas. Estudos sobre a utilização de fibras no melhoramento de camadas de solos granulares para aplicação em base de revestimentos vêm sendo realizados por diversos autores, como por exemplo, Machado et al. (1998), Specht (2000), Trindade et al. (2004, 2005, 2006), Festugato (2008).

Vale observar, que o solo da região Oeste do estado do Rio Grande do Sul pertence à formação Botucatu, sendo formado por substratos de arenito e solo superficial arenoso. Em geral, este tipo de solo apresenta boa resistência à compressão e sua resistência se dá apenas pelo atrito grão a grão, não existindo coesão entre as partículas. Além disso, devido as suas características naturais, esse tipo de solo possui pouca ou nenhuma plasticidade e praticamente nenhuma resistência à tração.

Diante do exposto, esta pesquisa pretende responder as seguintes questões: Qual é a resistência ao cisalhamento de um solo extraído de jazida na cidade Alegrete? O solo reforçado possui bom comportamento quando compactado? Se acrescentadas porcentagens de materiais como a fibra de polipropileno o solo apresentará melhorias nas suas propriedades mecânicas?

1.2 Justificativa

O substrato geológico da região oeste do estado do Rio Grande do Sul é formado em partes por arenitos que geram solos arenosos. Solos com essas características geralmente não resistem à tração. Com a adição das fibras de polipropileno pretende-se melhorar a resistência a tração do solo, a ponto de esta ser considerada uma propriedade mecânica, combatendo a fissuração por tração entre a superfície de contato revestimento/base e, ainda, melhorar a capacidade de suporte de deformações com o aumento da resistência à compressão.

Para Casagrande (2001), as características almeçadas com a inclusão de fibras nem sempre dizem respeito ao aumento da capacidade de suporte do material. Outros aspectos, como maior absorção de energia, queda na redução de resistência pós-pico, maior capacidade de absorver deformações até atingir a resistência última, são exemplos disso.

Para tanto, neste trabalho, pretende-se adicionar fibras de polipropileno ao solo da região oeste do RS, buscando obter maiores valores de resistência ao cisalhamento.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é caracterizar o solo de uma jazida localizada na cidade de Alegrete/RS e realizar, em amostras naturais e acrescidas de porcentagens de fibras de polipropileno, ensaios de cisalhamento direto para obtenção dos parâmetros de resistência.

1.3.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos pretende-se:

- ✓ Caracterizar o solo da jazida previamente escolhida para posterior acréscimo de fibras de 6, 12 e 24 mm de comprimento nas porcentagens de 0,25%; 0,5% e 0,75%;
- ✓ Realizar ensaios de cisalhamento direto para obtenção dos parâmetros de resistência, ângulo de atrito (ϕ') e intercepto coesivo (c') do solo natural e do solo reforçado com as fibras de polipropileno;
- ✓ Verificar se a técnica de melhoramento do solo com fibras é uma alternativa tecnicamente viável.

1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em 5 capítulos:

Capítulo 1 – Apresenta a introdução, o tema da pesquisa, os objetivos gerais específicos e a estrutura do trabalho;

Capítulo 2 – Apresenta a revisão bibliográfica;

Capítulo 3 – Apresenta os materiais e métodos que foram utilizados, a localização da jazida, as características preliminares do solo em estudo, as fibras, porcentagens e ensaios realizados.

Capítulo 4 – Apresenta os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais. São realizadas comparações entre o solo natural e as misturas estudadas. Analisam-se as modificações dos parâmetros físicos e mecânicos das diferentes misturas.

Capítulo 5 – São apresentadas as conclusões obtidas nesta pesquisa, assim como sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Solos Reforçados

2.1.1 Fibras como reforço de solos

O reforço de solos com fibras para obtenção de melhorias é uma técnica comum e muito empregada pela humanidade. Sua utilização data de 3000 a.C e era realizada adicionando-se, de forma geral, materiais vegetais constituídos de fibras resistentes, tais como estivas de junco, hastes de bambu e palha; nos tijolos de barro para auxiliar na construção de diversas obras. Na antiguidade, grandes construções de terra utilizaram esta técnica, tem-se registros do emprego de fibras nos zigurates da Mesopotâmia, Figura 1, na Grande Muralha da China, Figura 2, e em estradas no Peru. No Brasil, encontra-se aplicações na forma de mantas de folhas e galhos sobre camadas de solos moles antecedendo a construção de aterros (AGUIAR; VERTEMATTI, 2004; CASAGRANDE, 2005).

Figura 1 - Zigurate da Mesopotâmia



Fonte: Silva (2010)

Figura 2 - Grande Muralha da China



Fonte: Araújo (2011)

A técnica de reforço de solos com fibras utilizada inicialmente enfocava o reforço de solos através de inclusões distribuídas aleatoriamente dentro de uma massa de solo, avaliando o efeito de raízes e plantas na resistência ao cisalhamento dos solos e na estabilidade de taludes (GRAY E OHASHI, 1983 apud FETUSGATO, 2008). Quando solos reforçados começaram a ser utilizados, o arquiteto francês Henri Vidal em 1963 patenteou a técnica conhecida como "Terra Armada", que consistia na introdução de tiras metálicas conectadas a painéis de concreto que formavam a face do maciço de solo.

Em relação às fibras encontradas no mercado, as de polipropilenos são consideradas as mais promissoras, pois se sobressaem ao oferecer condições satisfatórias de utilização em alguns setores da construção civil. Como aumentam a resistência a tração, sua aplicabilidade é bastante ampla como material de terraplenos, estabilização de solos, pavimentação, além de outras aplicações (TRINDADE et al, 2004).

A inclusão aleatória de fibras gera um compósito bastante interessante para a engenharia geotécnica, o chamado fibrossolo. Dessa forma os solos reforçados com determinados tipos de fibras podem apresentar melhorias em muitos parâmetros de engenharia, tornando-se aptos a desempenhar determinadas funções que anteriormente não poderiam (TRINDADE et al, 2004).

Pela riqueza de publicações a respeito, percebe-se a grande aplicabilidade das fibras no setor da construção civil. Para se fazer uso das fibras como reforço, é preciso analisar cuidadosamente suas características a fim de se conhecer melhor todo o seu entorno, uma vez que cada fibra possui distintas particularidades (SPECHT, 2000).

O fibrossolo consiste na mistura de solo e fibras sintéticas para utilização em pavimentos (SPECHT, 2000; HOMEM, 2002; GONDIM et al.,2008), aterros sobre solos moles, estabilidade de taludes (ZORNBERG, 2002) e em fundações superficiais (CASAGRANDE, 2001; VENDRUSCOLO, 2003).

2.1.2 Materiais Compósitos Cimentados Reforçados com Fibras

Novos materiais são desenvolvidos, geralmente baseados em materiais tradicionais com incorporação de elementos de reforço. Para tanto, as propriedades químicas, físicas e mecânicas dos materiais constituintes e como estes podem ser combinados devem ser conhecidas.

Segundo Budinski e Budinski (2005), materiais compósitos são misturas de dois ou mais materiais diferentes com características inferiores à do material resultante. Sendo, portanto, constituídos de duas fases: a matriz (concretos, silicones, argamassas, solos, entre outras) e o elemento de reforço (fibras, papéis, aço, entre outras) e são desenvolvidos para otimizar os pontos fortes da cada fase.

Para Taylor (2000), Vendruscolo (2003), Santos (2004), Magalhães (2005) e Domone e Illston (2010), o maior potencial das fibras no reforço dos solos está no estado de pós-fissuração, pois estas atuam evitando a propagação de fissuras, contribuindo na resistência do material por aumentar sua capacidade de absorção de energia. Isto se deve ao fato de que a elongação das fibras é muito maior do que a deformação da matriz necessária para o surgimento de fissuras. Para que haja um acréscimo de resistência pré-fissuração do compósito, faz-se necessária a utilização de uma fibra mais rígida que a matriz, e a sua aderência com a matriz deve ser suficiente para impedir os movimentos relativos entre as partes (TAYLOR, 2000).

As fibras, por apresentarem uma adequada resistência mecânica à tração, quando distribuídas aleatoriamente dentro de uma matriz cimentada, não impedem a formação de fissuras no compósito. Elas constituem uma micro-armadura, que se mostra eficaz no combate ao fenômeno de fissuração por retração, conferindo um aumento da ductibilidade da mistura. Mantendo as juntas das fissuras "unidas", as fibras que "amarram" as fissuras contribuem para os aumentos de resistência, da deformação de ruptura e geram uma grande tenacidade a mistura (HANNANT, 1998; TAYLOR, 2000; SARZALEJO ET AL., 2009).

As propriedades que interferem no desempenho dos materiais compósitos são: comprimento, propriedades físicas da matriz e da fibra e a aderência entre as fases

(HANNANT, 1998). A orientação e distribuição das fibras, dentro da matriz, é importante, pois estas devem estar perpendiculares ao plano de ruptura ou fissura, aumentando a sua capacidade de transmitir cargas e atingindo o ápice da sua capacidade de suporte, caso em posição paralela ao plano, as fibras perdem seu efeito (CASAGRANDE, 2005).

Os principais parâmetros que se referem ao desempenho dos materiais compósitos reforçados com fibras foram apresentados por Taylor (2000) e Sarzalejo et al. (2009).

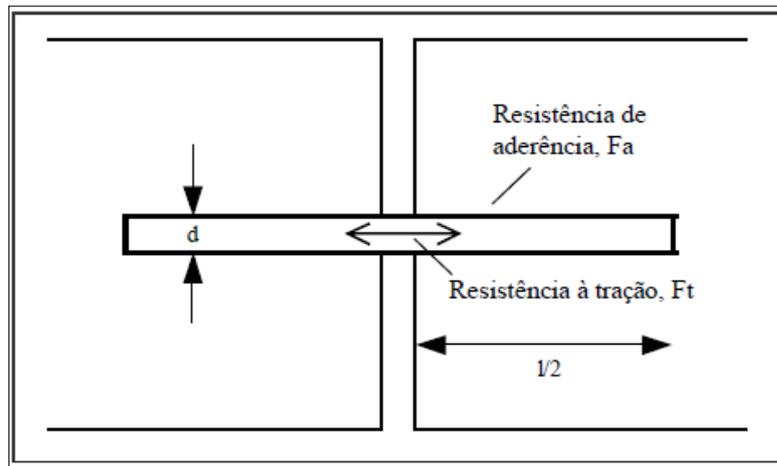
- Teor de fibra: um alto teor de fibra proporciona maior resistência pós-fissuração e menor dimensão das fissuras, desde que as fibras sejam capazes de absorver as cargas adicionais da fissura. Deve-se atentar a quantidade correta de fibras utilizadas na mistura no que se refere a dosagem. Uma dosagem muito baixa não tem efeito nenhum pois a distância relativa entre as fibras é muito grande; já uma dosagem ótima alcança boas possibilidades de interação; e uma dosagem com fibras em excesso dificulta a realização de uma mistura uniforme e fluida;
- Módulo de elasticidade da fibra: altos valores do módulo de elasticidade causariam um efeito similar ao teor de fibra, mas, na verdade, quanto maior o módulo maior a probabilidade de ocasionar o arrancamento das fibras;
- Aderência entre a fibra e a matriz: as características de deformação, resistência e padrões de ruptura de materiais compósitos cimentados com fibras, são dependentes da aderência matriz/fibra. A redução do tamanho das fissuras e a ampliação da sua distribuição pelo compósito está associada à alta aderência entre a matriz e a fibra.
- Resistência da fibra: considerando que não haja o rompimento das ligações de aderência, aumentando-se a resistência das fibras, aumenta-se também a ductibilidade do compósito. A escolha da resistência, na prática, depende das características almejadas no projeto, que contemplam a pós-fissuração, teor de fibra e a aderência matriz/fibra esperadas;
- Comprimento da fibra: para uma certa tensão cisalhante superficial, a fibra será melhor utilizada se, o seu comprimento for suficiente para permitir que esta tensão desenvolva uma tensão atrativa igual à sua resistência à tração. Por isso, quanto maior o comprimento das fibras, menor a possibilidade delas serem arrancadas.

Domone e Illston (2010) e Taylor (2000) apresentam um equacionamento de como seria o equilíbrio de forças no momento da sollicitação da fibra no interior do compósito, como se pode observar nas equações 1 e 2, e evidenciado na Figura 3.

$$\frac{\pi d^2}{4} * Ft = \pi * d * \frac{1}{2} * Fa \quad \dots (1)$$

$$\frac{l}{d} = \frac{Ft}{2 * Fa} \quad \dots (2)$$

Figura 3 - Disposição fibra/fissura ideal



Fonte: Adaptado de Taylor (2000)

Percebe-se a importância da relação l/d (comprimento/diâmetro), ou fator de forma, como é conhecida, que é proporcional ao quociente da resistência à tração da fibra (Ft) e a resistência da aderência entre fibra e matriz (Fa). Se a fibra tem uma alta resistência, deve-se utilizar fibras de alta relação l/d , ou então, a resistência de aderência deverá ser suficiente para impedir o seu arrancamento, antes que a resistência à tração seja totalmente mobilizada.

2.1.3 Tipos de Fibras Empregadas como Reforço

Existe uma grande variedade de fibras que podem ser utilizadas em materiais compósitos fibrosos. As características de cada fibra, que afetam o comportamento do material final, estão ligadas ao material do qual são compostas e ao seu processo de fabricação.

A compreensão dos mecanismos de interação matriz-reforço e das parcelas de contribuição de cada uma das fases no comportamento do compósito são essenciais para a definição do tipo de fibra a ser empregado. Essa escolha dependerá das características da matriz a ser reforçada e das características desejadas do material compósito final (CASAGRANDE, 2005).

Várias pesquisas demonstram que o uso de materiais de reforço com maior capacidade de alongação conduzem a melhores resultados em comparação com a utilização de fibras com módulo muito elevado, como fibras de aço (TAYLOR, 2000). Algumas características devem ser consideradas na escolha da fibra para reforço de materiais: ela deve ser quimicamente neutra e não deteriorável; não sofrer ataque de fungos, bactérias ou álcalis e não ser prejudicial à saúde humana, além de apresentar características físicas e mecânicas adequadas. (CASAGRANDE, 2005; FESTUGATO, 2011, 2008).

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

2.1.3.1 Fibras Naturais

Foram os primeiros tipos de fibras a serem empregados pelo homem. As fibras vegetais utilizadas em materiais compósitos podem ser de bambu, juta, capim elefante, malva, coco, piaçava, sisal, linho e cana-de-açúcar (HANNANT, 1998). Algumas destas fibras podem atingir grandes resistências, como as fibras de bambu, cuja resistência pode superar valores de 100 MPa e módulo de elasticidade situado entre 10 e 25 GPa (MAGALHÃES, 2005).

Para Sales (2011), as fibras naturais vegetais apresentam uma série de vantagens sobre as fibras sintéticas que podem justificar seu uso como reforço em matrizes, tanto cimentícias como poliméricas, entre elas estão:

- conservação de energia;
- grande abundância;
- baixo custo;
- não é prejudicial a saúde;
- possibilidade de incremento na economia agrícola;
- prevenção da erosão;
- baixa densidade;
- biodegradáveis.

Porém, estas fibras vegetais apresentam algumas desvantagens, tais como, por exemplo, a baixa durabilidade quando usada como reforço em matriz cimentícia, ocasionada pela alcalinidade da matriz, a variabilidade de propriedades e também a fraca adesão em seu estado natural a inúmeras matrizes. Devido a variabilidade de propriedades que existe no uso de diversas fibras vegetais, é importante estudar o seu comportamento como reforço em uma matriz, seja ela frágil ou dúctil (SALES, 2011).

2.1.3.2 Fibras Poliméricas

Segundo Casagrande (2001, 2005), a família das fibras poliméricas é a mais promissora no emprego como reforço de solos. Os polímeros, de acordo com sua estrutura química, apresentam diferentes denominações e comportamentos, originando diferentes tipos de fibras.

Vários formatos de fibras vêm sendo empregadas como reforço de solos. Há as chamadas fibriladas, que são fibras de formato trançado que, quando esticadas transversalmente, se "abrem" durante processo de mistura com o solo. Outro formato utilizado são as malhas, que proporcionam um maior intertravamento com as partículas do solo e há ainda o Textsol, que consiste em um filamento contínuo que é distribuído aleatoriamente dentro da massa de solo.

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

- Fibras de polipropileno:

Segundo Hollaway (2010), as fibras de polipropileno são constituídas de um material que adquire consistência plástica com o acréscimo da temperatura, denominado termoplástico. Esse tipo de polímero é composto por séries de longas cadeias de moléculas polimerizadas, separadas de forma que possam deslizar umas sobre as outras.

Possuem módulo de elasticidade em torno de 8 GPa (menor que as demais fibras) e resistência à tração de aproximadamente 400 MPa; em função de sua constituição apresentam grande flexibilidade e tenacidade. Além disso, mostram-se resistentes ao ataque de várias substâncias químicas e aos álcalis (TAYLOR, 2000).

Estas características conferem a matriz em que são incorporadas, uma relevante resistência ao impacto.

- Fibras de polietileno:

As fibras de polietileno têm fraca aderência com a matriz cimentada, possuem baixo módulo de elasticidade e são altamente resistentes aos álcalis. Sua durabilidade é alta, mas apresentam maiores deformações por fluência (HANNANT,1998). Para Girardello (2010), uma forma de minimizar o problema da baixa aderência e módulo, é o desenvolvimento de um polietileno de alta densidade.

- Fibras de poliéster:

O poliéster apresenta alta densidade, rigidez e resistência, conferindo estas características às fibras feitas deste material. Possuem o mesmo aspecto das fibras de polipropileno e podem ser utilizadas para as mesmas aplicações (TAYLOR, 2000). Um dos poliésteres mais conhecidos é o atualmente utilizado como matéria prima na fabricação de garrafas plásticas do tipo "PET" e conhecido como polietileno tereftalato (PET) (HOMEM, 2002).

- Fibras de Poliamida (Kevlar):

A fibra de poliamida aromática, conhecida comercialmente como Kevlar, é a fibra orgânica de maior sucesso. Existem dois tipos de Kevlar: o Kevlar 29, que apresenta resistência mecânica de aproximadamente 300 MPa e módulo de elasticidade médio da ordem de 64 GPa, e o Kevlar 49, cuja resistência é igual ao do Kevlar 29, mas que tem módulo de 300 GPa (HOLLAWAY, 2010). Segundo Taylor (2000), polímeros com cadeias de moléculas muito longas possuem baixa resistência e rigidez, já que suas moléculas são espiraladas e dobradas. Contudo, se as moléculas estiverem esticadas e reforçadas durante a manufatura, altas resistências e módulos podem ser alcançados.

2.1.3.3 Fibras Minerais

Quanto à família das fibras minerais, pode-se citar como exemplo: a de carbono, de vidro e de amianto, apresentadas na sequência:

- Fibras de carbono:

Apresentam alta resistência à tração e podem ser divididas em duas categorias: fibras de alta resistência com módulo de elasticidade de 240 GPa e fibras de alto módulo, com módulo de elasticidade em torno de 420 GPa, características baseadas em sua alta resistência nas ligações entre os átomos de carbono e sua leveza. Tais características tornam imprescindível uma grande aderência entre a matriz e as fibras, caso contrário as fibras serão arrancadas sob cargas menores (SANTOS, 2004; TAYLOR, 2000).

- Fibra de Vidro:

Cerca de 99% das fibras de vidro são produzidas a partir do vidro tipo E. Por esta razão, são suscetíveis ao ataque dos álcalis presentes nos materiais compostos por cimento Portland. Observa-se que uma fibra conhecida comercialmente como "Cem-Fil" e resistente aos álcalis está sendo desenvolvida para o uso em pastas cimentadas (SANTOS, 2004).

As fibras de vidro geralmente são manufaturadas na forma de "cachos", ou seja, fios compostos de centenas de filamentos individuais. Seu diâmetro depende das propriedades do vidro, tamanho e do furo por onde serão extrusados e da velocidade de extrusão, mas normalmente são da ordem de 10 μm (TAYLOR, 2000).

- Fibra de Amianto:

A fibra de amianto possui um módulo de elasticidade em torno de 160 GPa e resistência a tração em torno de 1000 MPa, seu diâmetro é muito pequeno, da ordem de 1 μm . Podendo ser este o fator que explica sua excelente aderência à matrizes cimentadas (SANTOS, 2004).

Segundo Festugato (2008), Casagrande (2001, 2005) e Santos (2004), estas fibras, quando cortadas, liberam partículas muito pequenas, já que apresentam diâmetros muito pequenos, danificando os alvéolos pulmonares quando aspiradas pelo homem. Por conta disso, em muitos países, há manifestações para coibir seu uso na construção civil. Outro problema desta fibra é o fato de possuir comportamento frágil e baixa resistência ao impacto.

2.1.3.4 Fibras Metálicas

Dentre a família das fibras metálicas, as mais comuns são as fibras de aço. As fibras utilizadas na construção civil possuem fator de forma na faixa de 30 a 50, comprimento variando de 0,1 a 7,62 cm e diâmetro entre 0,13 e 0,9 mm. A ruptura do compósito é geralmente associada ao arrancamento da fibra e não à sua ruptura (SPECHT, 2000; SANTOS, 2004; CASAGRANDE, 2005, 2001; MAGALHÃES, 2005; FESTUGATO, 2008).

A resistência à tração é da ordem de 1100 MPa e o módulo de elasticidade de 200 GPa. Este tipo de fibra possui uma grande variedade de formatos para ter sua resistência ao arrancamento aumentada. Podem apresentar problemas de corrosão, dependendo do meio em

que serão inseridas. Uma técnica utilizada para minimizar tal problema é o banho de níquel (TAYLOR, 2000). Seu formato pode ser bastante variável, aumentando sua aderência com a matriz (HANNANT, 1998).

2.1.4 Alterações nas Propriedades dos solos pela inclusão de Fibras

São apresentadas, a seguir, as alterações de comportamento dos solos em função da adição de fibras. Estas alterações são relacionadas à resistência, rigidez inicial, modo de ruptura e variação granulométrica.

2.1.4.1 Compactação

Na fase de compactação pode ser detectado o primeiro efeito provocado pela inclusão de fibras ao solo, por meio do aumento no índice de vazios deste, mantendo-se constante a energia de compactação. Este efeito pode ser mais ou menos pronunciado dependendo do atrito desenvolvido entre solo e reforço (SALES, 2011).

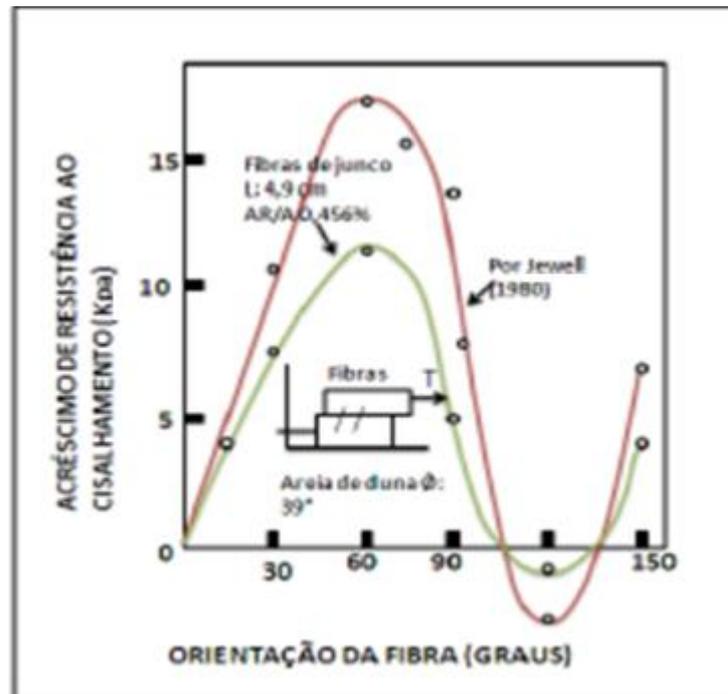
Para Hoare (1979), por meio de ensaios de compactação mostra-se que a inclusão de fibras distribuídas de forma aleatória em solos arenosos, com energia de compactação constante, resulta em aumento de porosidade. Este aumento é relacionado de maneira proporcional com a quantidade de fibras.

Tal efeito não é alterado pelo método de compactação e se dá com maior ou menor intensidade dependendo do tipo de fibra. Sob essas condições, o autor classifica a interação entre o solo e o reforço como um fator muito importante na fase de compactação da mistura. Isto inclui fatores tais como a distribuição granulométrica, o formato das partículas do solo, a textura superficial do reforço e sua superfície específica (HOARE, 1979).

2.1.4.2 Resistência ao Cisalhamento de Pico

As características almeçadas com a inclusão de fibras nem sempre dizem respeito a um aumento da capacidade de suporte do material. Pode englobar vários outros aspectos, como maior capacidade de absorção de energia (maior resistência ao impacto), queda na redução de resistência pós-pico (para o caso de materiais mais frágeis), maior capacidade de absorver deformações até atingir a resistência última, entre outros, visto na Figura 4.

Figura 4 - Acréscimo da resistência em função da inclinação da fibra



Fonte: Adaptado de Gray Ohashi, 1983 apud Casagrande 2001

Para tensões confinantes baixas, a inclusão de fibras afeta a parcela friccional da resistência. Para tensões maiores existe um ponto que define uma clara mudança no mecanismo de interação solo-fibra a partir da qual a parcela friccional atinge o mesmo patamar do solo sem reforço, correspondendo à alteração de comportamento somente a parcela coesiva. A tensão de confinamento correspondente à mudança no mecanismo de interação solo-fibra é então definida como a tensão de confinamento crítica, caracterizando o ponto onde a resistência ao cisalhamento, desenvolvida na interface solo-fibra, se iguala ou supera a resistência à tração da fibra. Abaixo da tensão crítica, a resistência última à tração da fibra é maior e a forma de ruptura nas zonas de cisalhamento do material compósito se dá por deslizamento entre solo e fibra (MAHER; GRAY, 1990).

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

Um estudo feito por Machado et al. (1998) analisou o comportamento da mistura solo-cimento reforçada com fibra sintética, com base nos ensaios de CBR e compressão simples, visando seu emprego em estradas florestais. No experimento, trabalhou-se com um solo arenoso (saprólito de gnasse), cimento Portland no teor de 2% e 4%, fibras de polipropileno

no qualitativo de 0,5% e comprimento variável considerando-se as energias de compactação dos ensaios Proctor Normal e Intermediário, e concluiu-se que o uso da mistura solo-cimento reforçado com fibra sintética obteve um acentuado índice de CBR, e a expansibilidade da mistura e do solo natural praticamente se mantiveram inalterados, ou seja, a adição das fibras à mistura melhora as características mecânicas do solo.

2.1.4.2.1 Materiais Argilosos

Segundo Maher e Ho (1994), a inclusão de fibras tem influência significativa nas propriedades mecânicas de argilas cauliníticas. Por meio de uma série de ensaios de compressão não confinada e diametral, os autores observaram um aumento do pico de resistência à compressão e tração, assim como o aumento da ductibilidade do material. Constataram, também, que o aumento da quantidade de fibras aumenta a resistência à tração e à compressão, porém, o aumento do comprimento das fibras diminui a contribuição destas para os mesmos aspectos. A umidade do solo no momento da compactação também afeta essas relações, sendo elas mais expressivas para menores umidades (NATARAJ et al., 1996).

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

Com relação à coesão há um consenso de que esta é acrescida pela inclusão de fibras (BUENO et al., 1996; NATARAJ et al., 1996; TEODORO, 1999; HEINECK, 2002). Quanto maior for à quantidade de fibras, maiores serão os acréscimos no ângulo de atrito do reforço (TEODORO, 1999; HEINECK, 2002).

2.1.4.2.2 Materiais Granulares

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

Montardo (1999) relatou o aumento do ângulo de atrito interno de uma areia uniforme com e sem cimentação artificial, reforçada com diferentes tipos de fibras. Com relação ao intercepto coesivo, o autor encontrou um aumento para a areia não cimentada reforçada com fibras de polipropileno. Para Vendruscolo (2003), as fibras possuem a característica de

conferir um intercepto coesivo ao solo arenoso, além de proporcionarem um aumento do ângulo de atrito já para o solo cimentado, as fibras têm a influência maior sobre a coesão última e ângulo de atrito último.

Em se tratando de materiais cimentados, quanto maior é a quantidade de cimento adicionada ao solo, menos evidente é o acréscimo de resistência causado pela adição das fibras (CONSOLI et al. 1999).

2.1.4.2 Resistência ao Cisalhamento Pós-Pico

Praticamente todos os trabalhos que analisaram o comportamento de solos reforçados em termos de resistência concluíram que a adição de fibras reduz a queda de resistência pós-pico (CONSOLI et al., 1999; VENDRUSCOLO, 2003; DONATO et al., 2004; CASAGRANDE, 2005; CASAGRANDE et al., 2006; FESTUGATO, 2008).

2.1.4.3 Deformabilidade

Maher e Ho (1994) e Nataraj et al. (1996), relataram que, em argilas há um aumento no módulo de deformação, tanto quanto maior o teor de fibras. Já para areias cimentadas e não cimentadas obteve-se redução do módulo de deformação com a inclusão de fibras (ULBRICH, 1997; CONSOLI et al., 1999).

Para Heineck (2002), a taxa de deformação onde as fibras passam a contribuir de forma mais significativa para o acréscimo de resistência ao cisalhamento depende do tipo de matriz. A inclusão de fibras é de grande importância na deformabilidade resiliente, pois reduzem seu módulo em 65% (DONATO et al., 2004).

2.1.4.4 Modo de Ruptura

O aumento da ductibilidade do solo com a adição de fibras é uma observação feita na maioria dos trabalhos que avaliaram este parâmetro, sendo este aumento mais evidente quanto maior a quantidade de fibras (HOARE, 1979; MAHER; HO, 1993; NATARAJ et al., 1996; CONSOLI et al., 1999).

A inclusão de fibras de polipropileno no compósito de matriz cimentada altera significativamente o seu modo de ruptura. Com a inclusão das fibras o comportamento do material na ruptura, antes frágil, passa a ser dúctil. Estas constatações resultaram da análise

dos índices de fragilidade e da verificação visual da ausência ou presença de planos de ruptura nos corpos de prova rompidos (MONTARDO, 1999).

Specht (2000) avaliou os efeitos da inclusão de fibras poliméricas de diferentes propriedades mecânicas (uma em forma de filamentos e outra fibrilada - tipo *mesh*) em um solo cimentado artificialmente e obteve como resultados um comportamento dúctil, de um material antes frágil, através da inserção das fibras mais alongáveis (forma de filamentos). Já para as fibras do tipo *mesh*, mais rígidas, não houve uma modificação no modo de ruptura do material.

A forma de ruptura de um solo é alterada pela inclusão de fibras de polipropileno, reduzindo a sua fragilidade. A amplitude dessas alterações depende necessariamente de uma boa adesão solo-fibra, que pode ser atingida pela ação de um agente cimentante ou por uma combinação apropriada dos fatores de comprimento da fibras e tensões efetivas médias normais atuantes (FEUERHARMEL, 2000).

2.1.4.5 Variação Volumétrica

Bueno et al. (1996) observou um aumento da compressibilidade do solo com a inclusão de fibras. Para Nataraj et al. (1996) a deformação volumétrica aumenta com o acréscimo da quantidade de reforço, porém, de forma não linear.

A inclusão de fibras afeta o comportamento compressivo de uma areia, pois modifica a localização da Linha Isotrópica de Compressão do material. Quando o material reforçado é submetido à compressão isotrópica, o movimento relativo dos grãos sob altas tensões conduz as fibras a sofrerem deformações plásticas de tração, onde estas se alongam em primeira instância, podendo atingir a ruptura (CONSOLI et al., 2005).

2.1.4.6 Rigidez Inicial

O efeito do reforço fibroso na rigidez inicial do compósito depende das características do mesmo. Montardo (1999) observou uma queda acentuada da rigidez inicial de uma areia cimentada reforçada com fibras de polipropileno. No entanto, as fibras de polietileno tereftalato e de vidro não causaram alteração no módulo.

A intensidade das alterações no módulo de elasticidade também dependem do tipo e características de cada solo. Estudos realizados por Feuerharmel (2000), em argila e areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno, indicaram grande redução do módulo, enquanto

os ensaios realizados em areias reforçadas mostraram pequenas alterações. Já, se consideradas as misturas cimentadas reforçadas com fibras, as reduções foram bastante acentuadas para os três solos analisados.

Segundo resultados obtidos por Heineck (2002), não houve alterações do G_0 do solo arenoso quando adicionados de fibras. Os módulos de deformação cisalhante de três diferentes materiais, areia siltosa, areia fina uniforme e cinza de fundo, a pequenas deformações, não foram afetados pela introdução de fibras de polipropileno.

2.1.4.7 Condutividade Hidráulica e outras Propriedades

Maher e Ho (1994) observaram um aumento da permeabilidade de solos argilosos, sendo esse aumento proporcional a quantidade de fibras inseridas no compósito, para 4% de fibra (polipropileno e vidro). Em solos granulares há uma redução da permeabilidade de uma ordem de grandeza, causada pela adição de fibras (BUENO et al., 1996).

Valores bem mais elevados de condutividade hidráulica podem ser obtidos no momento em que são adicionadas fibras e cimento ao material argiloso, através da floculação das partículas de argila ocorre a aglomeração destas ao redor de partículas de cimento, ocasionando na segregação das fibras (FEUERHARMEL, 2000).

Segundo Heineck (2002), para todas as matrizes estudadas, a adição de 0,5% de fibras de polipropileno de 24 mm não causou mudanças significativas na condutividade hidráulica do material.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta as informações gerais sobre a região estudada, as características dos materiais empregados na pesquisa, os critérios adotados na escolha destes e os métodos utilizados para a realização dos experimentos laboratoriais.

3.1 Materiais

3.1.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa é descrito como um solo residual, substrato de arenito, pertencente à formação denominada Botucatu. A jazida de onde foram retiradas as amostras, está localizada no município de Alegrete/Rio Grande do Sul, no 6º Sub-distrito Estrada Alegrete/Catimbau, a aproximadamente 8 Km do centro da cidade. Esta jazida pertence à empresa Pedra Rosada e o solo já vem sendo utilizado em obras correntes na cidade de Alegrete e Região. O Quadro 1 apresenta as coordenadas geográficas da jazida obtidas através de GPS (georeferenciamento), na Figura 5 é apresentada a vista superior da jazida.

Quadro 1- Coordenadas geográficas da jazida

Ponto	Coordenadas
884	S29°50'15,5"
	WO55°46'28,4"
893	S29°50'11,7''
	WO55°46'27,8''
892	S29°50'13,4''
	WO55°46'30,9''
889	S29°50'16,2''
	WO55°46'26,8''
895	S29°50'12,8''
	WO55°46'22,5''
894	S29°50'10,2''
	WO55°46'24,4''

Fonte: Próprio Autor

Figura 5 - Localização georeferenciada da jazida da Pedra Rosada



Fonte: Próprio Autor

3.1.2 Fibras

As fibras utilizadas como reforço são poliméricas de polipropileno e estão disponíveis no mercado na forma de pequenos filamentos. Tais fibras foram escolhidas pois apresentam características uniformes e bem definidas, por serem inertes quimicamente e por estarem disponíveis em grande quantidade no comércio.

Neste trabalho foram utilizadas as fibras de polipropileno comercializadas pela Macaferri do Brasil Ltda. e conhecidas no mercado como FibroMac®. Foram estudados os comprimentos de 6, 12 e 24 mm, com índices de aspecto de 333, 667 e 1333, respectivamente. A Tabela 1 apresenta as principais características das fibras, definidas pelo fabricante. A Figura 6 mostra o aspecto das fibras de polipropileno.

Tabela 1 - Características Mecânicas da Fibra de Polipropileno

Fibras	Densidade (10 ³ Kg/m ³)	Módulo de Elasticidade (KN/mm ²)	Resistência à tração (KN/mm ²)	Alongamento na Ruptura (%)
Polipropileno	0,9	5 a 7	0,5 a 0,75	8

Fonte : Adaptado de Sarzalejo et al. (2009)

Figura 6 - Fibras de Polipropileno



Fonte : Maccaferri

3.1.3 Água

Foi utilizada a mesma água fornecida para consumo na cidade de Alegrete/RS, pela Companhia Riograndense de Saneamento, (CORSAN), para a produção dos corpos de prova e execução dos ensaios.

3.2 Metodologia

A metodologia empregada para a execução desta pesquisa é essencialmente experimental, consistindo de 3 etapas principais, sendo a primeira etapa a coleta e preparação do solo, a segunda composta pela preparação dos corpos de prova com amostras de solo natural e com a inclusão de fibras em diferentes proporções e comprimentos. A terceira consistiu na execução dos ensaios; foram três ensaios principais, detalhados na sequência deste capítulo.

3.2.1 Etapa de laboratório

De forma a cumprir com os objetivos, supracitados no Capítulo 1 deste trabalho, foram realizados ensaios de caracterização, compactação e cisalhamento direto nas amostras de solo natural e solo acrescido de fibras.

3.2.1.1 Coleta e Preparação do Solo

As amostras de solo foram coletadas na jazida de origem, no estado deformado com auxílio de uma pá de corte em quantidade suficiente para realização dos ensaios de laboratório, conforme pode ser visto na Figura 7. O material coletado foi acondicionado em sacos plásticos com posterior secagem ao ar. Após seco, foi destorroado, quarteado e passado na peneira nº 40 com abertura nominal de 0,42 mm para realização dos ensaios de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP) e na peneira nº 4 com abertura nominal de 4,8 mm para realização dos ensaios de compactação, granulometria e cisalhamento direto.

Figura 7 – (A) Solo no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UNIPAMPA; (B) Solo em processo de destorroamento



Fonte: Próprio Autor

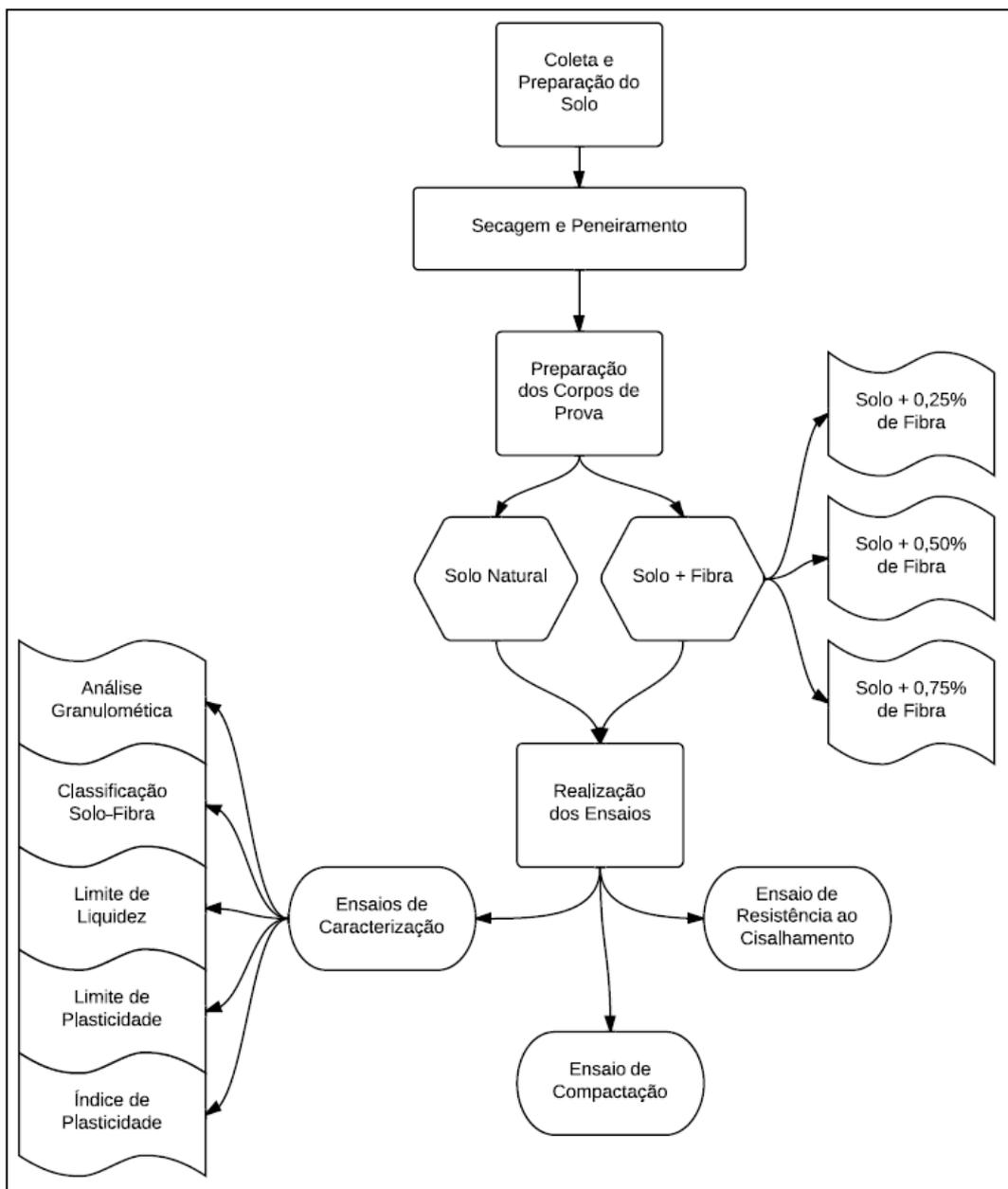
3.2.1.2 Dosagem e Mistura

A preparação dos corpos de prova foi realizada em duas fases: mistura dos componentes e moldagem. A quantidade de fibras adicionada à mistura foi determinada em relação à massa do solo seco. O peso de água foi calculado em relação ao peso total da matéria prima seca (solo, solo+fibra). A Figura 8 apresenta o fluxograma completo do programa experimental desta pesquisa. Todos os materiais foram pesados em balança com precisão de 0,01g. As amostras ensaiadas foram:

- Solo Natural: 4 Amostras no ensaio seco e 4 amostras no ensaio saturado;
- Solo + Fibra de 6 mm de comprimento:
 - Solo + 0,25% de Fibra: 4 amostras no ensaio seco;
 - Solo + 0,5% de Fibra: 4 amostras no ensaio seco;
- Solo + Fibra de 12 mm de comprimento:

- Solo + 0,25% de Fibra: 4 amostras no ensaio seco e 4 amostras no ensaio saturado;
- Solo + 0,5% de Fibra: 4 amostras no ensaio seco e 4 amostras no ensaio saturado;
- Solo + 0,75% de Fibra: 4 amostras no ensaio saturado;
- Solo + Fibra de 24 mm de comprimento:
 - Solo + 0,25% de Fibra: 4 amostras no ensaio seco;
 - Solo + 0,5% de Fibra: 4 amostras no ensaio seco.

Figura 8 - Fluxograma de Ensaio



Fonte: Próprio Autor

Para garantir o melhor desempenho do conjunto solo/fibras, as fibras foram espalhadas de forma uniforme dentro das amostras. Foram testados dois métodos de mistura, manual e mecânico. Inicialmente se optou pela mistura manual do material, não atingindo desta forma uma mistura homogênea.

Como pode ser visto na Figura 9 (A) a mistura manual fez com que as fibras não abrissem no solo. Já com a utilização de uma bateadeira planetária, Figura 10 (A, B e C), foram colocadas as porcentagens de solo e fibras, a uma velocidade de 85 RPM por 10 minutos (5 minutos amostra seca + 5 minutos amostra acrescida de água, na umidade ótima), resultando em uma melhor abertura das fibras e conseqüentemente em um melhor entrosamento entre os materiais, Figura 9 (B, C).

O método de mistura foi testado inicialmente com as fibras de comprimento de 12 mm, obtendo êxito, quando aplicado o mesmo método de mistura aos comprimentos de 6 e 24 mm, não houve uma mistura homogênea do material, ocorrendo o aparecimento de "novelos" no caso da fibra de 6mm e "grumos" com alta concentração de fibras e umidade na mistura com fibra de 24 mm. O aspecto das misturas pode ser visto na Figura 11 (A, B e C). Apesar dos problemas encontrados, o método de mistura foi mantido para que os resultados do ensaio de cisalhamento direto pudessem ser comparados entre si.

Figura 9 - (A) CP moldado com fibras mal abertas; (B) CP moldado com fibras bem abertas; (C) Detalhe da abertura e distribuição das fibras.



Fonte: Próprio Autor

Figura 10 - (A) Batedeira planetária utilizada; (B) Amostra antes de misturada; (C) Amostra após 10 minutos na batedeira planetária.



Fonte: Próprio Autor

Figura 11 - (A) Fibra de 6 mm; (B) Fibra de 12 mm e (C) Fibra de 24 mm.



Fonte: Próprio Autor

Nos ensaios de compactação foi utilizado para moldagem o cilindro de Proctor com volume de 1000 cm^3 , a compactação foi do tipo dinâmica realizada em três camadas com

energia normal do Proctor, utilizado o soquete pequeno com 26 golpes por camada, conforme Figura 12 (A,B).

Figura 12 - (A) Molde Utilizado; (B) Soquete utilizado.



Fonte: Próprio Autor

Para a obtenção dos corpos de prova destinados aos ensaios de cisalhamento direto inicialmente pensou-se na obtenção das amostras de forma indeformada através de compactação normal do Proctor no cilindro de 10cm de diâmetro por 12,7 cm de altura, mostrado na Figura 13. Após o término da moldagem, as amostras seriam extraídas do corpo de prova por cravamento do molde cortante do equipamento de cisalhamento direto e posterior desbaste e nivelamento das duas faces de modo que o molde fique totalmente preenchido, como pode ser visto na Figura 14.

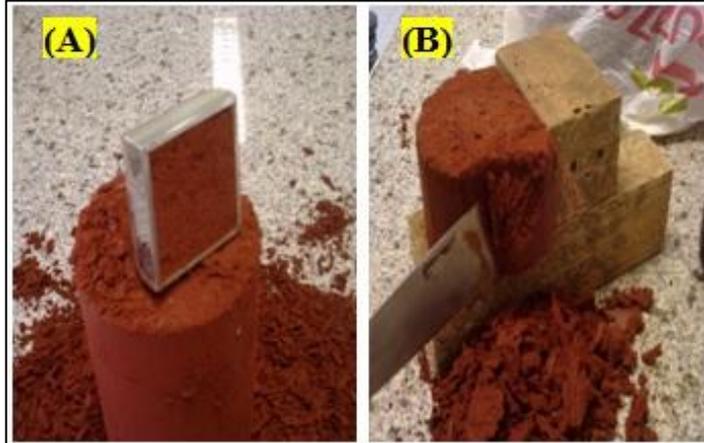
Infelizmente esse procedimento de compactação e moldagem não obteve sucesso, pois no momento da cravação do molde no corpo cilindro, este acabava por apresentar grandes fissuras, provenientes do entrosamento das fibras com o solo.

Figura 13 - (A) Cilindro usado na compactação, energia normal do Proctor; (B) Corpo de Prova obtido.



Fonte: Próprio Autor

Figura 14 - Moldagem das amostras indeformadas a partir do CP: (A) Cravamento do molde; (B) Desbastes e nivelamento das faces.

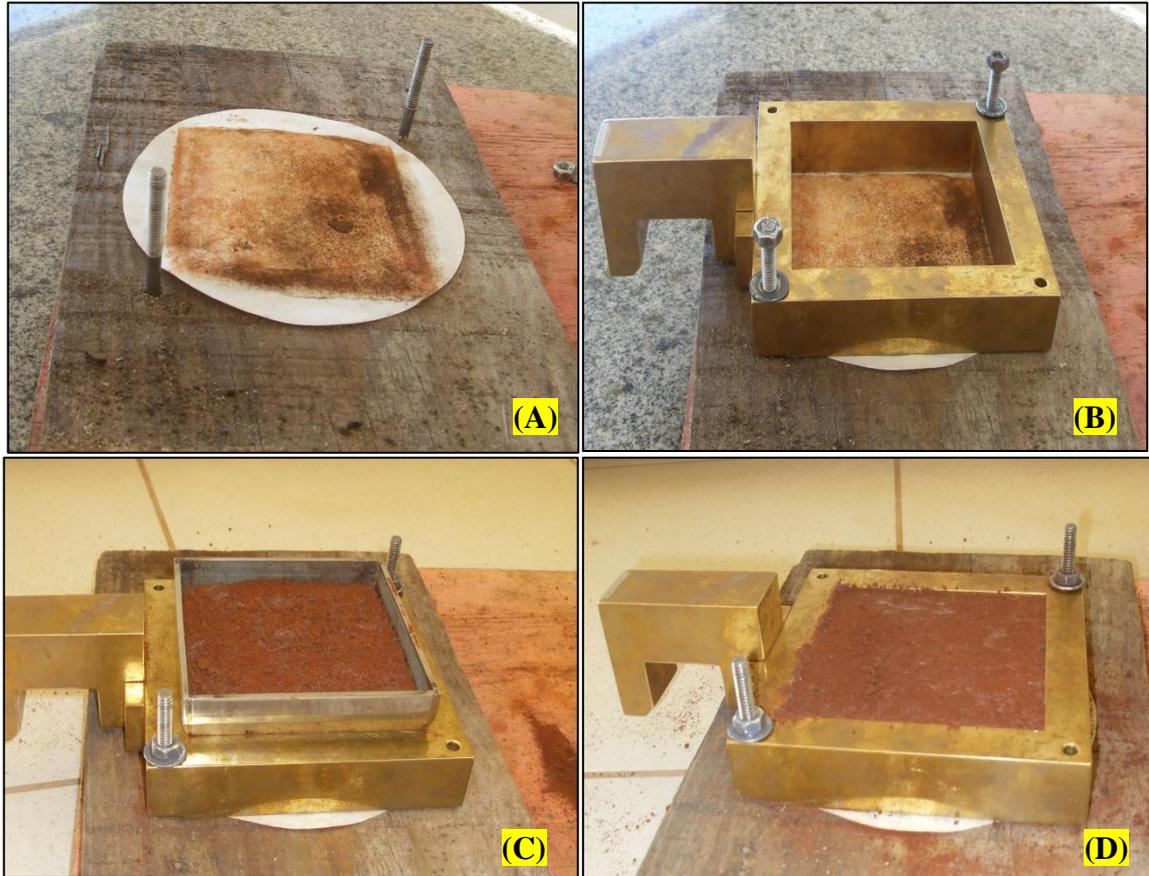


Fonte: Fernandes (2013)

Optou-se então pela compactação estática, onde os corpos de prova foram obtidos através da prensagem de uma única camada de amostra dentro da própria célula de ensaio, Figura 15. A Figura 16 (A) mostra o dispositivo adaptado para moldagem do corpo de prova, a célula foi fixada a base por parafusos laterais para evitar o "repique" do compactador e o "vazamento" de solo pelas laterais.

Para garantir uma homogeneização do corpo de prova, este foi confeccionado reproduzindo-se a energia de compactação normal do Proctor para um novo volume de solo. Os corpos de prova foram moldados diretamente na célula bipartida superior da célula de ensaio de cisalhamento direto, obedecendo o tamanho do vazador (10 x 10 x 2cm / comprimento x largura x altura), utilizando 320 gramas de amostra de solo e solo+fibra em única camada, com um número de 16 golpes, recalculado através da Eq. (1). Os golpes foram desferidos sobre o tarugo de madeira no sentido horário para que a carga fosse transmitida igualmente em toda a amostra, conforme Figura 16 (B).

Figura 15 - Dispositivo para moldagem: (A) Papel filtro; (B) Célula superior da caixa bipartida fixada; (C) Amostra acondicionada na célula; (D) Amostra após compactação.



Fonte: Próprio Autor

Figura 16 - Compactação Estática: (A) Tarugo de madeira disposto sobre amostra; (B) Amostra compactada com 16 golpes na energia normal do Proctor.



Fonte: Próprio Autor

$$EC = \frac{M * H * Ng * Nc}{V} \quad \dots (3)$$

Onde:

M: massa do soquete;

H: altura de queda do soquete;

Ng: número de golpes por camada;

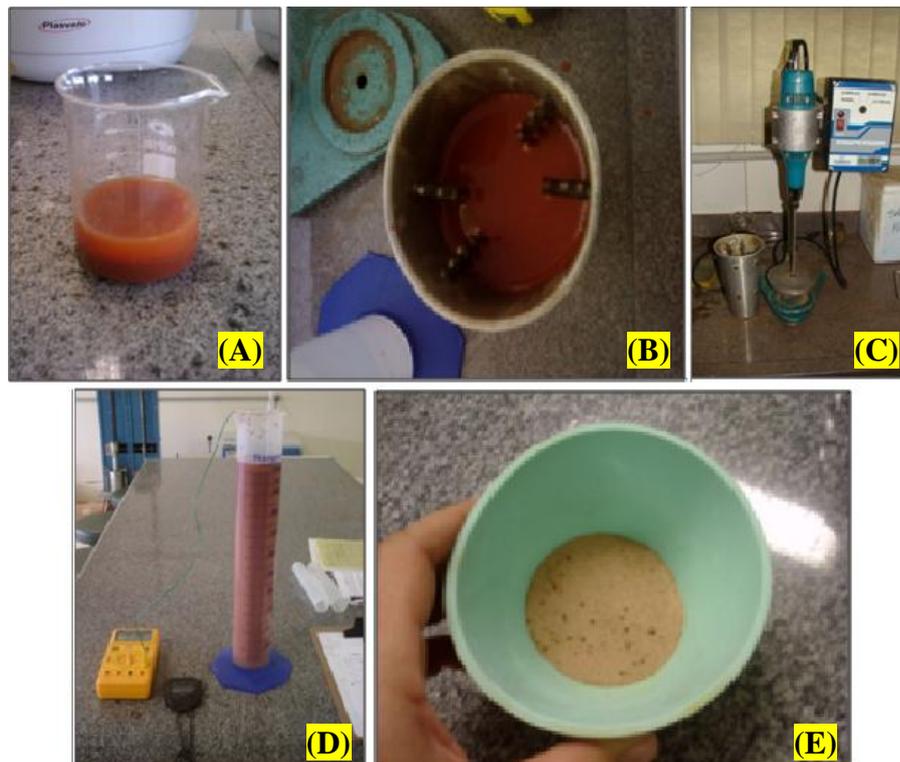
Nc: número de camadas;

V: volume de solo compactado.

3.2.1.3 Ensaios de Caracterização

Os ensaios de caracterização foram realizados somente para as amostras de solo natural. A análise granulométrica, das amostras de solo natural, foi realizada conforme a norma NBR 7181/1984, que prescreve o método de análise granulométrica do solo por peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento, sendo o segundo método empregado nesta pesquisa, Figuras 17 e 18.

Figura 17 - Realização do Ensaio de Sedimentação: (A) Amostra com defloculante; (B) Amostra no dispersor; (C) Aparelho de dispersão; (D) Ensaio de Sedimentação; (E) Amostra após ensaio.



Fonte: Próprio Autor

Figura 18 - Realização do Ensaio de Análise Granulométrica.



Fonte: Próprio Autor

O Limite de Liquidez foi determinado pelo método de ensaio da NBR 6459/84. Para execução desses ensaios, foi utilizado o aparelho de Casagrande, Figura 19.

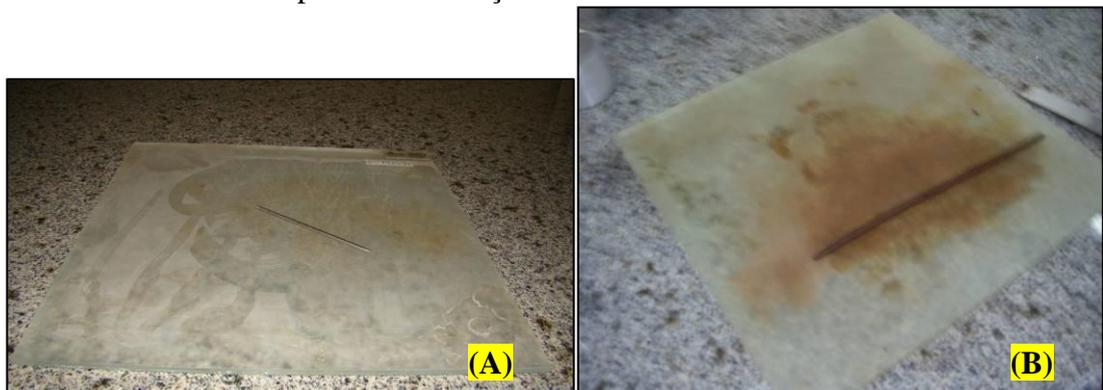
Figura 19 - Aparelho de Casagrande



Fonte: Próprio Autor

O Limite de Plasticidade (LP) foi determinado pelo ensaio da NBR 7180/84. Para execução desses ensaios, foram utilizados dispositivos como mostrado na Figura 20.

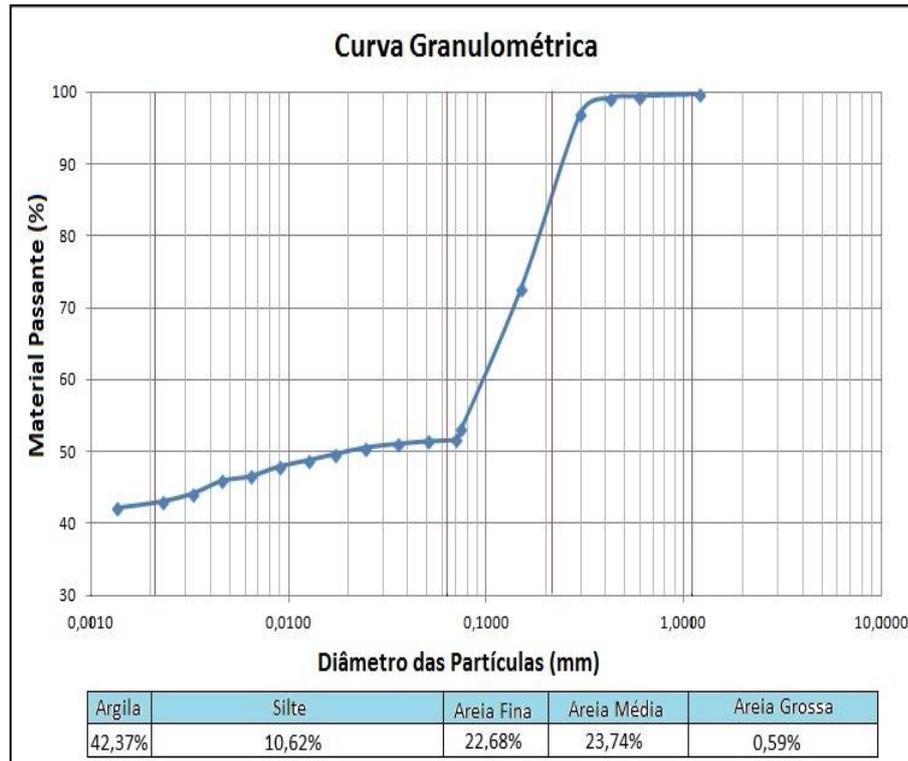
Figura 20 - Material utilizado para determinação do LP



Fonte: Próprio Autor

O Gráfico 1 apresenta a distribuição granulométrica do solo, descrito como uma areia argilo siltosa. Pelo Sistema Unificado de Classificação (SUCS) o solo é considerado uma argila magra arenosa e pelo Sistema de Classificação Rodoviário (AASHTO) é considerado um solo argiloso da categoria A-6 com índice de grupo (IG) igual a 11, com LL=30%, LP=22% e IP=8%.

Gráfico 1 - Análise Granulométrica do solo natural



Fonte: Próprio Autor

3.2.1.4 Ensaios de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados em amostras de solo natural, para determinação dos valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima. Na realização do ensaio foi utilizada energia normal de compactação, utilizando cilindro e soquete pequenos, conforme Figura 21, compactando o solo em 3 camadas com 26 golpes cada. A metodologia do ensaio seguiu a NBR 7182/1986, sendo realizado logo após a mistura solo/água.

Maher e Ho (1994), Bueno et al. (1996), Nataraj et al. (1996), Ulbrich (1997) e Consoli et al. (1999) afirmam que não há influência significativa nos parâmetros de compactação com

adição de pequenas quantidades (até 2%) de fibra, mantendo-se constantes a umidade ótima e densidade máxima. Os resultados obtidos por Gondim (2008) concordam com esta afirmativa.

Portanto não foram realizados ensaios de compactação para as misturas solo/fibras, adotando-se como padrão os resultados obtidos no ensaio com solo natural.

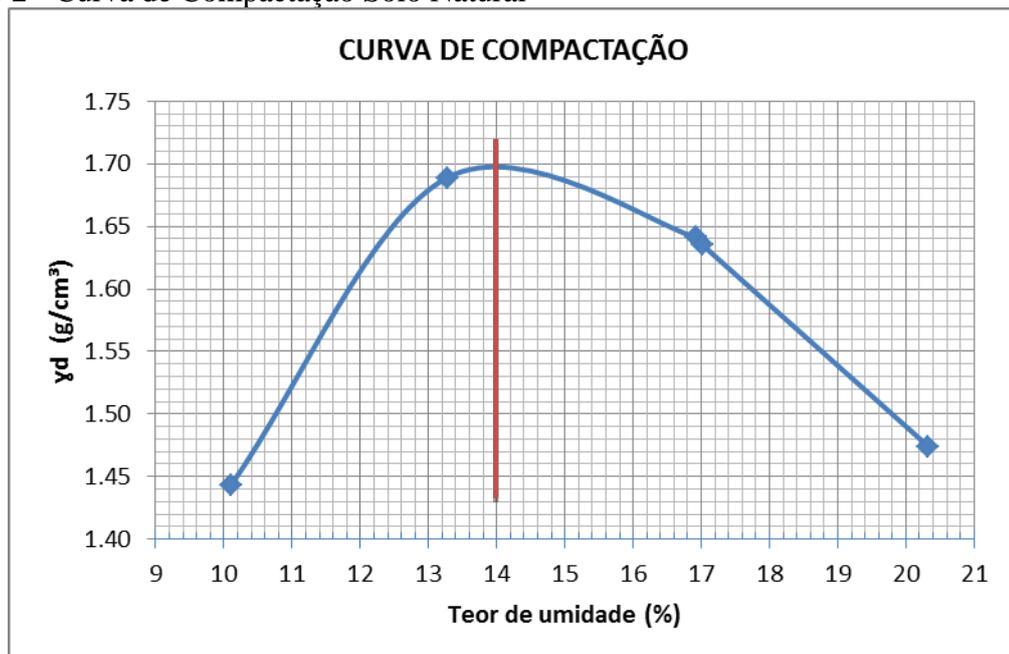
Figura 21 - Ensaio de Compactação: (A) Materiais Utilizados; (B) Realização do ensaio; (C) Amostras.



Fonte: Próprio Autor

A umidade ótima encontrada no ensaio de compactação para o solo natural foi de 14% e o peso específico aparente seco máximo foi de $\gamma_d = 1,69 \text{ g/cm}^3$, o Gráfico 2 apresenta a curva de compactação encontrada para o solo natural.

Gráfico 2 - Curva de Compactação Solo Natural



Fonte: Próprio Autor

3.2.1.4 Ensaios de Cisalhamento direto

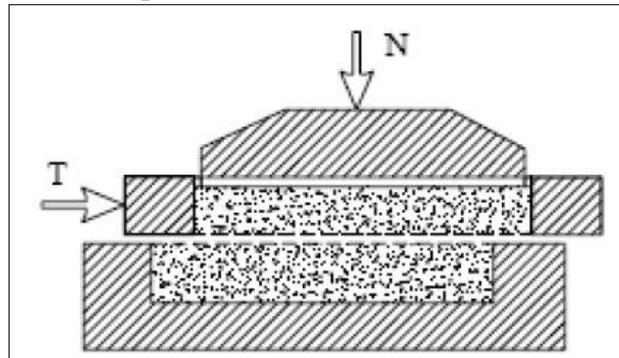
A terceira etapa executada foi à realização dos ensaios de cisalhamento direto, que, segundo Pinto (2006) é o mais antigo dos ensaios para se determinar a resistência de cisalhamento de um solo, e leva em consideração o critério de Coulomb.

O ensaio consiste em se determinar, sob uma tensão normal (σ), qual a tensão de cisalhamento é capaz de provocar a ruptura de uma amostra de solo colocada em uma caixa composta de duas partes deslocáveis entre si. Na Figura 22 pode-se observar o esquema da caixa bipartida utilizada nos ensaios. Para a obtenção da tensão normal (σ) e da tensão cisalhante (τ), deve-se conhecer as forças T e N e dividi-las pela área da seção transversal do corpo de prova.

A Figura 23 demonstra todos os acessórios necessários para o ensaio de cisalhamento direto. A sequência de montagem da caixa bipartida compreende as seguintes etapas:

- 1ª) Colocar o fundo removível com canais longitudinais (2) na célula bipartida inferior (10 cm) (1);
- 2ª) Sobre o fundo removível (4) colocar a pedra porosa (3);
- 3ª) Sobre a pedra porosa (3) inserir o papel filtro (4) cortado na mesma dimensão que a pedra porosa, com o objetivo de evitar o entupimento desta;
- 4ª) Sobre o papel filtro (4) colocar a placa perfurada e ranhurada (5);
- 5ª) Como visto na Figura 16, a amostra a ser ensaiada é moldada diretamente na célula bipartida superior (10 cm) (6), sendo esta fixada na célula inferior (1) com o auxílio dos parafusos recartilhados fixadores (9) e parafusos recartilhados espaçadores (8);
- 6ª) Transferência da amostra contida na célula superior (6) para a célula inferior (1) com auxílio de tarugo de madeira;
- 7ª) Sobre a amostra a ser ensaiada, inserir a placa perfurada e ranhurada (5);
- 8ª) Inserir sobre a placa o papel filtro (4) e sobre este a pedra porosa (3);
- 9ª) Por fim, acoplar o cabeçote de compressão de carga normal com rótula de esfera (7).

Figura 22 - Esquema da Caixa Bipartida



Fonte: Adaptado de Pinto (2006)

Figura 23 - Conjunto da célula de ensaio



Fonte: Próprio Autor

O equipamento utilizado para realização do ensaio de cisalhamento direto é da linha PAVITEST fabricado pela CONTENCO, Figura 24, possui servo controlado acoplado a redutor de velocidade com capacidade de aplicação de carga até 500 Kgf e medição de força realizada através de célula de carga. A velocidade de deslocamento varia de 0,0002 a 12,0mm/min e é ajustada pelo software operacional, a velocidade usada nos ensaios foi de 0,1mm/min evitando, assim, a influência da poropressão nos resultados. Na Figura 25 pode-se ver uma amostra após ensaio de cisalhamento.

O sistema de aplicação de tensões normais, com capacidade de até 400 kPa para corpos de prova de 10x10 cm, é realizado através da colocação de pesos no braço de alavanca para multiplicação das cargas e obtenção das tensões desejadas. As tensões normais utilizadas foram de 25; 50; 100 e 200 kPa, conforme visto nas Figuras 26 e 27.

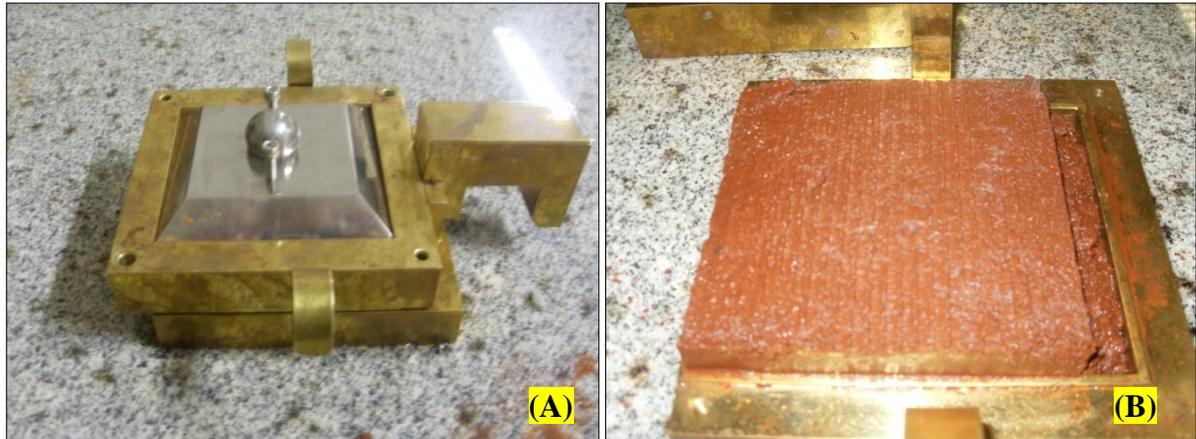
As leituras obtidas no ensaio são: Deslocamento horizontal (Dh), força cisalhante (τ) e deformação vertical (Dv).

Figura 24 - Equipamento para ensaios de Cisalhamento Direto utilizado.



Fonte: Próprio Autor

Figura 25 - Amostra após ensaio de cisalhamento: (A) Caixa bipartida com célula superior deslocada; (B) Amostra de solo após ensaio saturado.



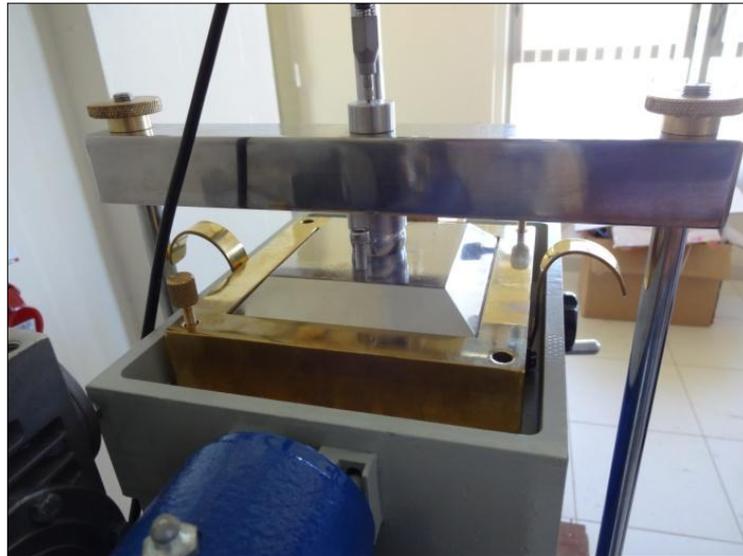
Fonte: Próprio Autor

Figura 26 - Pesos Utilizados: (1) 25kPa; (2) 50kPa; (3) 100kPa e (4) 200kPa.



Fonte: Próprio Autor

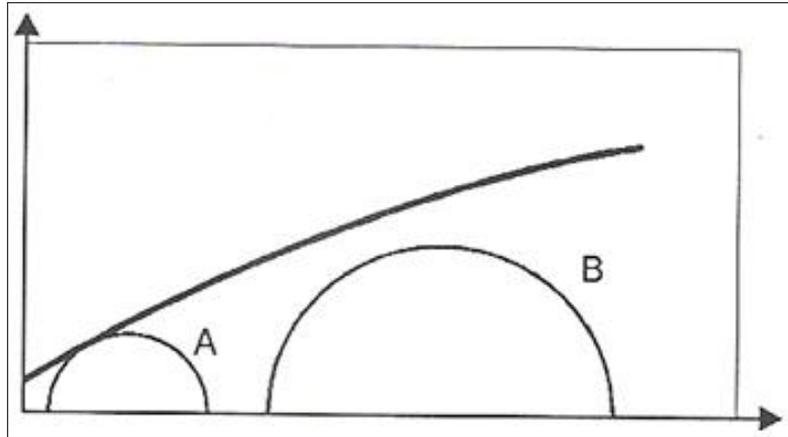
Figura 27 - Amostra no equipamento, durante ensaio.



Fonte: Próprio Autor

Para que se possa traçar a envoltória de resistência do solo, Figura 28, é necessário que o ensaio seja realizado com diferentes tensões normais para se obter um conjunto de valores de tensão cisalhante (τ) e da tensão normal (σ), após traçada a envoltória pode-se determinar o intercepto coesivo (c') e o ângulo de atrito interno (ϕ') de um determinado solo.

Figura 28 - Envoltória de Resistência de Mohr.



Fonte: Pinto (2006)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos dos ensaios de cisalhamento direto, objetivando determinar os parâmetros de resistência mecânica para posterior aplicação em obras geotécnicas.

4.1 Resistência ao cisalhamento

Segundo Bernardi (2006), a resistência ao cisalhamento de um solo é devida a resultante da soma de duas parcelas, sendo elas os parâmetros de ângulo de atrito interno (ϕ') e o intercepto coesivo entre as partículas (c').

Neste trabalho, os valores de (ϕ') e (c') foram determinados por meio de ensaio cisalhamento direto, descrito no item 3.2.1.4 - Ensaio de cisalhamento direto. Como dito anteriormente, a velocidade aplicada aos ensaios foi de 0,1 mm/min, de forma seca para todas as amostras ensaiadas e de forma saturada para as amostras de solo natural e solo + fibras de 12 mm de comprimento. As porcentagens e comprimentos ensaiados podem ser vistos no Quadro 2.

Quadro 2 - Amostras ensaiadas

		SECO	SATURADO
6 mm	Solo Natural	X	X
	Solo + 0,25% Fibra	X	-
	Solo + 0,5% Fibra	X	-
12 mm	Solo + 0,25% Fibra	X	X
	Solo + 0,5% Fibra	X	X
	Solo + 0,75% Fibra	X	-
24 mm	Solo + 0,25% Fibra	X	-
	Solo + 0,5% Fibra	X	-

Fonte: Próprio Autor

A intenção inicial era de se realizar ensaios de cisalhamento direto seco e saturado para todas as amostras variando-se os comprimentos e porcentagens, mas devido a problemas enfrentados na mistura dos componentes solo e fibra, foram realizados ensaios de forma seca para todas as amostras e saturados somente para as amostras que apresentaram maior homogeneidade na mistura (Solo + Fibra de 12 mm).

Nos próximos itens são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento para as amostras apresentadas no Quadro 2, com as tensões normais (σ)

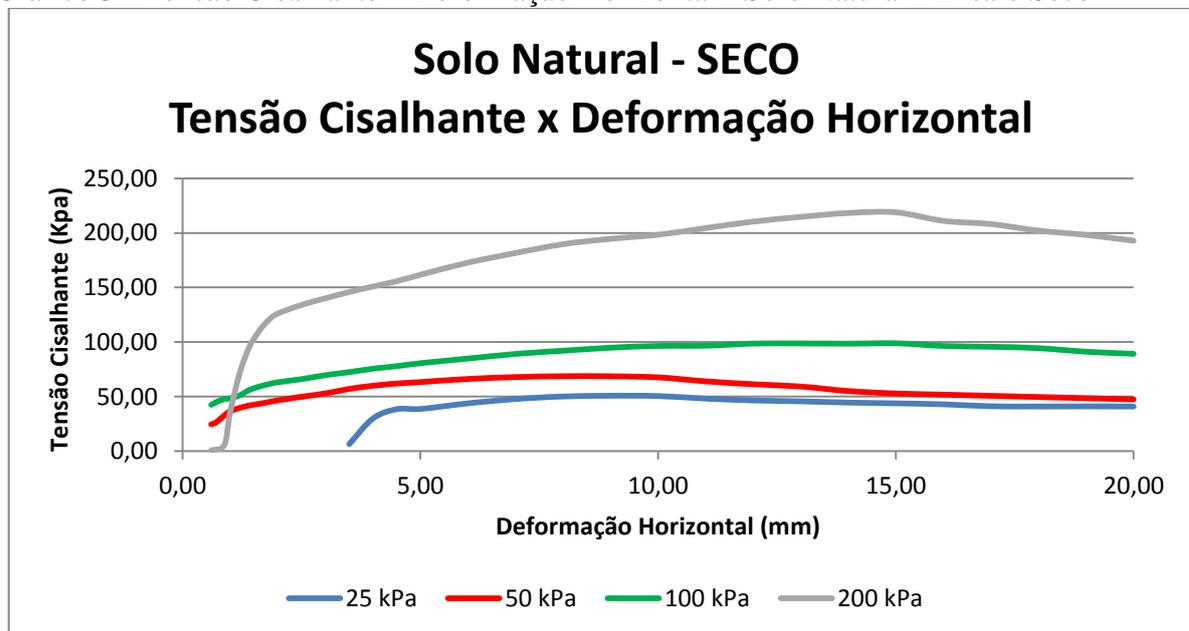
aplicadas de 25; 50; 100 e 200 kPa. Também é apresentada a análise e sistematização dos resultados, com a finalidade de traçar as envoltórias de resistência das diferentes misturas. A partir do traçado das envoltórias foram determinados os ângulos de atrito interno (ϕ') e o intercepto coesivo (c') para todas as misturas.

4.1.1 Solo Natural

Como dito no item 3.2.1.2 - Dosagem e Mistura, as amostras de solo natural foram moldadas utilizando-se a umidade ótima de 14%. Foram ensaiadas 4 amostras no estado seco e 4 amostras no estado saturado, com carregamentos de tensão normal de 25; 50; 100 e 200 kPa.

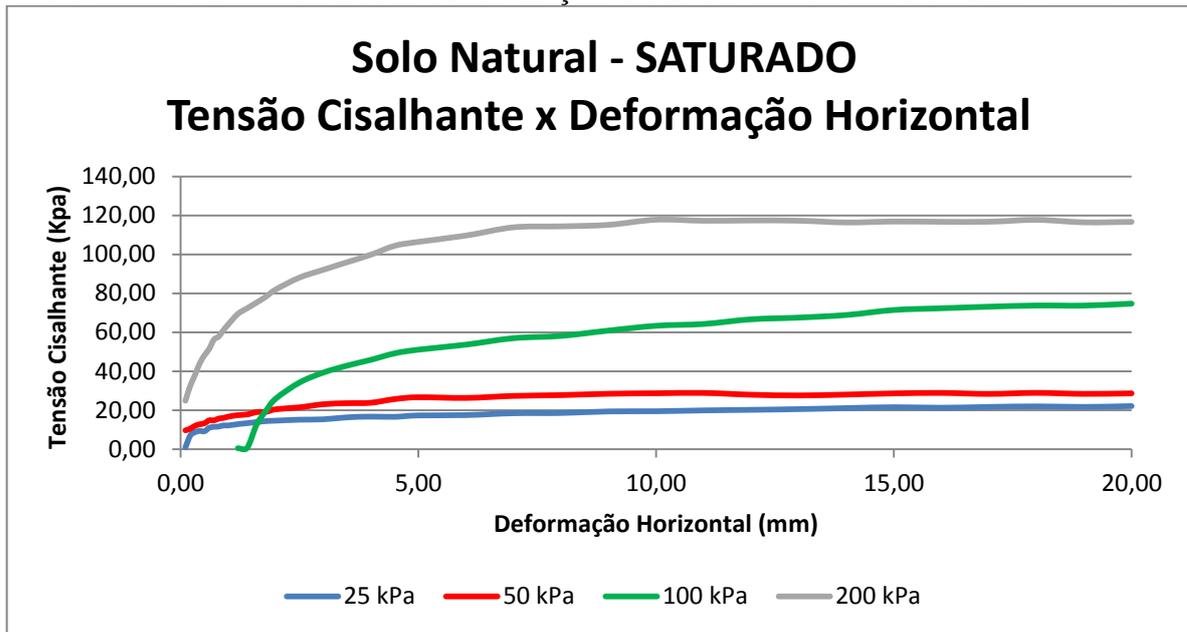
O comportamento das amostras apresentou, tanto no ensaio seco quanto no saturado, características semelhantes ao de uma argila normalmente adensada, observa-se uma tensão que cresce lentamente com a deformação, atingindo um valor máximo somente com grandes deformações, o que pode ser visto nos Gráficos 3 e 4. Pode-se perceber que houve um decréscimo de resistência comparando-se o ensaio saturado com o seco.

Gráfico 3 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo Natural - Ensaio Seco



Fonte: Próprio Autor

Gráfico 4 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo Natural - Ensaio Saturado



Fonte: Próprio Autor

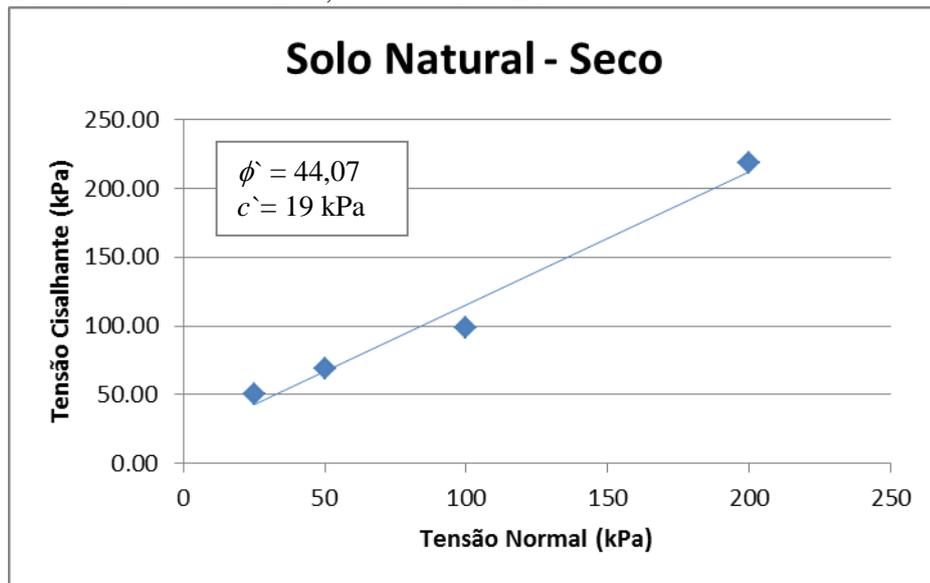
Na Tabela 2 são apresentados os valores das envoltórias de resistência obtidas do solo natural no estado seco e saturado, onde pode-se observar que os valores da tensão cisalhante são maiores no ensaio seco. Nos Gráficos 5 e 6 pode-se observar que o ângulo de atrito interno do solo seco é de $\phi' = 44,07^\circ$, cerca de 32,75% maior do que o do solo saturado, que foi de $\phi' = 29,64^\circ$. Da mesma forma, o intercepto coesivo do solo natural no ensaio seco é maior do que no ensaio saturado, podendo-se considerar que o solo no estado seco apresenta maior resistência, para se definir a resistência ao cisalhamento de um solo, pega-se a resultante do somatório entre estes dois componentes, sendo então, o solo no estado seco 0,5% mais resistente do que em seu estado saturado.

Tabela 2 - Envoltória de Resistência - Ensaio Seco e Saturado

Solo Natural - Ensaio Seco		Solo Natural - Ensaio Saturado	
Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante de Pico (kPa)	Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante de Pico (kPa)
25	50,69	25	22,13
50	68,71	50	28,99
100	98,86	100	74,69
200	218,83	200	117,87

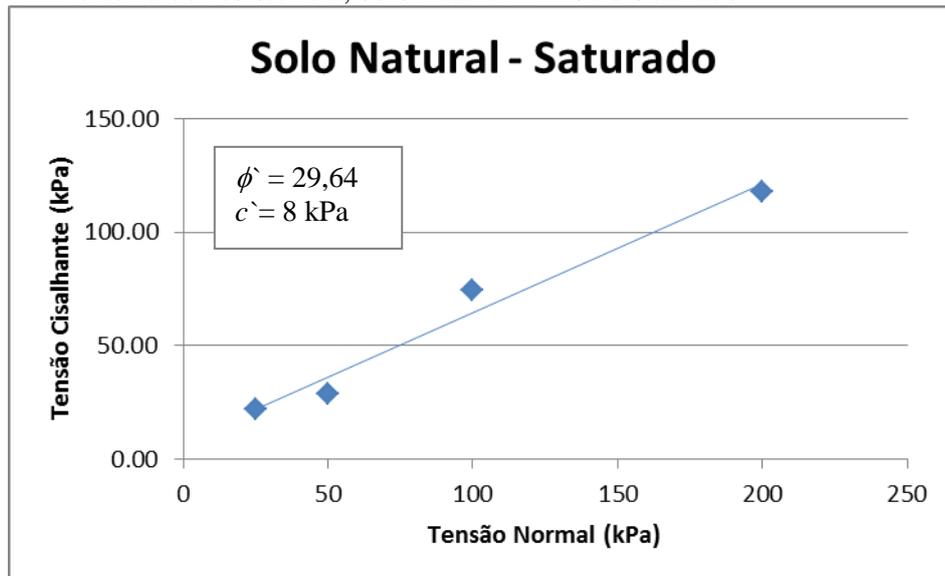
Fonte: Próprio Autor

Gráfico 5- Envoltória de resistência, solo natural- Ensaio seco.



Fonte: Próprio Autor

Gráfico 6 - Envoltória de resistência, solo natural - Ensaio saturado.



Fonte: Próprio Autor

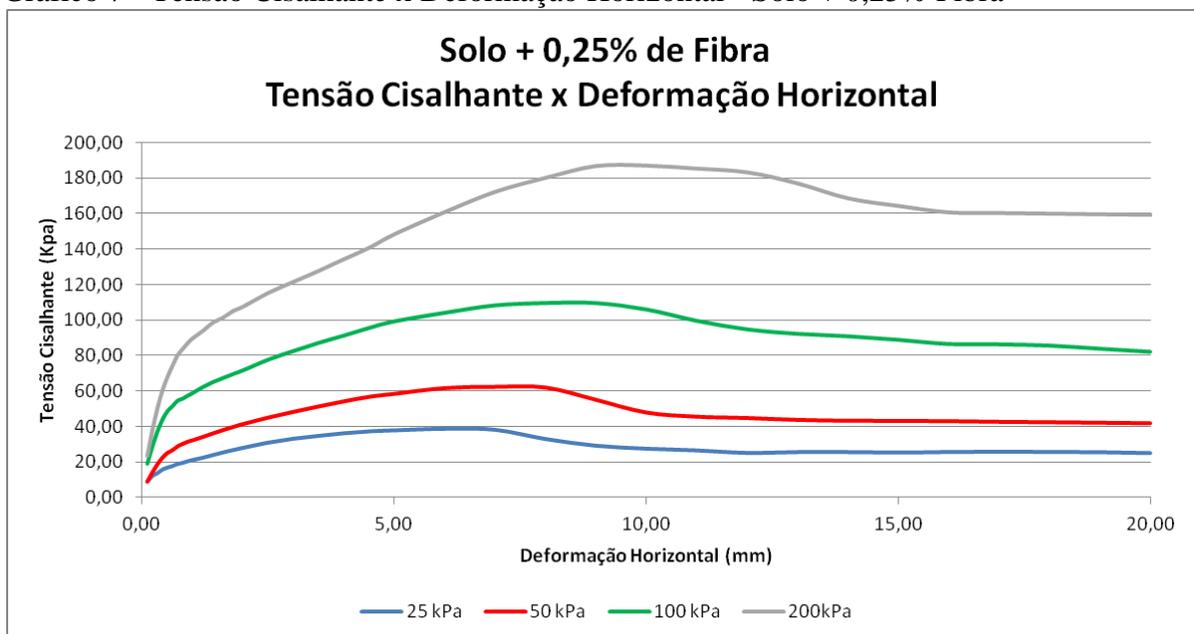
4.1.2 Solo + Fibras de 6 mm de comprimento

Como dito no item 3.2.1.2 - Dosagem e Mistura, as amostras de solo + fibras de 6 mm foram moldadas utilizando-se a umidade ótima de 14%. Foram ensaiadas 8 amostras no estado seco com as porcentagens de 0,25% e 0,5% de adição de fibras, com carregamentos de tensão normal de 25; 50; 100 e 200 kPa.

O comportamento das amostras apresentou, para a mistura com adição de 0,25% de fibras, características de uma argila pré-adensada, observando-se um crescimento acelerado

em relação às deformações, atingindo um valor máximo, considerado como resistência de pico. Porém após atingir esta resistência de pico, a tensão decresceu lentamente até se estabilizar em torno do valor definido como resistência residual. Já a amostra com adição de 0,5% de fibra apresenta, assim como o solo natural, características semelhantes ao de uma areia fofa, como que pode ser visto nos Gráficos 7 e 8. A comparação dos resultados em relação à amostra de solo natural foi feita em relação à maior tensão normal aplicada (200 kPa), pois segundo Pinto (2006), a máxima tensão resistente é proporcional a tensão confinante de ensaio.

Gráfico 7 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo + 0,25% Fibra



Fonte: Próprio Autor

Gráfico 8 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo + 0,5% Fibra

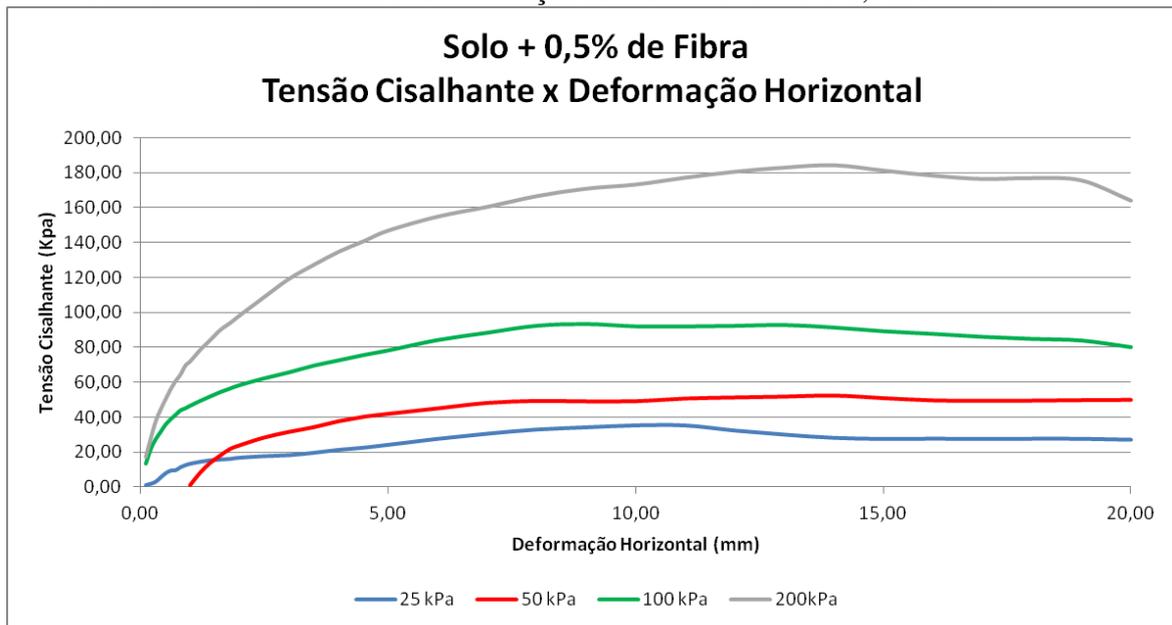
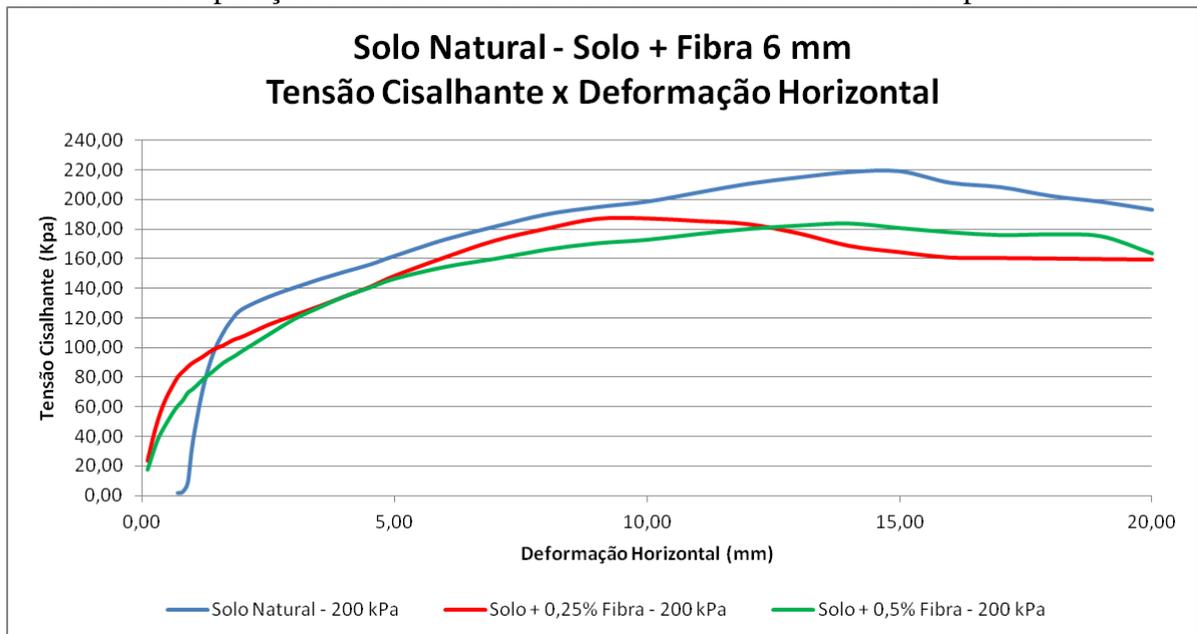


Gráfico 9 - Comparação entre Solo Natural e Solo + Fibra de 6mm de comprimento



O Gráfico 9 apresenta a comparação dos resultados obtidos com a mistura de solo + fibra de comprimento igual a 6 mm nas porcentagens de 0,25% e 0,5%. Como já dito no item 3.2.1.2 - Dosagem e Mistura, não obteve-se uma mistura homogênea dos componentes, ocasionando em "novelos" de fibra dispersos de forma não homogênea na matriz de solo. A falta de entrosamento entre os materiais fez com que a mistura não apresentasse um acréscimo

de resistência em relação ao solo natural e sim um decréscimo de 8,15% em relação à mistura de solo + 0,25% e de 7,80% na mistura de solo + 0,5%.

Tabela 3 - Envoltória de Resistência - Solo Natural e Solo + Fibra

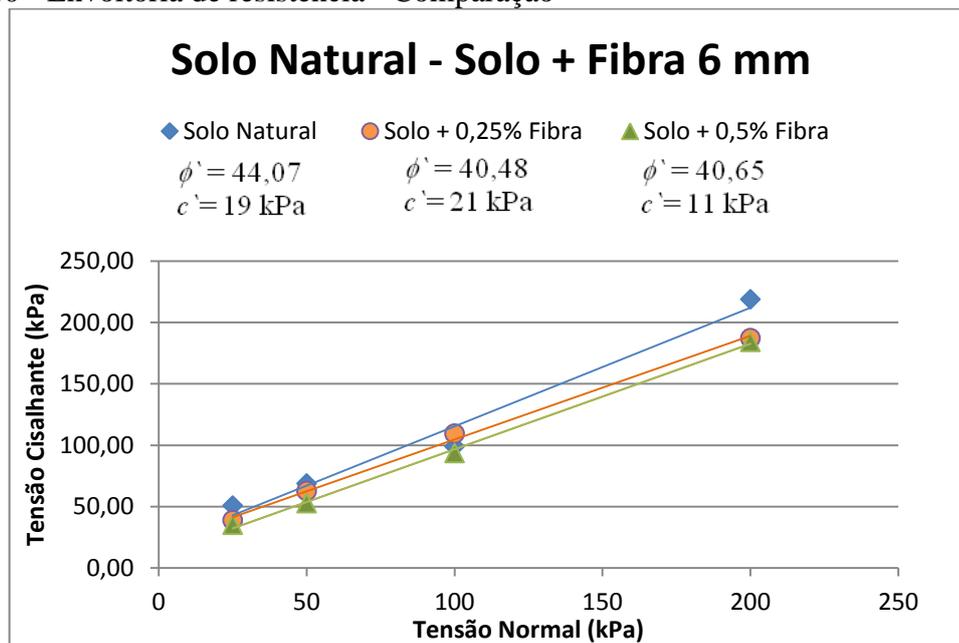
	Solo Natural	Solo + 0,25% Fibra	Solo + 0,5% Fibra
Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante de Pico (kPa)	Tensão Cisalhante de Pico (kPa)	Tensão Cisalhante de Pico (kPa)
25	50,69	38,76	35,06
50	68,71	62,59	52,65
100	98,86	109,34	93,50
200	218,83	187,15	184,08

Fonte: Próprio Autor

Na Tabela 3 são apresentados os valores das envoltórias de resistência obtidas, onde pode-se observar que os valores da tensão cisalhante são maiores no solo natural. No Gráfico 10 pode-se observar que o ângulo de atrito interno do solo + 0,25% de fibra é de $\phi' = 40,48^\circ$, cerca de 0,42% menor do que o do solo + 0,5% de fibra, que foi de $\phi' = 40,65^\circ$.

Da mesma forma, o intercepto coesivo do solo natural é menor para a mistura de solo + 0,25% de fibra e maior para a mistura de 0,5% de fibra, podendo-se considerar que o solo no estado natural apresenta menor resistência (9,60%) em relação à primeira mistura, e uma maior resistência em relação à segunda mistura (42,1%).

Gráfico 10 - Envoltória de resistência - Comparação



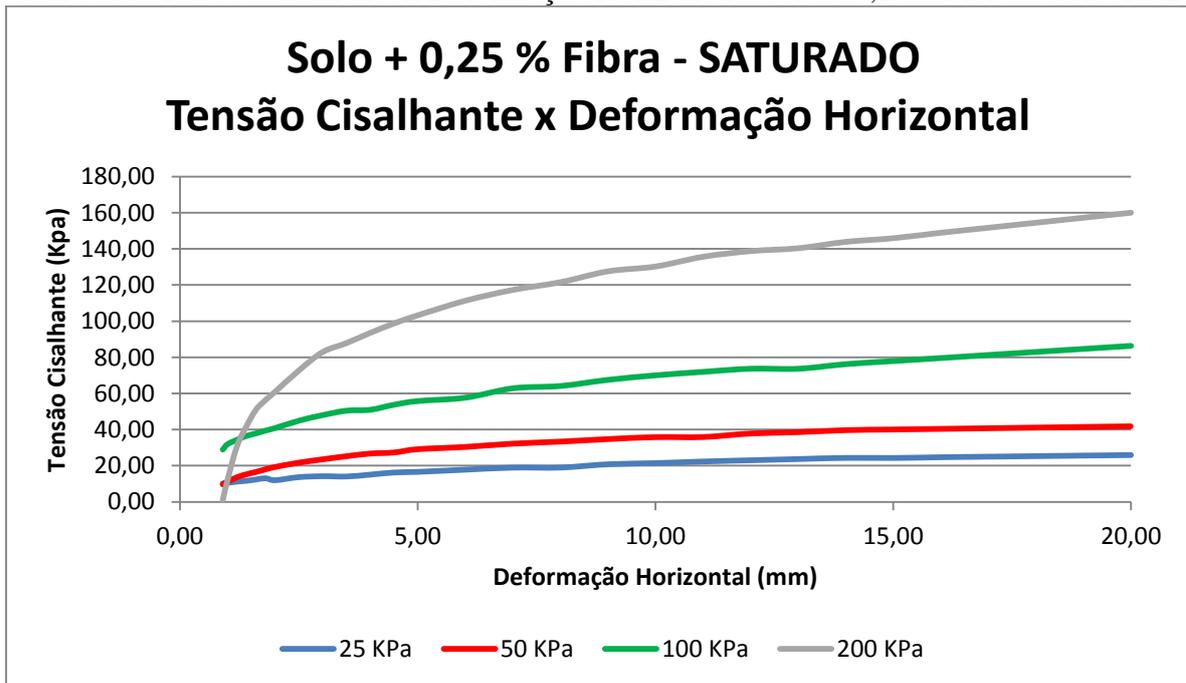
Fonte: Próprio Autor

4.1.2 Solo + Fibras de 12 mm de comprimento

Como dito no item 3.2.1.2 - Dosagem e Mistura, as amostras de solo + fibras de 12 mm foram moldadas utilizando-se a umidade ótima de 14%. Foram ensaiadas 8 amostras no estado seco com as porcentagens de 0,25% e 0,5% e 12 amostras no estado saturado com as porcentagens de 0,25% ; 0,5% e 0,75% de adição de fibras, com carregamentos de tensão normal de 25; 50; 100 e 200 kPa.

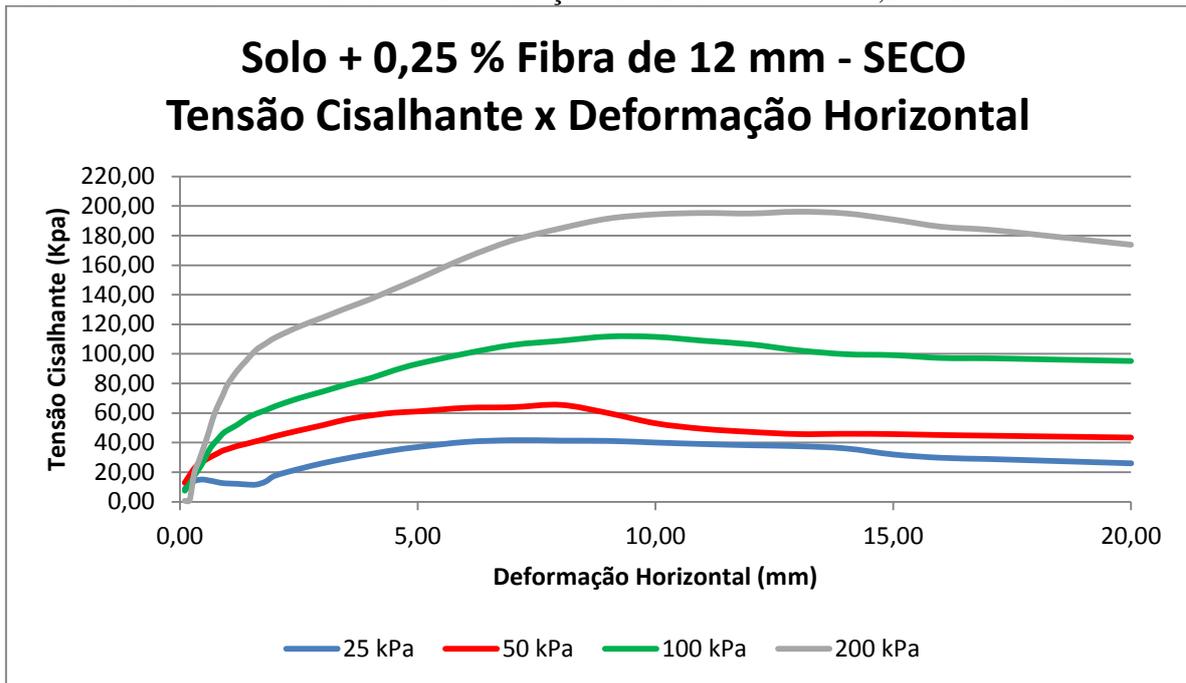
O comportamento das amostras apresentou, para a mistura com adição de 0,25% de fibras, tanto no ensaio saturado quanto no seco, características semelhantes ao visto anteriormente no solo natural. Apresentou comportamento de areia fofa, como pode ser visto nos Gráficos 11 e 12. Atingindo resistências de pico muito maiores no ensaio seco (30,6%) em relação ao ensaio saturado.

Gráfico 11- Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo + 0,25% Fibra - SATURADO



Fonte: Próprio Autor

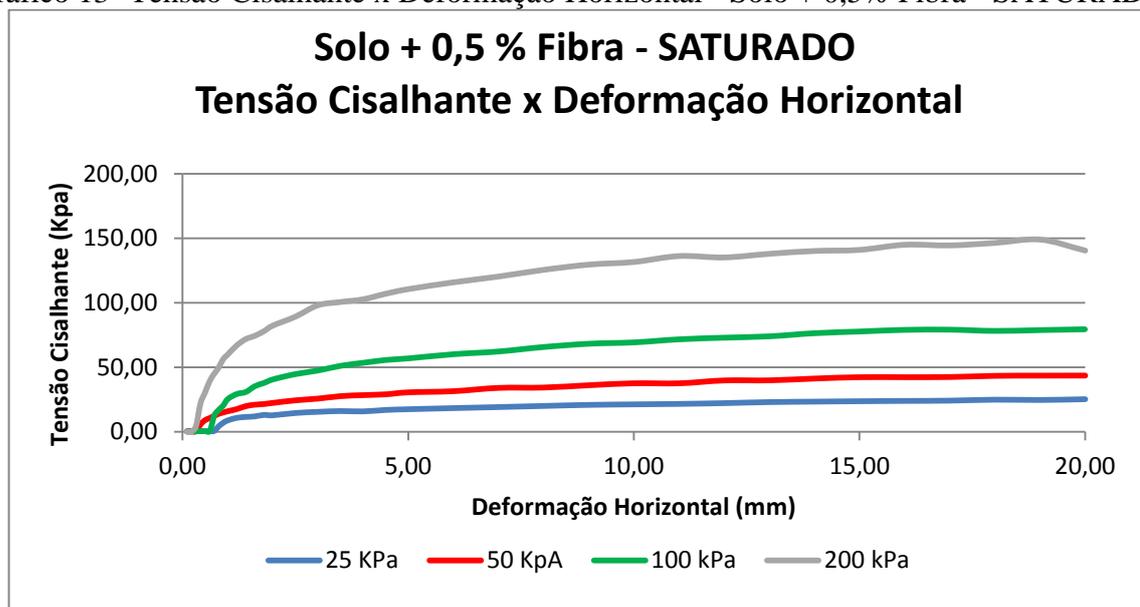
Gráfico 12 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo + 0,25% Fibra - SECO



Fonte: Próprio Autor

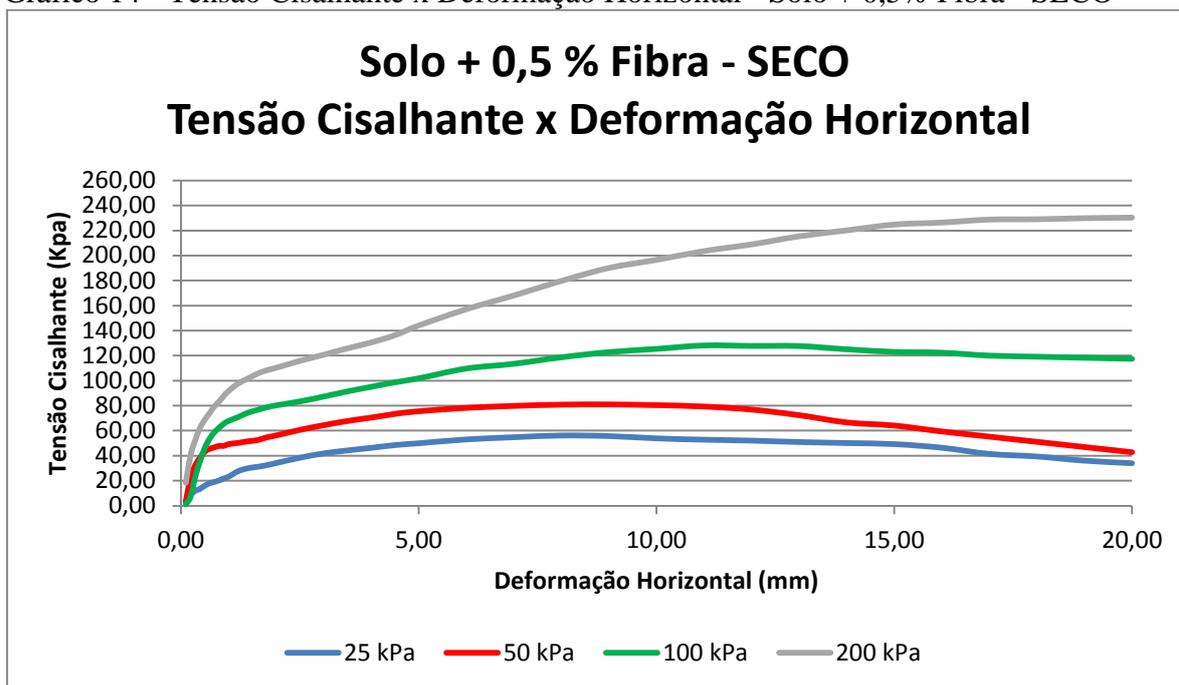
O comportamento das amostras apresentou, para a mistura com adição de 0,5% de fibras, tanto no ensaio saturado quanto no seco, foi semelhante às demais amostras, mantendo-se com uma curva padrão de uma areia fofo, conforme pode ser visto nos Gráficos 13 e 14. Atingiu resistências de pico muito maiores no ensaio seco (42,5%) em relação ao ensaio saturado.

Gráfico 13 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo + 0,5% Fibra - SATURADO



Fonte: Próprio Autor

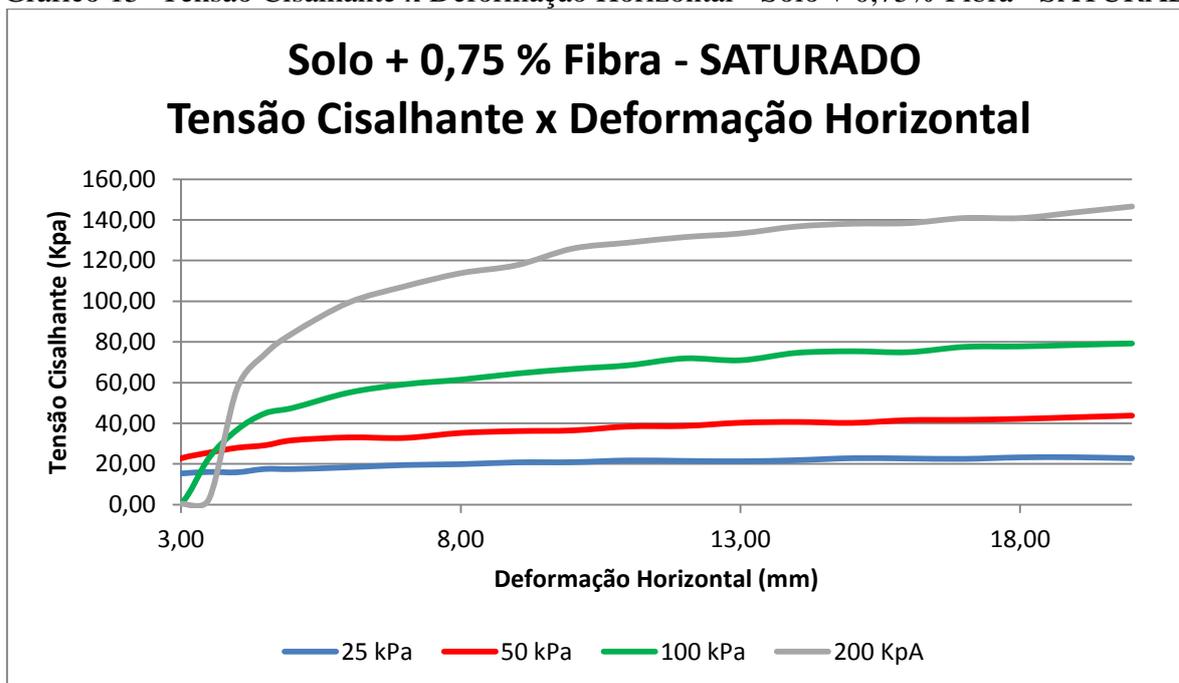
Gráfico 14 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo + 0,5% Fibra - SECO



Fonte: Próprio Autor

Para as misturas com adição de 0,75% de fibras, foi realizado apenas ensaio na condição saturada, apresentando um comportamento semelhante ao das outras misturas. Com uma resistência de pico 17% maior do que as amostras de solo natural, conforme Gráfico 15.

Gráfico 15 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo + 0,75% Fibra - SATURADO



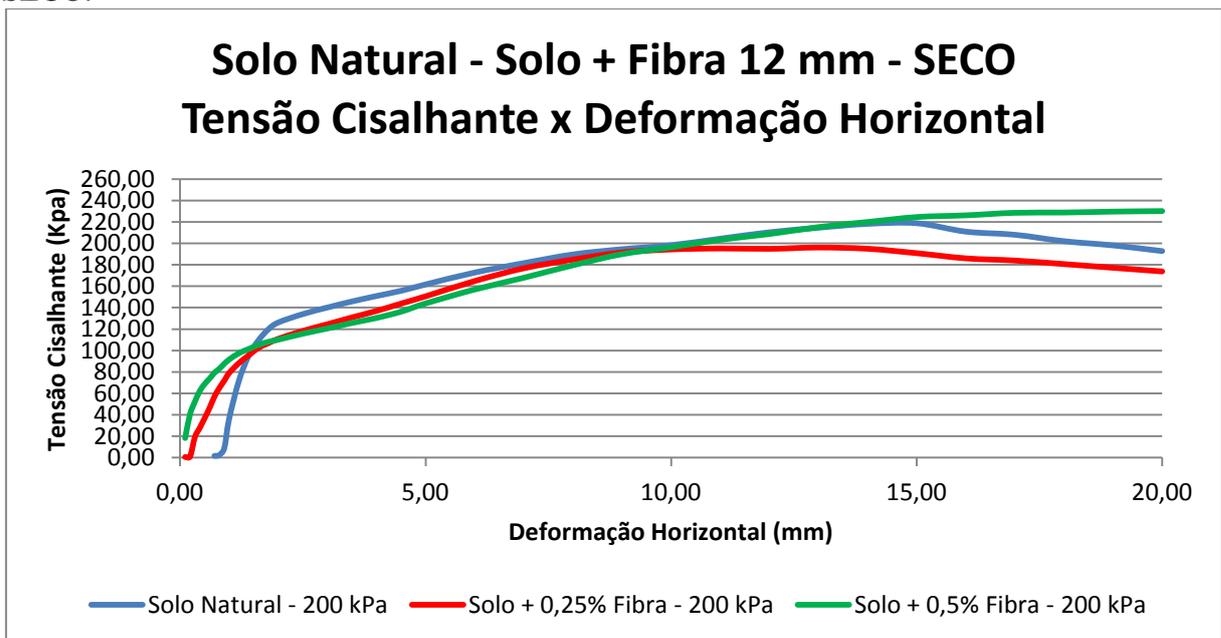
Fonte: Próprio Autor

A comparação dos resultados em relação à amostra de solo natural foi feita em relação à maior tensão normal aplicada (200 kPa), pois segundo Pinto (2006), a máxima tensão resistente é proporcional a tensão confinante de ensaio.

No ensaio seco, Gráfico 16 percebe-se um acréscimo de resistência em torno de 5% em relação ao solo natural para a amostra acrescida de 0,5% de fibra e um decréscimo de 10% para a amostra acrescida de 0,25% de fibra. Tal fato pode ser explicado pela forma em que as fibras estão dispostas dentro da amostra, possivelmente houve grande quantidade de fibras disposta no sentido paralelo à zona de ruptura, eliminando o sua influência na resistência do material.

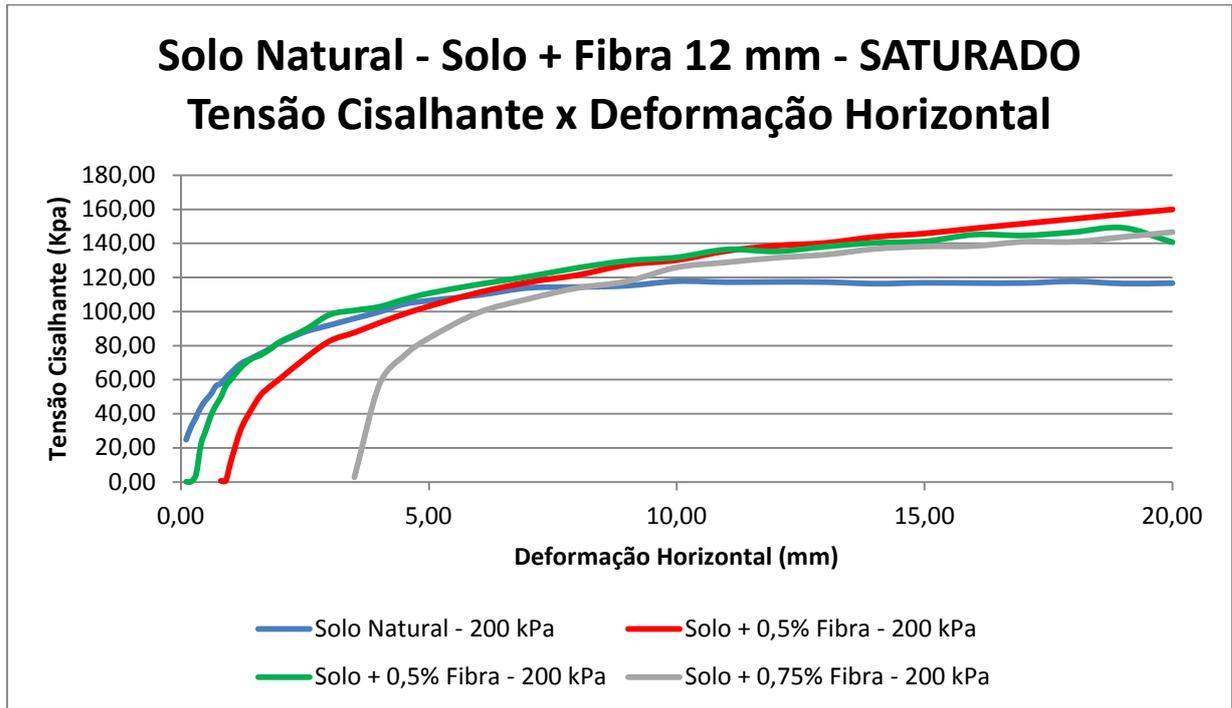
No ensaio saturado, todas as amostras apresentaram um acréscimo de resistência em relação ao solo natural, o que pode ser visto no Gráfico 17.

Gráfico 16 - Comparação entre Solo Natural e Solo + Fibra de 12mm de comprimento – SECO.



Fonte: Próprio Autor

Gráfico 17 - Comparação entre Solo Natural e Solo + Fibra de 12mm de comprimento - SATURADO



Na Tabela 4 são apresentados os valores das envoltórias de resistência obtidas no estado saturado, onde pode-se observar que os valores da tensão cisalhante são maiores para a adição de 0,5% de fibras. No Gráfico 18 pode-se observar que o ângulo de atrito interno do solo saturado é de $\phi' = 29,64^\circ$, ocorrendo um acréscimo nas três misturas de solo + fibras. Da mesma forma, o intercepto coesivo do solo natural no ensaio saturado é menor do que obtido com as misturas de solo + fibras. Como dito anteriormente, a resistência do material é medida em relação à soma destes parâmetros (ϕ' e c'), mantendo-se, em relação ao solo natural, um crescimento de 12% para solo + 0,25% de fibra e 18% para solo + 0,5% de fibra.

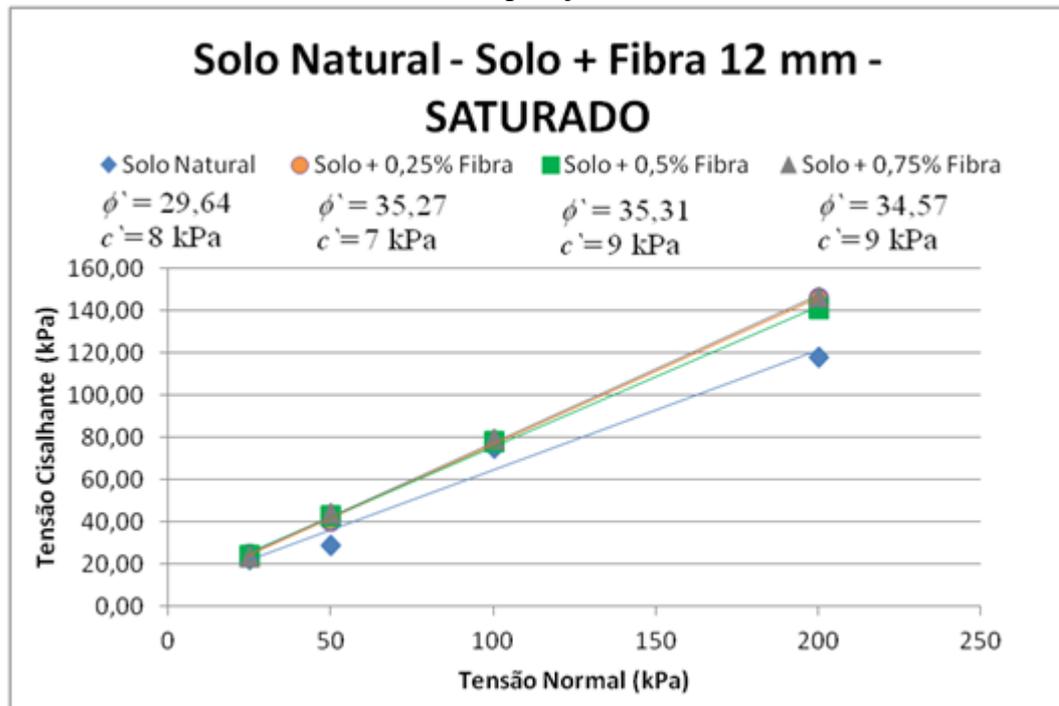
Para a adição de 0,75% de fibras houve um decréscimo de resistência em relação à mistura de solo + 0,5% de fibra, de 1,7%. Acredita-se que em decorrência da falta de homogeneidade da amostra devido a excesso de fibras. Em relação à amostra de solo saturado, a mistura teve um acréscimo de apenas 15%. Baseado na pouca influência que esta mistura teve em relação à resistência obtida com a mistura de 0,5% esta porcentagem não foi testada nos outros comprimentos.

Tabela 4 - Envoltória de Resistência - Solo Natural e Solo + Fibras - Ensaio SATURADO.

	Solo Natural	Solo + 0,25% Fibra	Solo + 0,5% Fibra	Solo + 0,75% Fibra
Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante de Pico (kPa)			
25	22,13	24,39	23,69	23,23
50	28,99	40,08	42,52	43,77
100	74,69	77,84	77,84	79,17
200	117,87	145,84	141,10	146,63

Fonte: Próprio Autor

Gráfico 18 - Envoltória de resistência – Comparação.



Fonte: Próprio Autor

Na Tabela 5 são apresentados os valores das envoltórias de resistência obtidas no estado seco, onde é possível observar que os valores da tensão cisalhante aumentam proporcionalmente à porcentagem de fibras adicionada. No Gráfico 19, pode-se observar que o ângulo de atrito interno do solo seco é de $\phi' = 44,07^\circ$, ocorrendo um decréscimo para a mistura de solo + 0,25% e um acréscimo na mistura de solo + 0,5% de fibras. De forma contrária, o intercepto coesivo do solo natural aumentou com a inclusão de fibras à mistura.

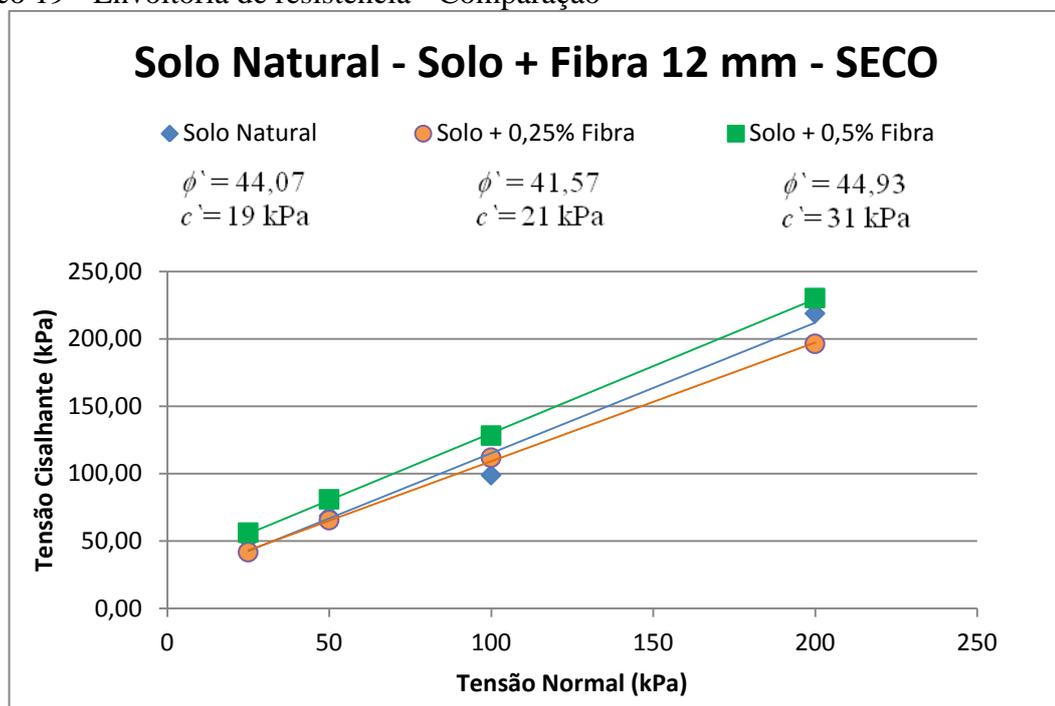
Em relação ao solo natural, os aumentos de resistência com as misturas de 0,25% e 0,5% foram de 0,8% e 20,4%, respectivamente.

Tabela 5 - Envoltória de Resistência - Solo Natural e Solo + Fibras - Ensaio SECO.

	Solo Natural	Solo + 0,25% Fibra	Solo + 0,5% Fibra
Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante de Pico (kPa)	Tensão Cisalhante de Pico (kPa)	Tensão Cisalhante de Pico (kPa)
25	50,69	41,73	56,20
50	68,71	65,48	80,93
100	98,86	111,83	128,22
200	218,83	196,29	230,22

Fonte: Próprio Autor

Gráfico 19 - Envoltória de resistência - Comparação



Fonte: Próprio Autor

4.1.2 Solo + Fibras de 24 mm de comprimento

Como dito no item 3.2.1.2 - Dosagem e Mistura, as amostras de solo + fibras de 24 mm foram moldadas utilizando-se a umidade ótima de 14%. Foram ensaiadas 8 amostras no estado seco com as porcentagens de 0,25% e 0,5% de adição de fibras, com carregamentos de tensão normal de 25; 50; 100 e 200 kPa.

O comportamento das amostras pode ser visto nos Gráficos 20 e 21. Ocorrendo um decréscimo de resistência de pico após a ruptura.

A comparação dos resultados em relação à amostra de solo natural foi feita usando-se à maior tensão normal aplicada (200 kPa), pois segundo Pinto (2006), a máxima tensão resistente é proporcional a tensão confinante de ensaio.

Gráfico 20 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo + 0,25% Fibra

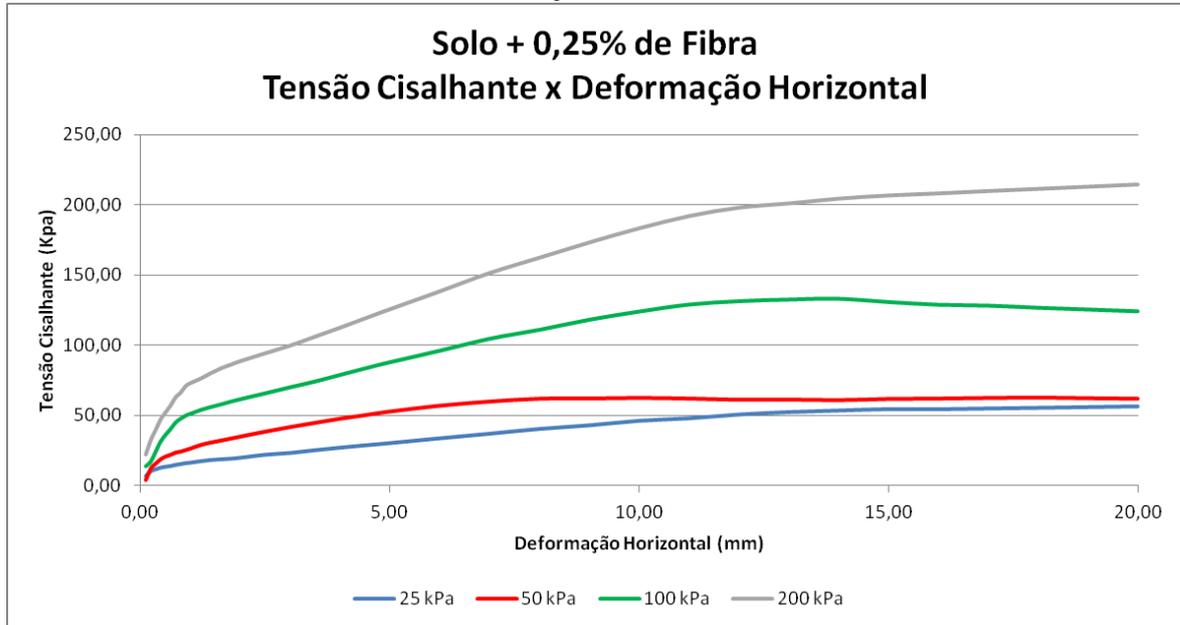


Gráfico 21 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Solo + 0,5% Fibra

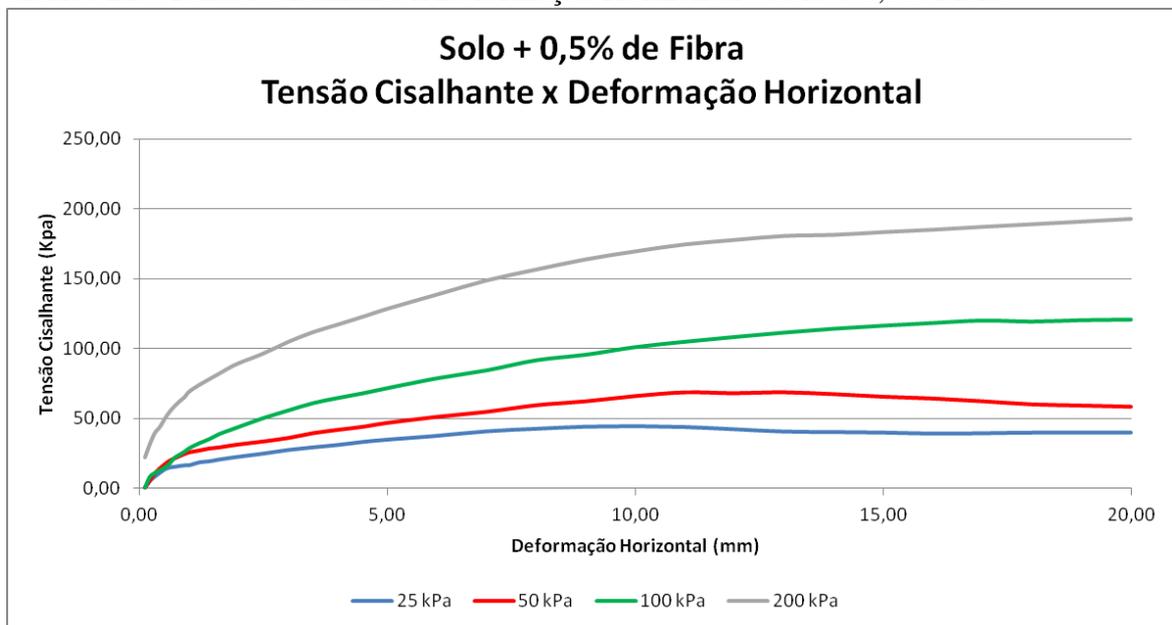
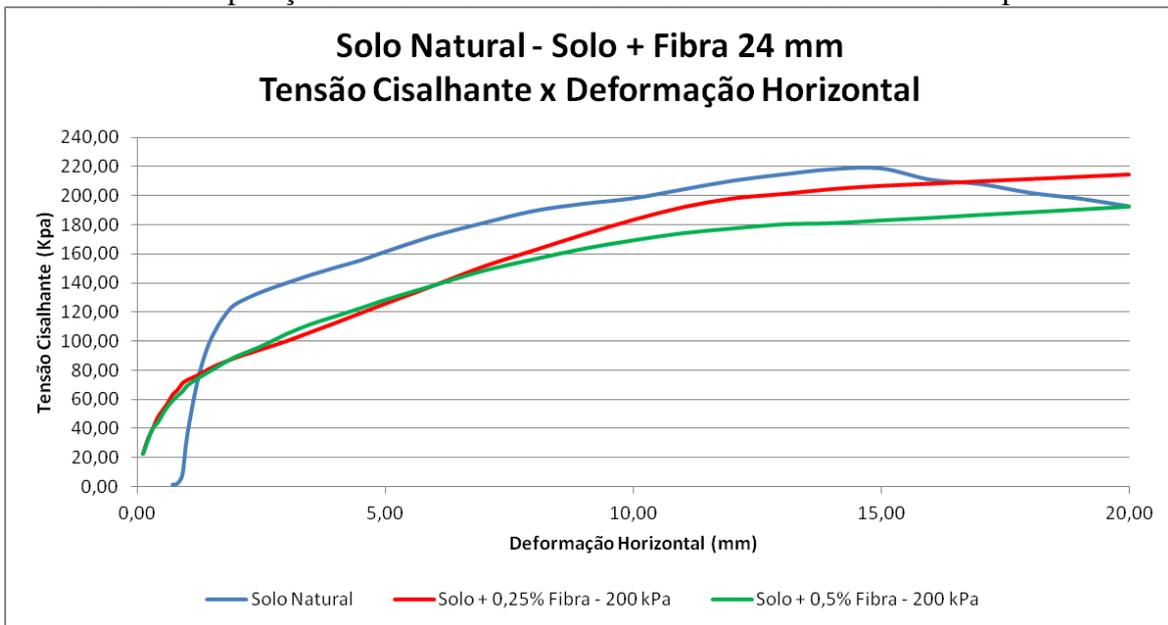


Gráfico 22 - Comparação entre Solo Natural e Solo + Fibra de 24 mm de comprimento



O Gráfico 22 apresenta a comparação dos resultados obtidos com a mistura de solo + fibra de comprimento igual a 24 mm nas porcentagens de 0,25% e 0,5%. Como já dito no item 3.2.1.2 - Dosagem e Mistura, não obteve-se uma mistura homogênea dos componentes, ocasionando alguns "grumos" de fibras dispersos de forma não homogênea no solo. A falta de entrosamento entre os materiais fez com que a mistura não apresentasse um acréscimo de resistência de pico em relação ao solo natural e sim um decréscimo de 1,85% em relação à mistura de solo + 0,25% e de 12% na mistura de solo + 0,5%.

Tabela 6 - Envolvória de Resistência - Solo Natural e Solo + Fibra.

	Solo Natural	Solo + 0,25% Fibra	Solo + 0,5% Fibra
Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante de Pico (kPa)	Tensão Cisalhante de Pico (kPa)	Tensão Cisalhante de Pico (kPa)
25	50,69	56,73	44,86
50	68,71	62,86	68,63
100	98,86	133,34	120,80
200	218,83	214,79	192,60

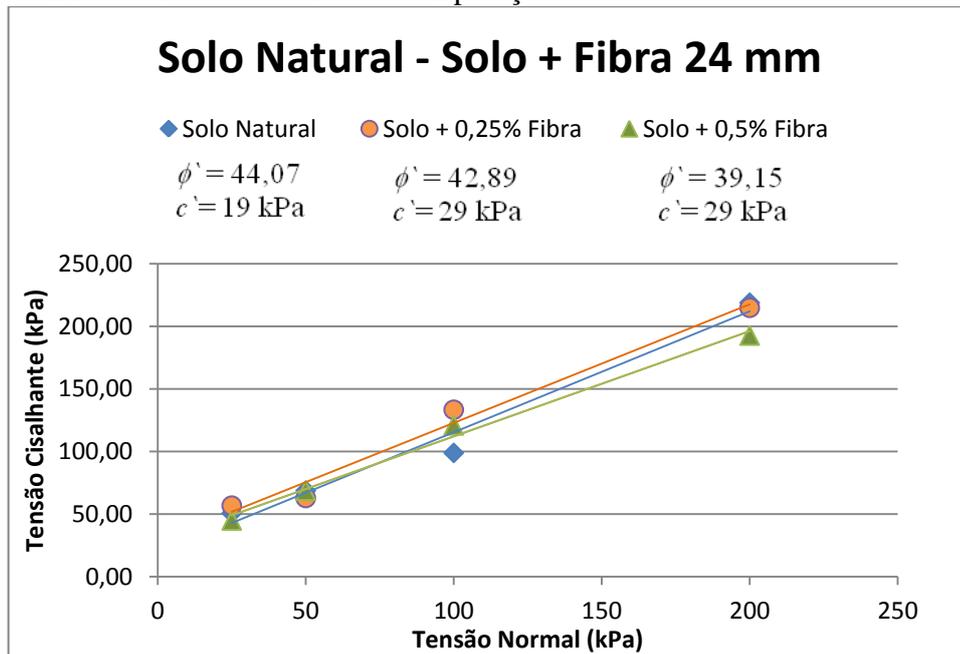
Fonte: Próprio Autor

Na Tabela 6 são apresentados os valores das envoltórias de resistência obtidas, onde pode-se observar que os valores da tensão cisalhante, variam com a aplicação da tensão normal, sendo maiores para a mistura solo + 0,25% de fibra. No Gráfico 23 pode-se observar que o ângulo de atrito interno do solo + 0,25% de fibra é de $\phi' = 42,89^\circ$, cerca de 8,72% maior do que o do solo + 0,5% de fibra, que foi de $\phi' = 39,15^\circ$. Se comparados ao solo natural,

percebe-se um decréscimo no ângulo de atrito para as duas misturas, sendo cerca de 2,70% para 0,25% de adição e de 11,2% para 0,5% de adição.

De forma contrária, o intercepto coesivo do solo natural é menor para ambas as misturas, cerca de 52,63%. Podendo-se considerar que o solo no estado natural apresenta menor resistência, cerca de 14% em relação a primeira mistura e 8% em relação a segunda mistura.

Gráfico 23 - Envoltória de resistência - Comparação



Fonte: Próprio Autor

4.1.4 Análise global dos resultados

Neste item serão apresentadas as comparações entre os resultados obtidos para as diferentes misturas (0%; 0,25%; 0,5% e 0,75%) e tensões confinantes.

4.1.4.1 Ensaio Seco

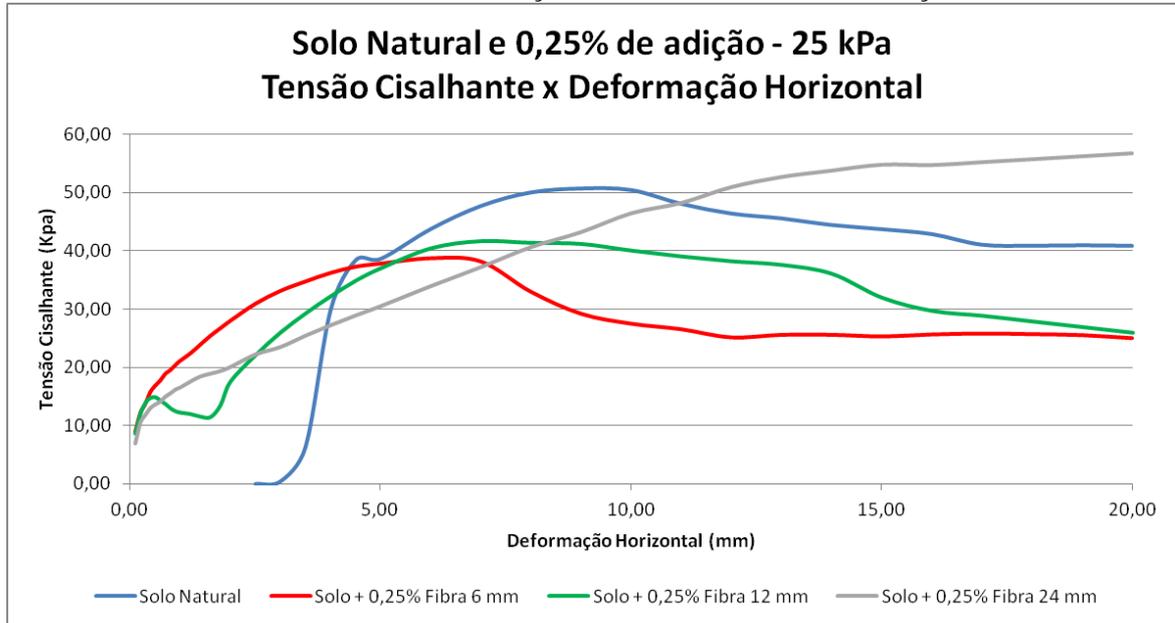
4.1.4.1.1 Solo Natural e Solo adicionado de fibras - Tensão Normal de 25 kPa

Os Gráficos 24 e 25 mostram a variação da tensão cisalhante (kPa) pelo deslocamento horizontal (mm), para as amostras de solo natural e solo acrescido de fibras de 6, 12 e 24 mm nas porcentagens de 0,25 e 0,5%; submetidas à tensão normal efetiva de 25 kPa.

No Gráfico 24 percebe-se que para a tensão aplicada, a única amostra que teve uma resistência de pico maior que a do solo natural foi a de solo + 0,25% de fibras de 24 mm de

comprimento. Possivelmente este resultado se refere a pequena quantidade de fibra adicionada, não tendo ocorrido o "excesso" de fibras citado no item 3.2.1.2 - Dosagem e Mistura.

Gráfico 24 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - 0,25% de adição - 25 kPa

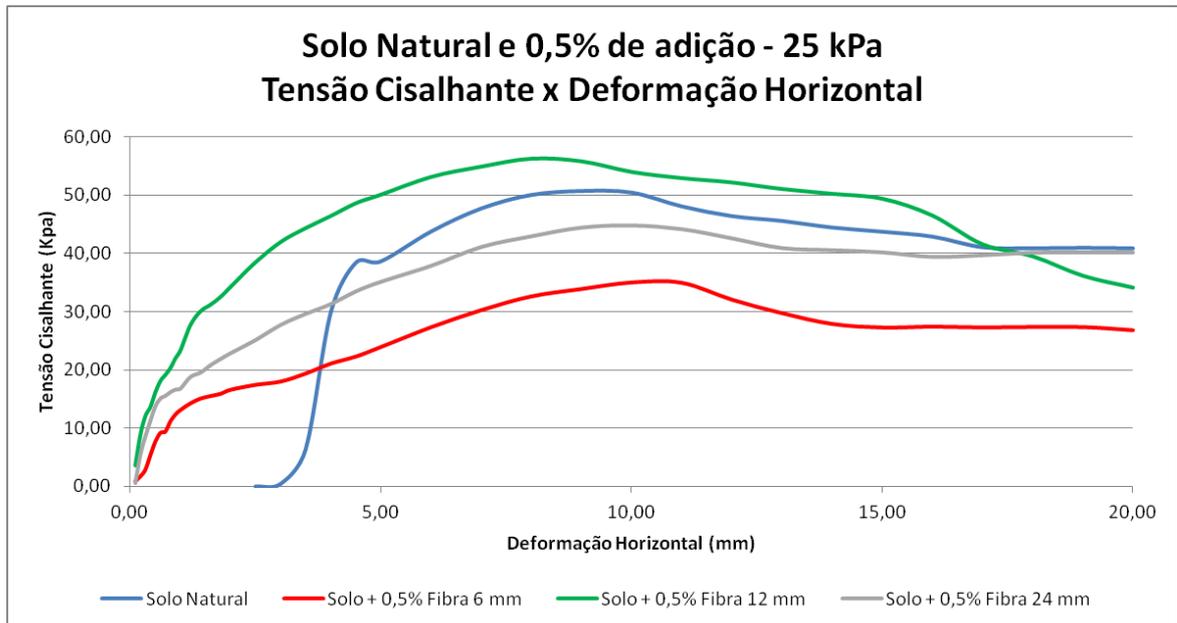


Fonte: Próprio Autor

No Gráfico 25, com adição de 0,5% de fibras, percebe-se que os piores resultados foram obtidos com as amostras que tiveram problemas na mistura, apresentando um decréscimo na resistência de pico pela falta de homogeneidade entre solo e fibra. Como citado anteriormente, a mistura mais homogênea foi a com adição de fibra com comprimento de 12 mm. Baseado nisso, a amostra com maior resistência em relação ao solo natural, com adição de 0,5% foi da fibra de 12 mm.

No item 2.1.2 - Materiais Compósitos Cimentados Reforçados com Fibras, são apresentados os parâmetros que influenciam no desempenho das misturas solo + fibra. Em relação aos resultados obtidos, pode-se dizer que para fibras de 24 mm e 0,5% de adição houve um excesso no teor de fibra adicionado, dificultando a obtenção de uma amostra uniforme. Para a adição de fibras de 6 mm acredita-se que seu comprimento foi insuficiente para que houvesse uma boa aderência desta à matriz, não impedindo seu arrancamento.

Gráfico 25 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - 0,5% de adição - 25 kPa

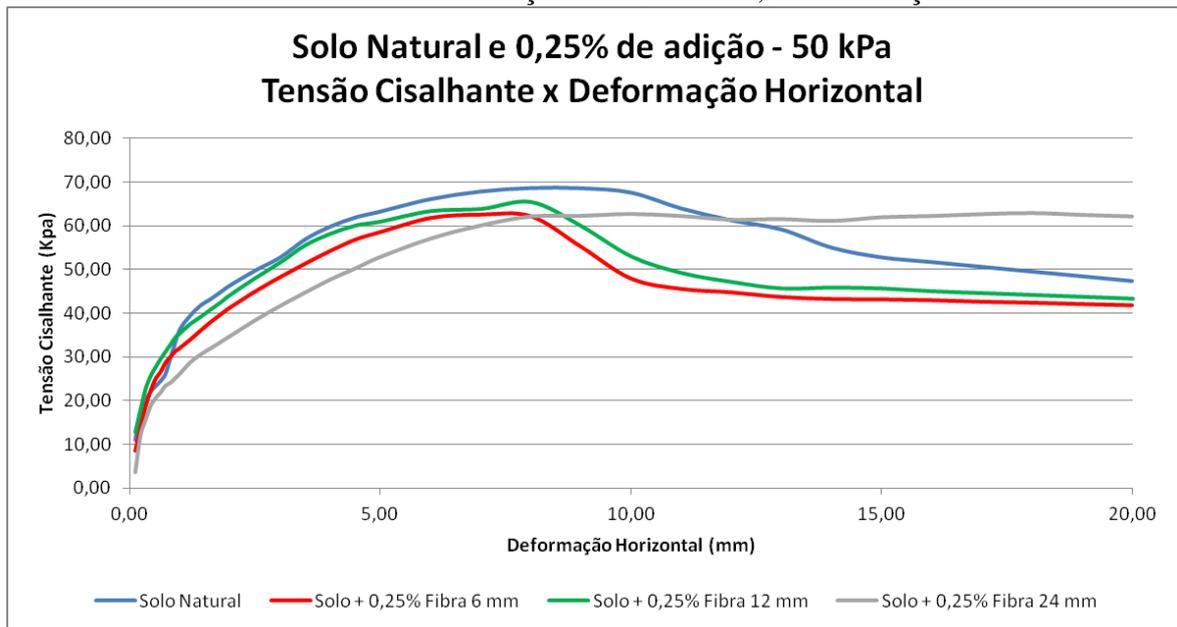


4.1.4.1.2 Solo Natural e Solo adicionado de fibras - Tensão Normal de 50 kPa

Os Gráficos 26 e 27 mostram a variação da tensão cisalhante (kPa) pelo deslocamento horizontal (mm), para as amostras de solo natural e solo acrescido de fibras de 6, 12 e 24 mm nas porcentagens de 0,25 e 0,5%; submetidas à tensão normal efetiva de 50 kPa.

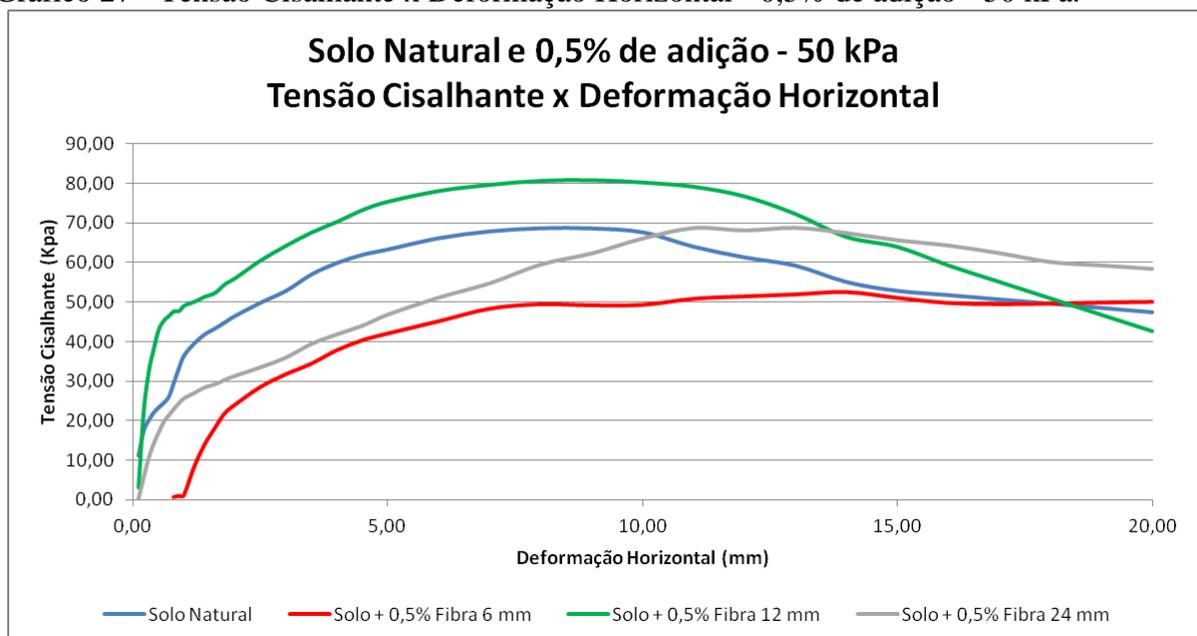
No Gráfico 26 percebe-se que para a tensão aplicada, o solo natural teve uma resistência de pico maior que todas as misturas ensaiadas. Este resultado, pode ser devido à pequena adição de fibras ao solo, fazendo com que a adição de fibras não tenha surtido nenhum efeito, pois a distância relativa entre as fibras foi muito grande.

Gráfico 26 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - 0,25% de adição - 50 kPa.



No Gráfico 27 percebe-se que para a tensão aplicada, houve um grande aumento da resistência de pico para a amostra com 0,5% de adição de fibra de 12 mm de comprimento. Este aumento é em decorrência de uma dosagem ótima de fibras, fazendo com que a mistura alcance uma boa interação solo/fibras, com pequenas distâncias entre fibras e uma homogeneidade da amostra.

Gráfico 27 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - 0,5% de adição - 50 kPa.

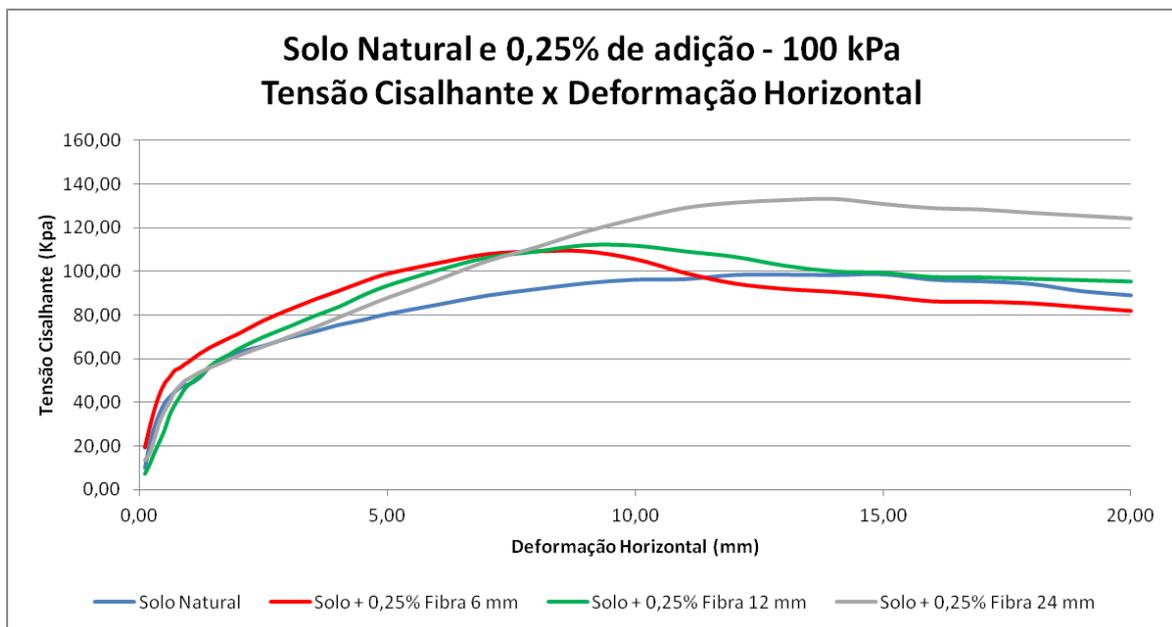


4.1.4.1.3 Solo Natural e Solo adicionado de fibras - Tensão Normal de 100 kPa

Os Gráficos 28 e 29 mostram a variação da tensão cisalhante (kPa) pelo deslocamento horizontal (mm), para as amostras de solo natural e solo acrescido de fibras de 6, 12 e 24 mm nas porcentagens de 0,25 e 0,5%; submetidas à tensão normal efetiva de 50 kPa.

No Gráfico 28 percebe-se que para a tensão aplicada, todas as amostras tiveram uma resistência de pico maior que o solo natural, o melhor resultado obtido foi para a amostra de solo + 0,25% de fibra de 24 mm. Possivelmente este resultado, assim como no item 4.1.4.1, se refere a pequena quantidade de fibra adicionada, não tendo ocorrido o "excesso" de fibras citado no item 3.2.1.2 - Dosagem e Mistura.

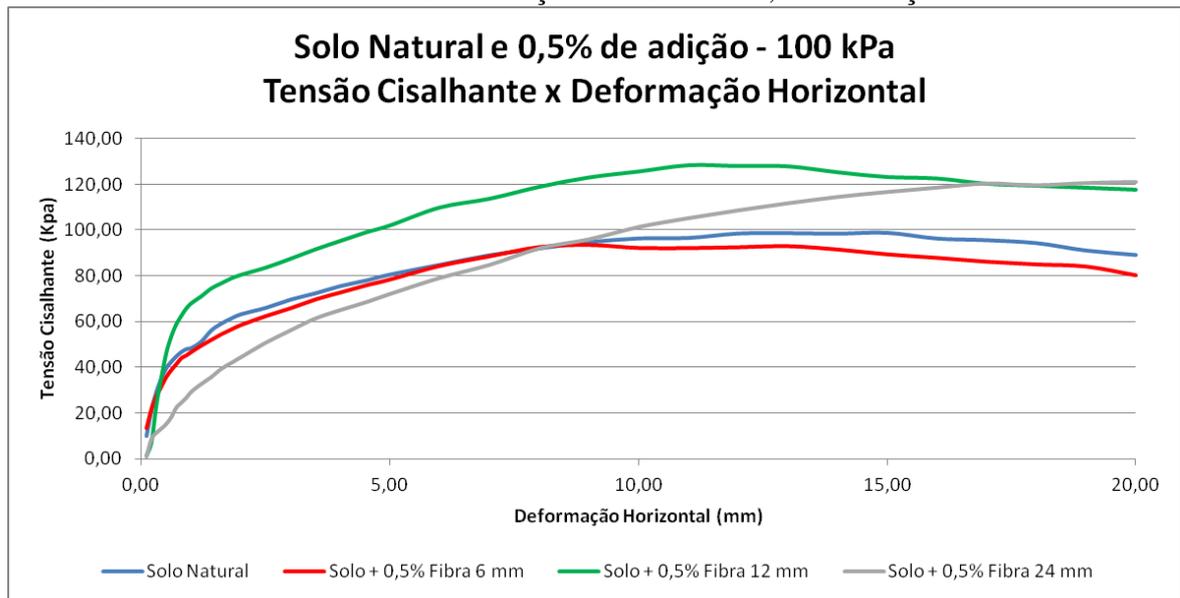
Gráfico 28 -Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - 0,25% de adição - 100 kPa



Fonte: Próprio Autor

No Gráfico 29 percebe-se que para a tensão aplicada, houve aumento de resistência de pico para as amostras de 0,5% de adição de fibras de 12 mm e 24 mm. Como dito anteriormente, a adição de 0,5% de fibras de 12 mm foi à dosagem ótima, apresentando elevados valores de resistência em relação ao solo natural.

Gráfico 29 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - 0,5% de adição - 100 kPa.

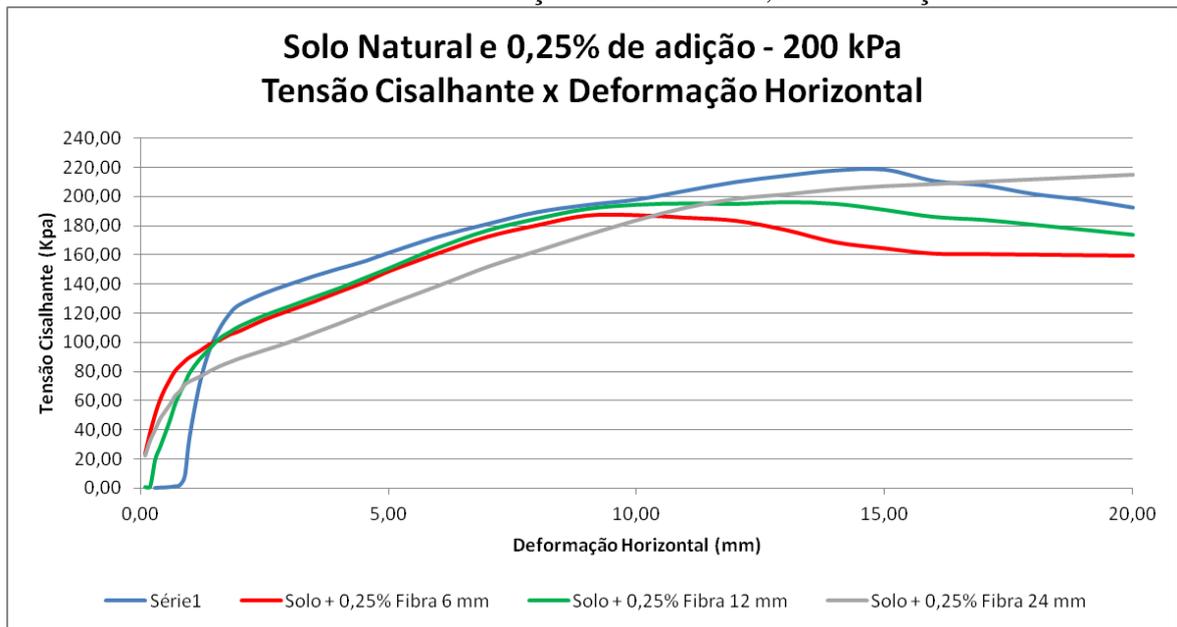


4.1.4.1.4 Solo Natural e Solo adicionado de fibras - Tensão Normal de 200 kPa

Os Gráficos 30 e 31 mostram a variação da tensão cisalhante (kPa) pelo deslocamento horizontal (mm), para as amostras de solo natural e solo acrescido de fibras de 6, 12 e 24 mm nas porcentagens de 0,25 e 0,5%; submetidas à tensão normal efetiva de 50 kPa.

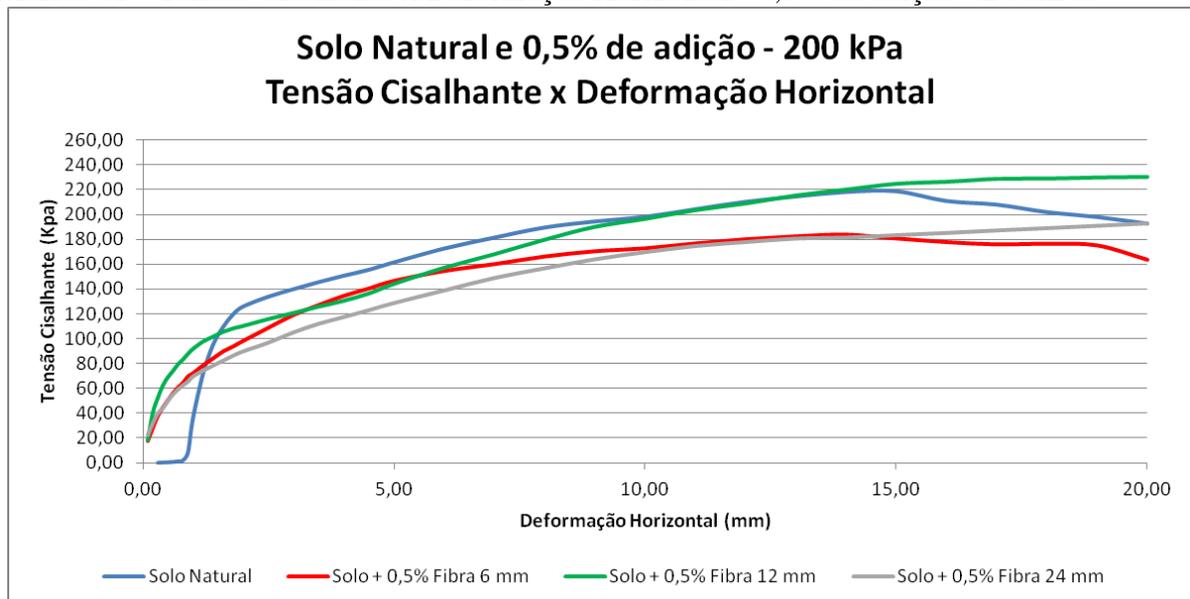
No Gráfico 30 percebe-se que para a tensão aplicada, todas as amostras tiveram uma resistência de pico menor que o solo natural. Assim como no item 4.1.4.2, este resultado, pode ser devido à pequena adição de fibras ao solo, fazendo com que esta adição não tenha surtido nenhum efeito, pois a distância relativa entre as fibras foi muito grande.

Gráfico 30 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - 0,25% de adição - 200 kPa.



No Gráfico 31 percebe-se que para a tensão aplicada, houve aumento de resistência de pico para as amostras de 0,5% de adição de fibras de 12 mm. Como dito anteriormente, a adição de 0,5% de fibras de 12 mm foi à dosagem ótima, apresentando valores de resistência maiores em relação ao solo natural.

Gráfico 31 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - 0,5% de adição - 200 kPa.



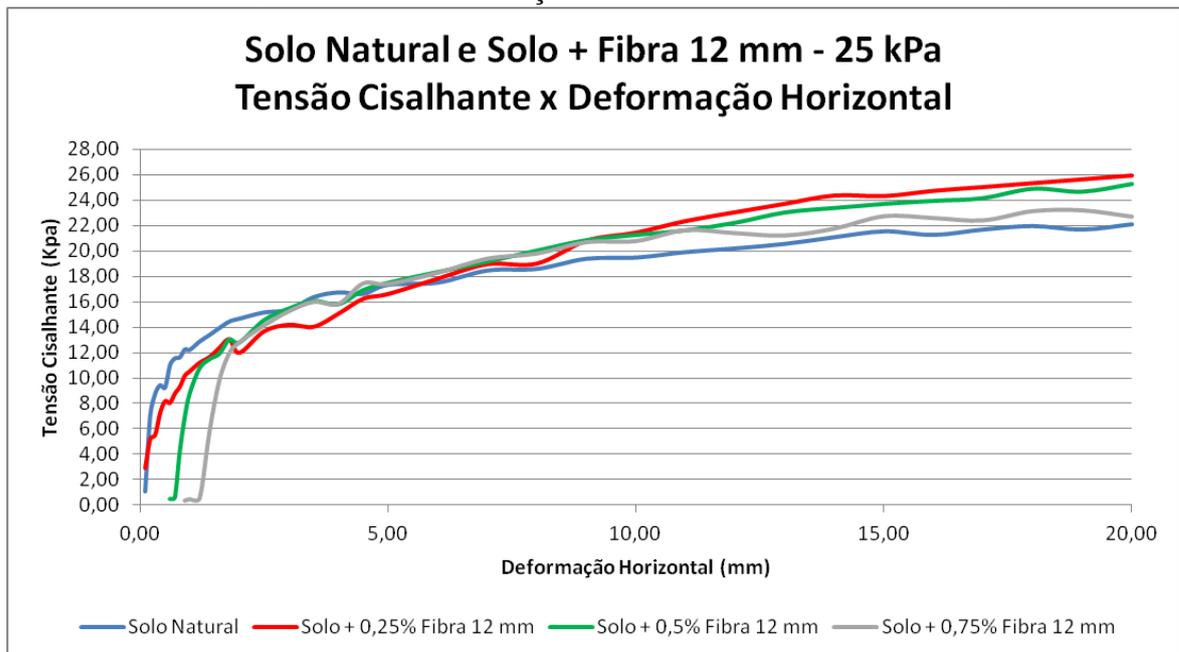
4.1.4.2 Ensaio Saturado

4.1.4.2.1 Solo Natural e Solo adicionado de fibras - Tensão Normal de 25 kPa

O Gráfico 32 mostra a variação da tensão cisalhante (kPa) pelo deslocamento horizontal (mm), para as amostras de solo natural e solo acrescido de fibras de 12 mm nas porcentagens de 0,25; 0,5 e 0,75%; submetidas à tensão normal efetiva de 25 kPa.

No gráfico percebe-se que para a tensão aplicada, houve um acréscimo da resistência para todas as amostras. Esse aumento foi mais significativo para a adição de 0,25% de fibra e menos significativo para a adição de 0,75%.

Gráfico 32 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Fibra de 12 mm - 25 kPa

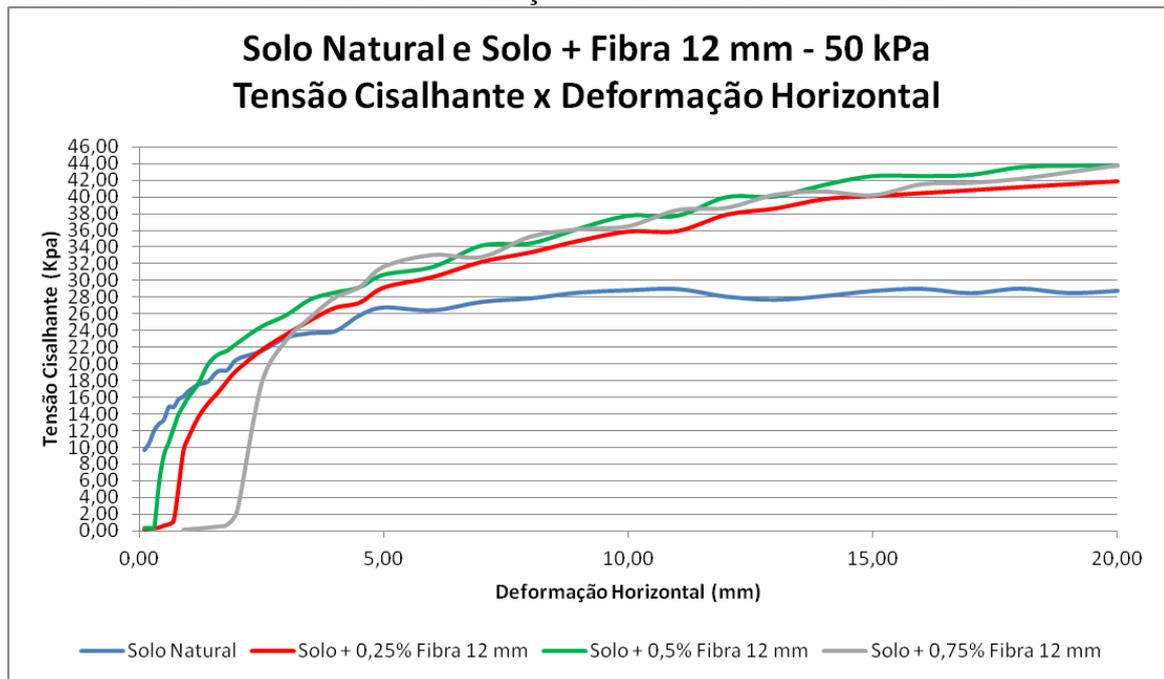


4.1.4.2.2 Solo Natural e Solo adicionado de fibras - Tensão Normal de 50 kPa

O Gráfico 33 mostra a variação da tensão cisalhante (kPa) pelo deslocamento horizontal (mm), para as amostras de solo natural e solo acrescido de fibras de 12 mm nas porcentagens de 0,25; 0,5 e 0,75%; submetidas à tensão normal efetiva de 50 kPa.

No gráfico percebe-se que para a tensão aplicada, houve um acréscimo da resistência para todas as amostras. Esse aumento foi mais significativo para as adições de 0,5 e 0,75% de fibra e menos significativo para a adição de 0,25%.

Gráfico 33 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Fibra de 12 mm - 50 kPa



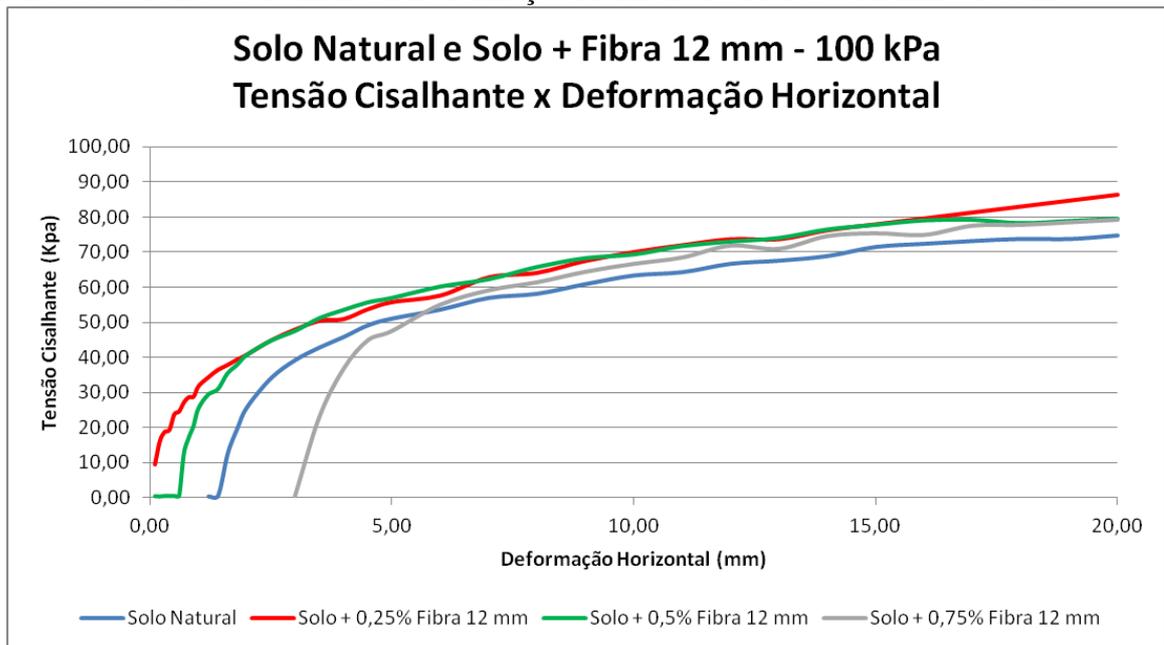
4.1.4.2.3 Solo Natural e Solo adicionado de fibras - Tensão Normal de 100 kPa

O Gráfico 34 mostra a variação da tensão cisalhante (kPa) pelo deslocamento horizontal (mm), para as amostras de solo natural e solo acrescido de fibras de 12 mm nas porcentagens de 0,25; 0,5 e 0,75%; submetidas à tensão normal efetiva de 100 kPa.

No gráfico percebe-se que para a tensão aplicada, houve um acréscimo da resistência para as 3 porcentagens adicionadas. Das misturas avaliadas, a que obteve maior acréscimo de resistência foi a com adição de 0,25% de fibra com 12 mm de comprimento.

Conforme citado no capítulo 3, quanto maior a tensão confinante, maiores as resistências de pico alcançadas, o que pode ser analisado neste gráfico. Para a adição de 0,25% de fibras, em relação ao carregamento de 50 kPa, houve um acréscimo de 106%.

Gráfico 34 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Fibra de 12 mm - 100 kPa



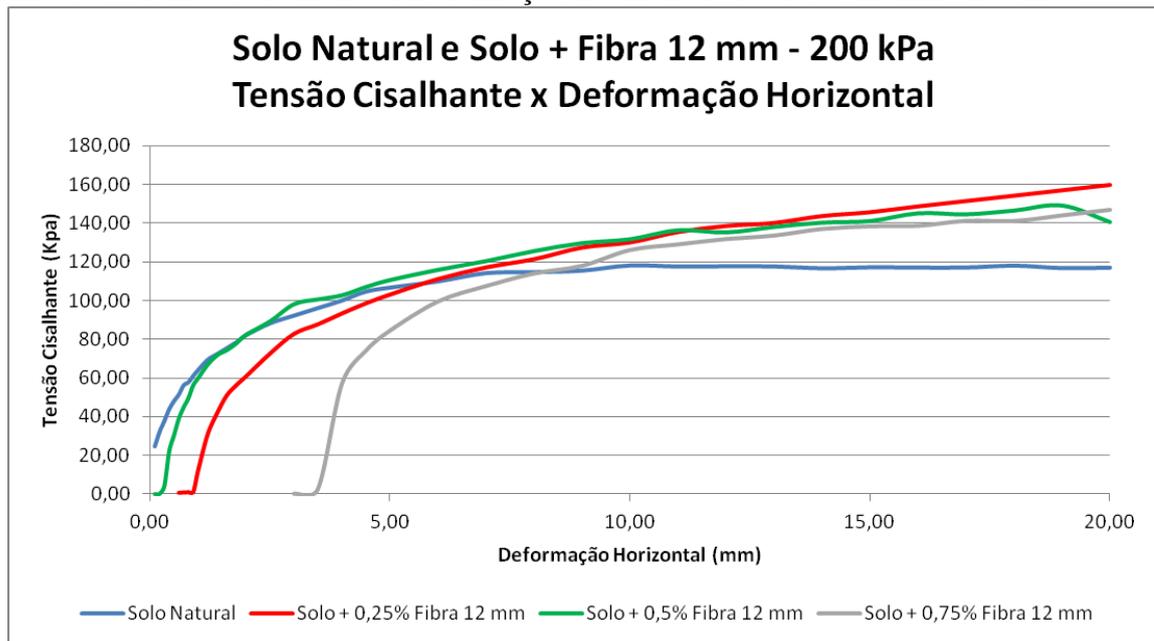
4.1.4.2.4 Solo Natural e Solo adicionado de fibras - Tensão Normal de 200 kPa

O Gráfico 35 mostra a variação da tensão cisalhante (kPa) pelo deslocamento horizontal (mm), para as amostras de solo natural e solo acrescido de fibras de 12 mm nas porcentagens de 0,25; 0,5 e 0,75%; submetidas à tensão normal efetiva de 200 kPa.

No gráfico percebe-se que para a tensão aplicada, houve um acréscimo da resistência para as 3 porcentagens adicionadas. Das misturas avaliadas, a que obteve maior acréscimo, assim como no carregamento anterior, foi a com adição de 0,25% de fibra com 12 mm de comprimento.

Conforme citado no capítulo 3, quanto maior a tensão confinante, maiores as resistências de pico alcançadas, o que pode ser analisado neste gráfico. Para a adição de 0,25% de fibras, em relação ao carregamento de 100 kPa, houve um acréscimo de 85,5%.

Gráfico 35 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal - Fibra de 12 mm - 200 kPa



4.1.4.3 Envoltórias de resistência

Neste item serão apresentados, de forma resumida, as envoltórias de resistência e os valores de ângulo interno (ϕ') e intercepto coesivo (c') encontrados para as amostras de solo natural e para as adições de fibras de 6, 12 e 24 mm, nas porcentagens de 0,25; 0,5 e 0,75% nos ensaios seco e saturado.

Houve, no geral, um acréscimo de resistência no estado seco para as amostras de 12 mm com adições de 0,5 e para as amostras de 24 mm com adições de 0,25 e 0,5%. Esse crescimento não aconteceu para a mistura com 6 mm devido ao pouco comprimento das fibras e conseqüente falta de entrosamento entre a matriz e a fibra, conforme visto na Tabela 8.

No ensaio saturado, pode-se perceber um acréscimo de resistência para todas as amostras ensaiadas. Sendo a porcentagem de adição de 0,5% a que apresentou crescimento mais efetivo em relação ao solo natural na condição saturada, Tabela 7.

Tabela 7- Ângulo de atrito interno (ϕ') e intercepto coesivo (c') para as amostras ensaiadas

	Seco		Saturado	
	Φ' (°)	c' (kPa)	Φ' (°)	c' (kPa)
Solo Natural	44,07	19	29,64	8
6 mm				
Solo + 0,25%	40,48	21	--	--
Solo + 0,5%	40,65	11	--	...Continua

... Continuação

		Seco		Saturado	
		$\Phi' (^{\circ})$		$c' (kPa)$	
12 mm				$\Phi' (^{\circ})$	$c' (kPa)$
Solo + 0,25%		41,57	21	35,27	
Solo + 0,5%		44,93	31	35,31	7
Solo + 0,75%		--	--	34,57	9
24 mm					9
Solo + 0,25%		42,89	29	--	
Solo + 0,5%		39,15	29	--	--

Fonte: Próprio Autor

Como já dito anteriormente, e observado na Tabela 8, houve uma variação no crescimento das tensões de cisalhamento de pico, sendo obtidos os melhores valores para as misturas com 0,5% de adição de fibra de 12 mm de comprimento e 0,25% de adição de fibra com 24 mm de comprimento.

Tabela 8 - Resistência de Pico (τ máx) alcançadas - Ensaio Seco

		SECO						
		6 mm		12 mm		24 mm		
		Solo Natural	0,25% Fibra	0,5% Fibra	0,25% Fibra	0,5% Fibra	0,25% Fibra	0,5% Fibra
σ (kPa)	τ máx (kPa)							
25	50,69	38,76	35,06	41,73	56,20	56,73	44,86	
50	68,71	62,59	52,65	65,48	80,93	62,86	68,63	
100	98,86	109,34	93,50	111,83	128,22	133,34	120,80	
200	218,83	187,15	184,08	196,29	230,22	214,79	192,60	

Fonte: Próprio Autor

Em relação ao ensaio saturado, os valores apresentados na Tabela 9, evidenciam o que já foi dito anteriormente, onde percebe-se um crescimento na tensão de cisalhamento de pico com o aumento da porcentagem de fibra.

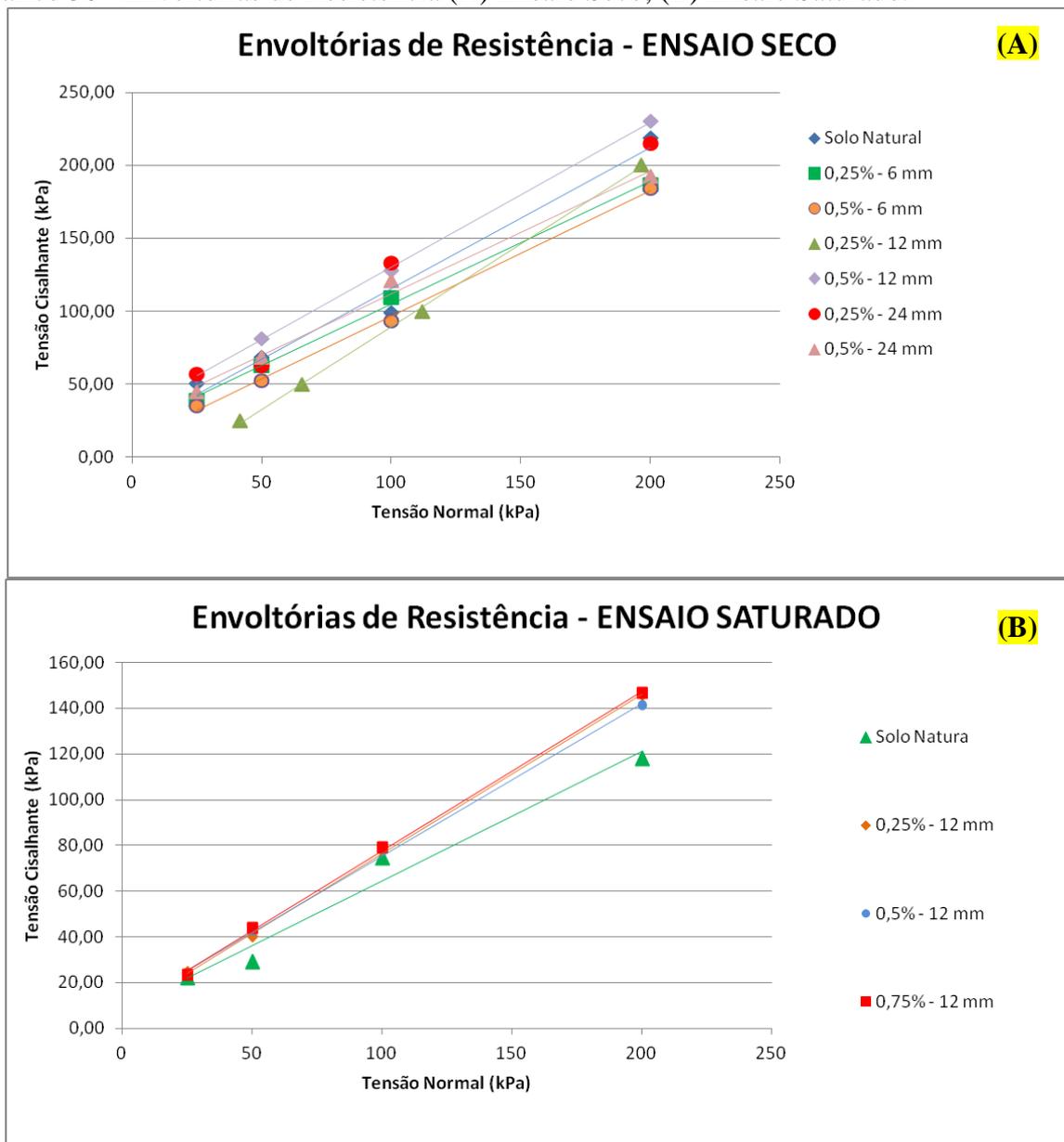
No Gráfico 36 são apresentadas as envoltórias de resistência obtidas com os ensaios de cisalhamento direto, tanto no ensaio seco quanto saturado. Fica evidenciado que as melhores misturas foram alcançadas para as misturas com adição de fibras com comprimento de 12mm.

Tabela 9 - Resistência de Pico (τ máx) alcançadas - Ensaio Saturado

σ (kPa)	SATURADO			
		12 mm		
	Solo Natural	0,25% Fibra	0,5% Fibra	0,75% Fibra
τ máx (kPa)	τ máx (kPa)	τ máx (kPa)	τ máx (kPa)	
25	22,13	24,39	23,69	23,23
50	28,99	40,08	42,52	43,77
100	74,69	77,84	77,84	79,17
200	117,87	145,84	141,10	146,63

Fonte: Próprio Autor

Gráfico 36 - Envoltórias de Resistência (A) Ensaio Seco; (B) Ensaio Saturado.



Fonte: Próprio Autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

A partir dos resultados apresentados e analisados nos capítulos anteriores foi possível chegar às conclusões abordadas neste Capítulo. Salientando que algumas delas já foram, de alguma forma, citadas no decorrer deste trabalho.

Neste capítulo são apresentadas as principais considerações e sugestões para estudos futuros, que resultaram da aplicação do programa experimental do solo estudado. Ressalta-se que todas as considerações obtidas estão vinculadas aos resultados obtidos neste estudo, onde foi possível conhecer melhor as potencialidades e as limitações dos materiais analisados.

5.1 Considerações Finais

Considerando o estudo realizado para o desenvolvimento desta pesquisa, cujos objetivos eram a caracterização do solo da jazida e realização de ensaios de cisalhamento direto para amostras de solo e solo + fibras, com comprimentos de 6, 12 e 24 mm, nas porcentagens de 0,25%; 0,5% e 0,75%.

O solo utilizado nesta pesquisa é descrito como uma areia argilo siltosa. Pelo Sistema Unificado de Classificação o solo é considerado uma argila magra arenosa e pelo Sistema de Classificação AASHTO é considerado um solo argiloso da categoria A-6 com índice de grupo (IG) igual a 11.

Verificou-se que o aumento do ângulo de atrito imposto pelas fibras no ensaio de cisalhamento direto das amostras, torna-se positivo quanto maior for o comprimento da fibra (12 mm e 24 mm), devendo-se atentar para não ocorrer um excesso de fibras adicionadas à mistura, caso haja excesso, as amostras perdem homogeneidade e conseqüentemente resistência.

Em relação ao intercepto coesivo, pode-se observar, da mesma forma que para o ângulo de atrito, um aumento tanto quanto maiores forem os comprimentos de fibra adicionados à mistura (12 mm e 24 mm), para o ensaio seco.

A falta de homogeneidade das amostras com adição de fibras com comprimentos de 6 mm e 24 mm ocasionou em resultados menores que o esperado. Esperava-se obter uma linearidade dos resultados, com resistência crescente em relação à adição de maiores comprimentos e porcentagens. Sendo almejadas maiores resistências para as amostras com adição de 0,75% de fibras de comprimento igual a 24 mm.

Esta falta de homogeneidade foi decorrência do método de mistura empregado e da pequena quantidade de amostra utilizada, cerca de 320 g para moldagem das amostras.

Das porcentagens e comprimentos estudados, o que proporcionou maior incremento de resistência em comparação à amostra de solo natural, foi à adição de 0,5% de fibras de comprimento igual a 12 mm.

De forma geral, a adição de fibras ao solo aumentou os parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico, como também a resistência pós - pico do mesmo. Percebe-se, ainda, que o acréscimo de resistência tende a reduzir com o aumento das deformações cisalhantes.

Baseando-se nos resultados obtidos, a adição de fibras ao solo é uma técnica viável, desde que se atente ao método de mistura, para que a disposição das fibras ocorra de forma homogênea dentro da matriz de solo, e que não haja o "excesso" de fibras ocasionado por grandes porcentagens de adição, fazendo com que o elemento de reforço não seja aproveitado na magnitude das suas características.

5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, buscou-se o atendimento dos objetivos do estudo proposto. Porém, no decorrer deste processo, a percepção do problema se modificou, revelando novas alternativas que até então não haviam surgido.

Em virtude disto, com o intuito de complementar esta pesquisa, algumas sugestões para a ampliação do conhecimento e prosseguimento do estudo sobre o reforço de solos com fibras em trabalhos futuros são citadas a seguir:

- Para uma melhor homogeneidade das amostras, pesquisar outros métodos de mistura do reforço com a matriz, de forma a evitar o aparecimento de "grumos" ou "novelos", alcançando desta forma melhores resultados de resistência com a adição de maiores comprimentos e porcentagens. São propostas duas técnicas, sendo a primeira a abertura prévia das fibras com ar comprimido e a segunda utilizando-se o método apresentado por Gondim (2008);
- Realização do ensaio variando-se, além de comprimentos e porcentagens das fibras, a compactidade das amostras, avaliando-se a influência da densidade relativa destas, através de ensaios com amostras fofas, medianamente compactas e compactas;

- Realizar ensaios triaxiais para obtenção de parâmetros de resistência e deformabilidade;
- Desenvolver modelos constitutivos para análise numérica, que reproduza o comportamento de solos reforçados com fibras, o que é de fundamental importância para a simulação de obras geotécnicas;
- Avaliar a influência da fibra de polipropileno em outras matrizes, podendo-se avaliar a influência da adição de fibras em solos cimentados ou acrescidos de cinza de casca de arroz.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, P.R.; VERTEMATTI, J.C. Introdução. In: VERTEMATTI, J.C. **Manual brasileiro de geossintéticos**. 1ª edição. São Paulo: Edgar Blücher, 2004.

ARAÚJO, S. **Curiosidades sobre a Muralha da China**. In: Mundo das Tribos, 2011. Disponível em < <http://www.mundodastribos.com/curiosidades-sobre-a-muralha-da-china.html>>. Acesso em 15/02/2013.

BARONI, M. **Notas de Aula - Resistência ao cisalhamento dos solos**. Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2011.

BEHAK, L. **Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal**. Dissertação(Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

BUDINSKI, K.G.; BUDINSKI, M.K. **Engineering materials: Properties and selection**. 8ª edição. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005, 853p.

BUENO, B.S.; LIMA, D.C.; TEIXEIRA, S.H.C.; RIBEIRO, N.J. **Soil fiber reinforcement: basic understanding**. In: International Symposium on Environmental Geotechnology. San Diego. Anais... v.1, p.878-884, 1996.

CASAGRANDE, M.D.T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

CASAGRANDE, M.D.T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

CASAGRANDE, M.D.T.; COOP, M.R.; CONSOLI, N.C. **Behavior of a fiber-reinforced bentonite at large shear displacements**. In: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. New York. v.132, n.11, p. 1505-1508, 2006.

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

CONSOLI, N.C.; CASAGRANDE, M.D.T.; COOP, M.R. **Behavior of a fiber-reinforced sand under large strains**. In: 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Osaka, 2005.

DOMONE,P.; ILLSTON,J. **Construction Materials: Their nature and behaviour**. 4ª edição. New York: Spon Press, 2010.

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

FERNANDES, W.D. **Resistência ao cisalhamento de solo melhorado quimicamente na cidade de Alegrete - RS.** In: 42º RAPv - Reunião Anual de Pavimentação. Gramado, 2013.

FESTUGATO, L. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices aspecto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

FEUERHARMEL, M.R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

GIRARDELLO, V. **Ensaio de placa em areia não saturada reforçada com fibras.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

GONDIM, L.M.; CASAGRANDE, M.D.T.; BARROSO, S.H.A. **Influência da adição de fibras de polipropileno em solos da região do baixo Jaguaribe do Ceará visando aplicação em solos de base para pavimentação.** In: Anais do XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2008. p. 2122-2129.

HANNANT, D.J. **Durability of polypropylene fibers in Portland cement-based composites: eighteen years of data.** Cement and Concrete Research, v. 28, n. 12, p. 1809-1817, 1998.

HEINECK, K.S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

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

HOLLAWAY, L. **Polymers: types, properties and applications.** In: DOMONE, P.; ILLSTON, J. **Construction Materials: Their nature and behaviour.** 4ª edição. New York: Spon Press, 2010. p 307-317.

HOMEM, T.R. **Comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

KLAMT, R.A. **Utilização da cal e da cinza da casca de arroz no melhoramento das propriedades geotécnicas dos solos.** Trabalho de Conclusão de Curso: Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2012.

MACAFERRI. **Diga adeus às trincas e rachaduras.** Folder Informativo. Disponível em: <http://www.maccaferri.com.br/media/om_www/brazil/downloads/folders/por/folder_FibroMac_2.pdf> acesso em 02/03/2013.

MACHADO, C.C.; LIMA, D.C.; ALMEIDA, R.M. **Estudo do comportamento da mistura solo-cimento reforçado com fibra sintética para uso em estradas florestais**. *Cerne*, v.4, n.1, p. 123-128, 1998.

MAGALHÃES, M.A. **Resistência ao arrancamento de grampos com fibras de polipropileno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

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

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

MAHER, M.H.; HO, Y.C. **Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite**. *Geotechnical Testing Journal*, v. 120, nº 8, p. 1387-1393, 1994.

MONTARDO, J.P. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1999.

MOURA, E. **Notas de Aula - Mecânica dos Solos**. Faculdade de Tecnologia de São Paulo - FATEC/SP. São Paulo, 2009.

NATARAJ, M.S.; ADDULA, H.R.; MCMANIS, K.L. **Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils**. In: International Symposium on Environmental Geotechnology. San Diego. Anais... v.1, p.826-835, 1996.

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3ª edição. Oficina de Textos: São Paulo, 2006.

RODRIGUES, R.E. **Caracterização e estabilização de um solo na cidade de Alegrete/RS com cimento Portland e cinza de casca de arroz**. Trabalho de Conclusão de Curso: Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2012.

SALES, K.C.S. **Melhoria de solos por inclusão de fibras naturais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade de Brasília. Brasília, 2011.

SANTOS, A.P.S. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra sob compressão confinada com medição lateral**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

SARZALEJO, A.G. et al. **Manual Técnico: Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto**. Macaferri do Brasil Ltda., 2009

SILVA, C.C. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

SILVA, T.F. **Mesopotâmia**. In: InfoEscola, 2010. Disponível em <<http://www.infoescola.com/historia/mesopotamia>>. Acesso em 15/02/2013

SPECHT, L.P. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

TAYLOR,G.D. **Materials in Construction: An introduction**. 3ª edição. England: Pearson Education Limited, 2000, p. 334.

TEODORO, J.M. **Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

TRINDADE, T.P.; IASBIK, I.; LIMA, D.C.; SILVA, C.H.C.; BARBOSA, P.S.A. **Latossolo vermelho-amarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória : estudo em laboratório**. REM: Revista Escola de Minas, v. 57, n. 1, p. 53-58. Ouro Preto, 2004.

TRINDADE, T.P.; IASBIK, I.; LIMA, D.C.; SILVA, C.H.C.; BARBOSA, P.S.A.; MINETTE, E. **Latossolo vermelho-amarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória: estudo realizado com amostras de grandes dimensões**. REM: Revista Escola de Minas, 58(1): p. 33-38. Ouro Preto, 2005.

TRINDADE, T.P.; IASBIK, I.; LIMA, D.C.; MINETTE, E; SILVA, C.H.C.; CARVALHO, C.A.B.; BUENO, B.S.; MACHADO, C.C. **Estudos laboratoriais do comportamento de um solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno, visando à aplicação em estradas florestais**. Revista Árvore, v.30, n.2, p. 215-222. Viçosa/MG, 2006.

ULBRICH, L.A. **Aspectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997.

VALE, A.C.do.; SOARES,J.B.; CASAGRANDE, M.D.T. **Aplicabilidade de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas tipo SMA**. In: 4º PDPETRO.Campinas - SP. 2007.

VENDRUSCOLO, M.A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

VERTEMATTI, J.C. **Manual brasileiro de geossintéticos**. 1ª edição. São Paulo: Edgar Blücher, 2004.

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