

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM MEIO
AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**Avaliação pedológica e geotécnica de solos modificados com fibra de
cana de açúcar**

Ana Carolina Moraes Rangel

Itajubá

2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM MEIO
AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

Ana Carolina Moraes Rangel

**Avaliação pedológica e geotécnica de solos modificados com fibra de
cana de açúcar**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de Concentração: Diagnóstico, monitoramento e gestão ambiental

Orientadora: Maria Inês Nogueira Alvarenga

Coorientadora: Adinele Gomes Guimarrães

Itajubá

2018

Agradecimentos

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela bolsa concedida, que permitiu a realização dessa pesquisa.

Agradeço a orientação sábia e justa da Prof. Maria Inês Nogueira Alvarenga, a co-orientação e proatividade da Prof. Adinele Gomes Guimarães e a todos os professores e pesquisadores que contribuíram com este trabalho, em especial ao Prof. Rogério Melloni da UNIFEI e ao Prof. Paulo Sérgio de Almeida Barbosa da UFV.

Sou grata aos técnicos de laboratório Osvaldo de Melo Rodrigues, Fabiano Nazario Santos, Josivaldo Junior Rodrigues por todo o esforço e dedicação nas mais adversas situações impostas durante os trabalhos práticos, e todos os servidores que tornaram possível a conclusão do presente trabalho.

A Eng. Civil Pamella Nobrega Neves, e aos graduandos Thaís de Souza Moura em Eng. Civil, Gabriel Siqueira Brasilio em Eng. Ambiental e Alana Lopes Junho em Eng. Hídrica, agradeço por sua dedicação nas pesquisas realizadas que contribuíram com a construção dessa dissertação.

Por fim, agradeço a todos os colegas de pesquisa e outros colaboradores que contribuíram de alguma forma para a finalização desse projeto.

Resumo

Alterações geotécnicas em solos impactam não somente seus atributos físicos, mas também, os químicos e biológicos, que por sua vez, também influenciam no resultado da alteração. Portanto, afim de analisar as modificações provenientes da adição de fibras de cana de açúcar nos atributos de dois solos de mineralogia distinta, porém pertencentes a mesma classe geotécnica, foi determinado o teor ótimo de adição de fibra para ambos entre as concentrações de 0, 0,5, 1, 1,5, 2 e 2,5 % de massa, assim como a condutividade hidráulica para cada teor. A partir desse valor, amostras compactadas de ambos os solos, com e sem fibra, foram submetidas a armazenamento por 0, 2, 4 e 6 meses para posterior análise de resistência à compressão não confinada, respiração microbiana e comprimento de micélio total. Os solos estudados apresentaram diferença significativa em todas as análises temporais, sendo que ocorreu ganho de coesão durante o período observado, para amostras com ou sem modificação. Houve aumento da condutividade hidráulica saturada com o aumento do acréscimo de fibra para ambos os solos, sem diferença significativa. As análises microbiológicas apresentaram sensibilidade da atividade microbiana e do comprimento do micélio total ao processo de compactação das amostras, ocorrendo redução do desenvolvimento de ambos durante o armazenamento. Os resultados indicaram um comportamento discrepante entre os solos estudados perante a modificação com fibra de cana de açúcar, demonstrando a necessidade do uso de classificações mais detalhadas em estudos geotécnicos.

Palavras-chave: solo modificado; fibra; classificação.

Abstract

Geotechnical alterations in soils impact not only their physical attributes, but also the chemical and biological ones, which in turn also influence the result of the alteration. Therefore, in order to analyze the modifications from the addition of sugarcane fibers in the attributes of two distinct mineralogical soils belonging to the same geotechnical class, the optimum fiber addition content for both concentrations of 0, 0.5, 1, 1.5, 2 and 2.5% mass was determined as well as the hydraulic conductivity for each content. From this value, compacted samples of both soils, with and without fiber, were submitted to storage for 0, 2, 4 and 6 months for later analysis of resistance to unconfined compression, microbial respiration and total mycelium. The results showed cohesion gain by adding fiber and improving hydraulic conductivity with increasing fiber addition. The studied soils presented a significant difference in all the temporal analyzes, and cohesion gain occurred during the observed period, both for samples with or without modification. Microbiological analyzes showed a great sensitivity of the studied parameters to the process of compaction of the samples, occurring a timid development during the storage. The results indicated a discrepant behavior among the studied soils before the modification with sugarcane fiber, demonstrating the necessity of using more detailed classifications in geotechnical studies.

Keywords: reinforced soil; fiber; classification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Diferentes procedimentos para reforço do solo.	19
Figura 3.2 Inter-relação entre microrganismos, matéria orgânica e interferência do manejo do solo.	21
Figura 4.1 Sequência dos ensaios realizados para desenvolvimento do estudo.	28
Figura 4.2 Perfil do Argissolo Amarelo. Coordenadas: 23k 0468447S 7511706W	29
Figura 4.3 Perfil do Latossolo Vermelho.	29
Figura 4.4 Estufa de secagem e esterilização SOLAB modelo SL100 com fibras de cana de açúcar lavadas.	34
Figura 4.5 Moinho de facas LOGEN Scientific modelo LSW 5000.	34
Figura 4.6 Corpo de prova preparado para saturação	37
Figura 4.7 Esquema de ensaio de condutividade hidráulica com carga decrescente	37
Figura 4.8 Corpo de prova durante a saturação	37
Figura 5.1 Granulometria do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico.	42
Figura 5.2 Granulometria do horizonte B de um Latossolo Vermelho distrófico típico.	43
Figura 5.3 Curvas de compactação obtidas no ensaio de Proctor normal do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico	46
Figura 5.4 Curvas de compactação obtidas no ensaio de Proctor normal do horizonte B de um Latossolo Vermelho distrófico típico.	47
Figura 5.5 Resistência à compressão não confinada em função do teor de fibra adicionado ao solo do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico	49
Figura 5.6 Condutividade hidráulica saturada em função do teor de fibra adicionado ao material do horizonte B de dois solos estudados.	50
Figura 5.7 Valores médios de coesão (c_u) (KPa) do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico armazenados por 0, 2, 4 e 6 meses em refrigerador à 5°C.	53
Figura 5.8 Valores médios de coesão (c_u) (KPa) do horizonte B de solos com acréscimo de 0 e 1,5% de massa de fibra de cana de açúcar armazenados por 0, 2, 4 e 6 meses em refrigerador à 5°C	54
Figura 5.9 Valores médios de atividade microbiana ($\mu\text{g CO}_2/\text{g de solo seco.dia}$) no horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho	

distrófico típico com 0 e 1,5% de adição de massa de fibra de cana de açúcar, armazenados por 0, 2, 4 e 6 meses em refrigerador à 5°C. 56

Figura 5.10 Corpos de prova de Argissolo Amarelo (acima) e Latossolo Vermelho (abaixo) com 1,5% de fibra armazenados por 2, 4 e 6 meses, respectivamente, da esquerda para direita. 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 Valores de umidade para limites de liquidez e plasticidade do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico.....	41
Tabela 5.2 Textura e grau de flocculação do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico.....	41
Tabela 5.3 Teor de Agregados (TA) do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico.....	44
Tabela 5.4 Diâmetro médio geométrico de agregados (DMG) do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico	45
Tabela 5.5 Valores de densidade de partículas do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico.....	45
Tabela 5.6 Valores médios de resistência à compressão não confinada (q_u)* com diferentes teores de fibra no horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico.....	48
Tabela 5.7 Valores médios de Condutividade Hidráulica Saturada* para o horizonte B de solos com adição de fibra nos teores de 0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 e 2,5 % de massa.....	50
Tabela 5.8 Valores médios de coesão (c_u)* do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico com adição de fibra nos teores de 0 e 1,5% de massa.....	51
Tabela 5.9 Valores médios de coesão (c_u)* do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico armazenados por 0, 2, 4 e 6 meses em refrigerador à 5°C.....	52
Tabela 5.10 Valores médios de coesão (c_u) (KPa)* do horizonte B de solos com adição de 0 e 1,5% de fibra de cana de açúcar armazenados por 0, 2, 4 e 6 meses em refrigerador à 5°C.....	53
Tabela 5.11 Valores médios de atividade microbiana* no horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico com 0 e 1,5% de adição de massa de fibra de cana de açúcar, armazenados por 0, 2, 4 e 6 meses em refrigerador à 5°C.....	57
Tabela 5.12 Valores médios de micélio total* do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico.....	57

Tabela 5.13 Valores médios de micélio total* do horizonte B de solos com 0 e 1,5% de adição de massa de fibra de cana de açúcar.....	57
Tabela 5.14 Valores médios de micélio total* do horizonte B de solos armazenados por 0, 2, 4 e 6 meses em refrigerador à 5°C.....	58

SUMÁRIO

1	Introdução	12
2	Objetivos.....	13
2.1	Objetivo Geral	13
2.2	Objetivos Específicos	13
3	Revisão bibliográfica	14
3.1	Classificações dos solos	14
3.2	Solos modificados com resíduos de processos industriais	17
3.2.1	Alterações mecânicas no solo	21
3.2.2	Alterações físicas no solo.....	23
3.2.3	Contribuição da mineralogia no comportamento do solo modificado	24
3.2.4	Alterações biológicas no solo	26
4	Metodologia.....	28
4.1	Caracterização dos solos	29
4.1.1	Classificação pedológica e geotécnica dos materiais utilizados	29
4.1.2	Determinação da curva granulométrica	32
4.1.3	Determinação dos limites de consistência	32
4.1.4	Determinação da textura, grau de flocculação da argila e argila dispersa em água.....	32
4.1.5	Determinação do teor de agregados e diâmetro médio geométrico dos mesmos	33
4.1.6	Determinação da densidade de partículas	33
4.1.7	Determinação da umidade ótima de compactação	33
4.2	Comportamento dos solos com adição de fibra de cana de açúcar	34
4.2.1	Preparação da fibra.....	34
4.2.2	Determinação do teor ótimo de fibra	34
4.2.3	Determinação da variação da condutividade hidráulica saturada com adição de fibra	36

4.2.4	Determinação da variação da resistência à compressão não confinada ao longo do tempo	37
4.2.5	Determinação da biomassa e atividade microbiana ao longo do tempo	38
4.2.6	Determinação do comprimento de micélio total ao longo do tempo	39
5	Resultados.....	41
5.1	Caracterização do solo.....	41
5.2	Modificações do solo com fibra de cana de açúcar.....	47
6	Conclusões.....	60
7	Considerações Finais	61
8	Referências.....	63
9	Apêndice	68
9.1	Dados estatísticos	68
9.1.1	Determinação do Teor ótimo de Fibra	68
9.1.2	Determinação da variação da Condutividade Hidráulica com acréscimo de fibra.....	68
9.1.3	Determinação da variação da Resistência à compressão não confinada ao longo do tempo	69
9.1.4	Determinação da biomassa microbiana e respiração ao longo do tempo	69
9.1.5	Determinação do micélio total ao longo do tempo	70
10	Anexo I	71

1 INTRODUÇÃO

Solos são sistemas complexos, formados por camadas que possuem características físicas, químicas e biológicas que são inter-relacionadas e codependentes. A melhor maneira de se determinar o uso adequado de um solo é classificá-lo segundo critérios definidos, a fim de se estabelecer um histórico confiável que permita a escolha mais adequada e estabeleça limites seguros para seu uso, evitando riscos e prejuízos.

Contudo, devido às finalidades distintas com diferentes prioridades de parâmetros, desenvolveram-se diversas classificações com metodologias, custo e demanda de tempo variadas. Dentre essas classificações, as mais simples abordam poucos aspectos físicos e são encontradas nas aplicações mecânicas do solo, nas quais o mesmo é tratado como material inerte. Consideração essa que pode ser imprudente tanto quanto à negligência de parâmetros químicos, tais como a mineralogia do solo, quanto à mutabilidade do material, principalmente quando alterado pela adição de materiais a fim de se obter ganho de resistência mecânica, situação encontrada na prática da geotecnia.

Classificações mais detalhadas permitem uma maior diferenciação dos solos, tornando possível estabelecer padrões de comportamento e, até mesmo, prever resposta à aplicação de técnicas, como a adição de materiais fibrosos ao solo, concedendo uma melhor qualidade de decisão sobre a técnica mais adequada para recuperar uma área em determinadas condições, como a melhoria da estabilidade de taludes.

O uso de materiais fibrosos possui muitas aplicações na geotecnia, incluindo a distribuição randômica de fibras. Essa prática pode ser empregada com materiais diversos, buscando trazer melhorias mecânicas ao solo através da inclusão de pequenas quantidades de fibra que demanda poucos recursos. Contudo, os resultados variam de acordo com a interação das características do material utilizado com os atributos do solo.

Embora haja diversos trabalhos com o uso de fibras, sendo a maioria com a aplicação de materiais sintéticos, há uma grande carência na associação desses estudos a classificações adequadas de solos e observações do comportamento do material resultante no decorrer do tempo.

Este estudo irá fornecer informações sobre a diferença de comportamento de solos perante a adição de fibras, comparando suas classificações e observando a modificação ou manutenção da situação inicial gerada pela fibra ao longo do tempo, viabilizando a percepção do real comportamento de um solo modificado com fibra para aplicação da técnica.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar as modificações provenientes da adição de fibras nos atributos de dois solos de mineralogia distinta.

2.2 Objetivos Específicos

- Definir e caracterizar os solos estudados segundo atributos pedológicos e geotécnicos.
- Verificar o efeito da adição de fibra de cana de açúcar sobre a resistência à compressão não confinada dos solos.
- Verificar o efeito da adição de fibra de cana de açúcar sobre a condutividade hidráulica saturada dos solos.
- Analisar o efeito de períodos de armazenamento sobre a resistência não drenada de dois solos com adição de fibra de cana de açúcar.
- Analisar a influência, ao longo do tempo, da adição da fibra de cana de açúcar sobre o comprimento de micélio total, a atividade e a biomassa dos microrganismos presentes no solo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Classificações dos solos

A caracterização dos solos permite o enquadramento do material estudado em um determinado conjunto de parâmetros estabelecidos para formar padrões de ocorrência, semelhança e diferenças, entre outras observações, de modo que a descrição do material é realizada de acordo com o objetivo de seu uso, permitindo que os solos sejam agrupados em conjuntos semelhantes.

As diversas classificações existentes podem ser separadas por observações, entre outras, de cunho pedológico ou geotécnico, que interpretam os perfis de solo de forma diferente, assim como demonstrado por Barison, Alvarenga e Pons (2014) (Quadro 3.1).

As divergências de interpretação se iniciam na diferenciação dos horizontes e na forma de observar o material de solo. No Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) (ASTM, 2011), utilizado na geotecnia, os solos são analisados como uma massa independente para usos em obras e aplicações geotécnicas. Do ponto de vista da engenharia, o objetivo da classificação é prever o comportamento do solo ou, ao menos, orientar o programa de investigação ideal para um determinado problema. Enquanto o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (EMBRAPA, 2006), empregado na pedologia, observa o perfil do solo como conjunto, trazendo informações sobre a sua formação, possibilidades de uso e estabilidade, tanto do material quanto de suas estruturas.

As classificações para fins geotécnicos possuem o benefício da simplicidade, que tornam sua aplicação extremamente rápida e de baixo custo, pois os poucos ensaios necessários para sua determinação, como granulometria conjunta e limites consistência, exigem poucos recursos e podem ser realizados em um curto período de tempo.

Por outro lado, a classificação pedológica requer uma coleta de material mais detalhada, uma quantidade maior de ensaios, mais complexos e de maior custo, e conseqüentemente, mais tempo para se obter conclusões. Em contrapartida, a classificação pedológica também possui uma série de observações de campo, sem custo, que são imprescindíveis para os resultados. Tratam-se das características morfológicas dos horizontes: cor, textura, estrutura, porosidade, cerosidade, consistência, cimentação, nódulos e concreções minerais, presença de carbonatos, presença de manganês, presença de sulfetos, eflorescência e coesão (SANTOS et al, 2005).

Quadro 3.1 Correlação entre as nomenclaturas de atributos dos solos usados em pedologia e geotecnia.

Atributos	Pedologia	Geotecnia	Características
Horizontes ou Camadas	Horizonte O ou H	Solo Orgânico	Em geral são materiais de cor escura e odor característico devido à decomposição de grande quantidade de matéria orgânica. São comuns em áreas de acúmulo de água (H) como várzeas e manguezais; ou regiões montanhosas de clima frio (O). São solos muito sujeitos à subsidência e assim de difícil uso na engenharia civil.
	Horizonte A	Solo Orgânico	Solo mineral que apresenta alguma concentração de matéria orgânica proveniente principalmente da decomposição do sistema radicular de plantas. Recobrem todos os tipos de solos, correspondendo aos primeiros centímetros de profundidade no perfil sem alteração. Sua profundidade, quando não removida por efeito da erosão ou uso antrópico, varia de 2 cm até mais de 100cm, dependendo da sua posição na paisagem.
	Horizonte B	Solo Residual Maduro	Também conhecido como Solo laterizado ou horizonte diagnóstico, por ser a camada de solo com maior grau de intemperismo. Possui, em geral, coloração vermelho-escura a amarela, em função da concentração, respectivamente, de hematita e goetita. Além dos óxidos de ferro, são ricos em óxidos de alumínio (gibsitita), e o argilomineral mais abundante é a caulinita. Sua composição mineralógica proporciona boa estabilidade estrutural, boa drenagem, boa resistência aos processos erosivos e boa estabilidade geotécnica.
	Horizonte C	Solo Residual Jovem	Ainda preserva resquícios da rocha de origem, como preservação de sua cor e da estrutura originais. Apresenta espessuras e texturas muito variáveis, em função da rocha e da posição no relevo. Possui como importante característica a presença de minerais primários de fácil intemperismo, como os feldspatos; e, em alguns locais, ainda preservam em sua composição argilas expansivas. Mas como são materiais em que predomina a fração silte, não são estruturados e não apresentam resistência aos processos erosivos.
	Saprolito	Saprolito	O Saprolito é a rocha decomposta, incoesa, ausente de agregação de grãos minerais. É considerada a transição solo-rocha. Pode conter blocos de rocha em diversos graus de alteração e a estrutura original da rocha de origem ainda é preservada e facilmente distinguível. É um material muito friável, de fácil desagregação mecânica, fácil de ser escavado.
	Regolito	Rocha alterada	Camada de rocha alterada que pode se apresentar desde pouco a muito alterada. Nesta camada, a rocha apresenta nítida descoloração oriunda da alteração física e química dos minerais primários existentes. Há uma nítida perda de resistência mecânica e aumento considerável na permeabilidade.
	Rocha sã	Rocha sã	Consiste em rocha sem vestígios da decomposição de seus minerais, sendo a camada de maior resistência mecânica no perfil.

Fonte: Modificado de Barison, Alvarenga e Pons (2014).

Algumas características morfológicas permitem inferências sobre aspectos físicos, químicos e mineralógicos do solo que, por sua vez, possibilitam conclusões sobre fertilidade, manejo, comportamento mecânico e geotécnico do material, sendo essas informações essenciais para o entendimento do comportamento dos solos tanto de forma natural, quanto aos seus diferentes usos.

Negligenciar determinadas características durante a classificação dos solos pode ser comum em vários campos de estudo, contudo, este hábito pode comprometer seriamente a qualidade dos resultados de obras de terra, levando a perdas materiais e ambientais.

Observações mais completas, como a pedológica, embora demandem mais tempo e recursos, permitem uma maior precisão e segurança na destinação do uso de solos, fato que traz benefícios em longo prazo, tanto para a pesquisa quanto para empreendimentos.

Os argilominerais, por exemplo, tem importância no solo devido a sua expressiva contribuição aos atributos físicos e químicos do solo, tais como: textura, estrutura consistência, permeabilidade, expansão e contração, disponibilidade de nutrientes, CTC, pH, sorção etc. Esses atributos são resultantes, sobretudo, do seu pequeno tamanho de partícula (propriedades coloidais), elevada área superficial e reatividade de superfície (KÄMPF; MARQUES; CURI, 2012). Estes mesmos autores apontam como tem sido destacada a importância de minerais do grupo de óxidos, principalmente Fe e Al, nos atributos físicos e químicos dos solos tropicais. A gibbsita (óxido de alumínio) e a caulinita, por exemplo, influenciam a estrutura dos latossolos originando, respectivamente, macroestrutura do tipo granular e em blocos (FERREIRA, M., 2010; FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999).

A reatividade dos óxidos de Fe sofre interferência direta da área superficial específica (ASE) total desses óxidos que, quanto mais elevada, maior será a superfície de reação. A ASE é influenciada pela presença de grupos funcionais que podem interagir com espécies iônicas na fase líquida e gases, e também por atributos dos minerais como o tamanho de partículas, de forma que diferentes óxidos de Fe apresentam diferentes ASE (Quadro 3.2) e, conseqüentemente, variados graus de reatividade (COSTA; BIGHAM, 2009).

Quadro 3.2 Valores de área superficial específica de óxidos de ferro sintéticos.

Mineral	Área superficial específica total ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)
Goethita	8-200
Hematita	2-90

Fonte: Modificado de Costa e Bigham (2009).

Outro aspecto morfológico definido pelos óxidos de Fe são as cores que ocorrem nos matizes (Quadro 3.3): vermelho (R), vermelho amarelo (YR), amarelo (Y) e até amarelo esverdeado (GY).

Dentre os óxidos de Fe, a goethita é o mineral mais abundante na natureza, ocorrendo em quase todos os ambientes pedogênicos. Esse mineral apresenta cores amareladas a brunadas, enquanto a Hematita, segundo óxido de Fe mais comum na natureza, exibe cores vermelhas a arroxeadas, que em ambos os casos, sofrem influência de alguns fatores como: teor de matéria orgânica, umidade do solo e agregação (COSTA; BIGHAM, 2009).

Quadro 3.3 Matiz no Sistema de Munsell associada frequentemente a alguns óxidos de ferro.

Mineral	Matiz no Sistema de Munsell
Ferrihidrtita	5YR - 7,5YR
Goethita	2,5YR – 7,5YR
Hematita	5R – 2,5 YR
Lepidocrocita	5YR – 7,5YR
Maghemita	2,5YR – 5YR

Fonte: Modificado de Costa e Bigham (2009).

Apesar da importância dos aspectos mineralógicos para o estudo do comportamento dos solos, muitas pesquisas em geotecnia (LI et al, 2014; MALEKZADEH; BISEL, 2012; PRADHAM; KAR; NAIK, 2012; ZAIMOGLU; YETIMOGLU, 2011) apresentam apenas a classificação pelo SUCS (ASTM, 2011), enquanto estudos nacionais variam entre descrições e classificações diversas, tais como: pedológica (BOLANÕS, 2013); DNIT (TRINDADE et al, 2006); até classificações de textura simples (LEOCÁDIO, 2005; SALES, 2011; FEUERHAMEL, 2000; FESTUGATO, 2008; MONGROVEJO, 2013).

3.2 Solos modificados com resíduos de processos industriais

A agricultura, a indústria e a urbanização induzem à degradação dos solos através de transformações físicas, químicas e biológicas, que modificam as características originais dos solos que, a partir dessas alterações, irão apresentar em sua composição, em várias proporções, materiais pedológicos, geológicos e geotécnicos (SÉRÉ et al, 2010) que, por sua vez, não possuem o comportamento de um solo inalterado.

As alterações dos solos são causadas por diversos motivos, dependendo de seu uso e ocupação, sendo que o principal objetivo da aplicação das técnicas de geotecnia é a

modificação dos atributos físicos e mecânicos do solo, atingindo uma maior estabilidade do perfil para situações diversas como taludes de aterro, cortes de estrada e aterros sanitários.

Os vários métodos que foram desenvolvidos para estabilização do solo podem ser divididos em três tipos, como métodos mecânicos, químicos e físicos (Figura 3.1). A técnica do solo reforçado é um dos métodos físicos de aumento de resistência (PRADHAN; KAR; NAIK, 2012; HEJAZI et al, 2012).

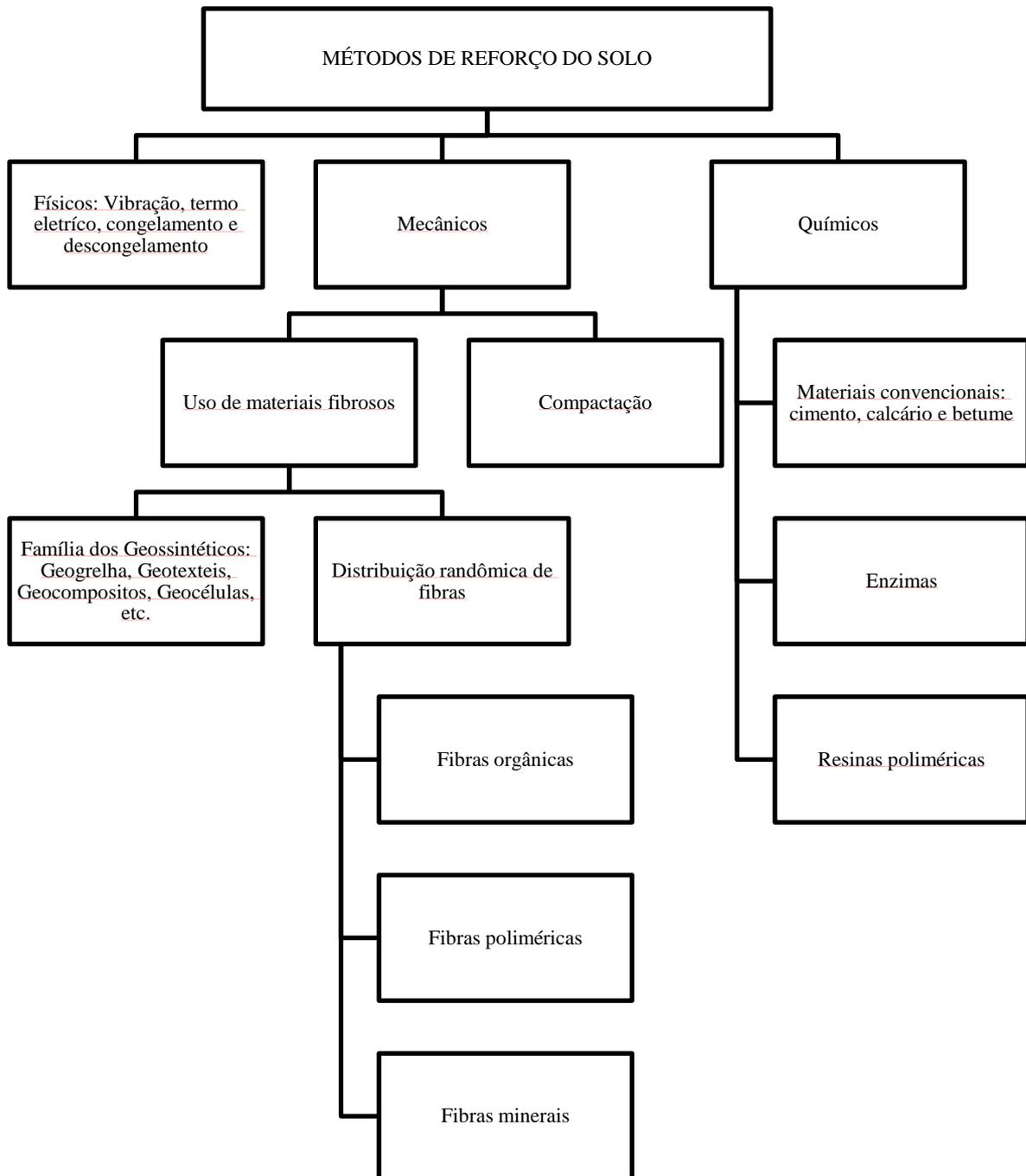
Para modificação do solo, pode-se aplicar a inclusão randômica de fibras, orgânicas, minerais ou sintéticas, que apresenta mudanças significativas nos valores de coesão, promovendo um grande ganho na estabilidade do material compósito. Essa técnica consiste na adição de material fibroso de distribuição aleatória, seguido da compactação da mistura (TRINDADE et al, 2006).

A modificação de solos com fibras proporciona a inserção de um material com alta resistência à tração, gerando uma melhoria nas propriedades mecânicas dos solos, aumentando sua resistência e diminuindo sua compressibilidade (FERREIRA, C., 2010).

Dentre os estudos mais recentes sobre o acréscimo de fibras ao solo encontram-se, principalmente, estudos sobre fibras de polipropileno (TRINDADE et al, 2006; FEUERHAMEL, 2000; FESTUGATO, 2008; LI et al, 2014; MALEKZADEH; BISEL, 2012; PRADHAM; KAR; NAIK, 2012; ZAIMOGLU; YETIMOGLU, 2011; PLÉ; LÊ, 2012; TANG; SHI; ZHAO, 2010; FERREIRA, C., 2010, DIAMBRA, et al, 2010). Entretanto, há pesquisas diversas sobre fibras orgânicas, em sua maioria de origem vegetal, como sisal (LEOCÁDIO, 2005), coco verde (BOLANÕS, 2013) e celulose (MONGROVEJO, 2013).

As fibras poliméricas, em geral, como as de polipropileno, são fornecidas em dimensões específicas por indústrias especializadas, enquanto as fibras de origem vegetal ainda não possuem um processo padronizado para seu tratamento, variando de acordo com a forma e disponibilidade da fibra estudada. Mongrovejo (2013) utilizou um liquidificador industrial para separar, em meio a uma solução, as fibras de celulose de sacos de cimento picotados, enquanto Leocádio (2005) fez uso de guilhotina para atingir o comprimento desejado para as fibras de sisal que foram adquiridas em fios, e Bolanõs (2013) utilizou tesoura e moedor manual para processar fibras de coco secas e desfiadas.

Figura 3.1 Diferentes procedimentos para reforço do solo.



Fonte: Modificado de Hejazi et al., (2012).

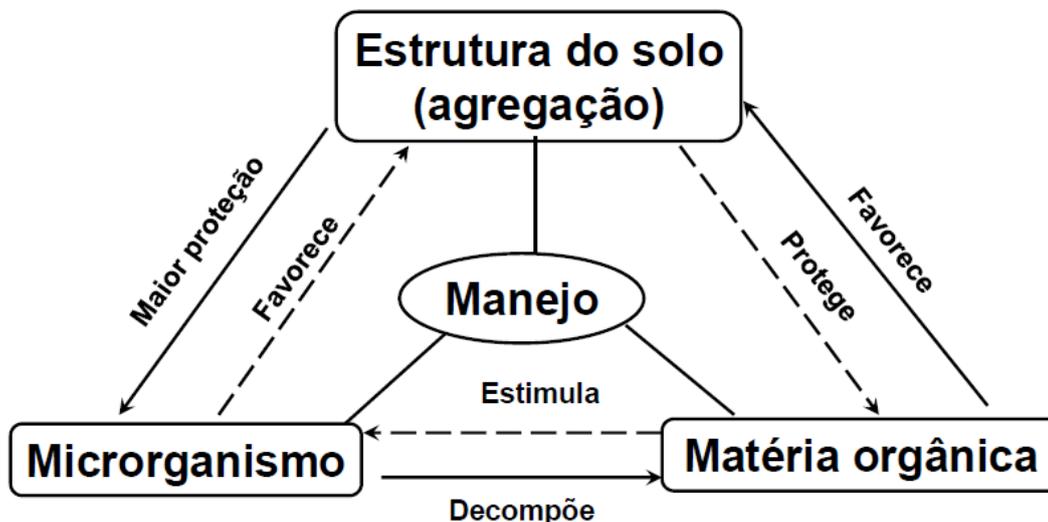
Sobre as melhorias mecânicas geradas pela adição de fibras, Plé e Lê (2012), assim como Li et al. (2014) e Malekzadeh e Bisel (2012), afirmam que a modificação com fibras de polipropileno é capaz de aumentar a resistência à fissuração do solo e a estabilidade das estruturas terrestres, assim como coberturas de aterros sanitários, nos quais, tradicionalmente, era utilizado um refoço horizontal contínuo que necessitava de ancoragem. Em contraste, o

uso de fibras discretas não precisa de ancoragem, tendo seu custo reduzido e sendo viável tecnicamente.

O uso de materiais orgânicos para estabilização de solos na recuperação de áreas degradadas, assim como biomantas, estacas vivas e paliçadas, também alcançou a geotecnia. Atualmente, encontram-se materiais orgânicos aplicados tanto na forma de geomantas quanto na de fibras de distribuição aleatória, como as de côco, sisal e cana-de-açúcar (HEJAZI et al., 2012). Tais materiais (orgânicos) empregados para melhoria da estabilidade dos solos são, em grande parte, compostos de restos de podas, bagaços, cascas, folhas e materiais com baixa umidade, constituídos principalmente de altos teores de lignina e celulose, que resultam em uma decomposição mais lenta. Portanto, a composição do material é de extrema importância, pois a decomposição da matéria orgânica não apenas interfere no reforço proporcionado pelo material aderido ao solo, como gera resíduos que melhoram sua estrutura (Figura 3.2). De forma que a estrutura dos solos modificados apresenta uma característica de variação espaço-temporal em suas propriedades e processos (SOMMER, 2006).

Alterações na matriz do solo que incluam acréscimo de matéria orgânica e alterações da sua estrutura interferem diretamente na microbiota, desencadeando um ciclo de alterações que impactam diretamente na formação e estabilidade dos agregados do solo, como pode ser observado na Figura 3.2. Assim, tanto a inclusão de fibras (matéria orgânica) quanto a compactação do solo (diminuição de espaços vazios), estão inter-relacionadas com esse fator, resultando em modificações de comportamento, não só sob aspecto de manejo, mas também na sua aplicação como matéria-prima para obras civis.

Figura 3.2 Inter-relação entre microrganismos, matéria orgânica e interferência do manejo do solo.



Fonte: Modificado de Moreira e Siqueira (2006).

3.2.1 Alterações mecânicas no solo

O comportamento do material compósito, resultante da adição de fibra ao solo, é definido pelas características e propriedades dos materiais relacionados, de forma que a interação matriz-reforço depende das atributos de ambos.

As principais mudanças no comportamento de solos com a inclusão de fibras são: compactação, resistência de pico, resistência pós-pico, deformabilidade, variação volumétrica, modo de ruptura, condutividade elétrica, entre outras (FEUERHARMEL, 2000; FESTUGATO, 2008). Estas alterações no solo variam de acordo com o teor, comprimento, orientação e módulo de elasticidade da fibra, a adesão da fibra à matriz do compósito (rugosidade), a tensão confinante e o modo de carregamento dos ensaios (FERREIRA, C., 2010).

Estudos realizados em solos argilosos por Plé e Lê (2012) e por Malekzadeh e Bisel (2012), mostram que sempre há melhoria na resistência mecânica de solo argiloso alterado com fibra, sendo que quando submetido à compressão, o material compósito torna-se mais rígido com acréscimo crescente de fibra. O material estudado também apresentou benefícios na ductilidade, indicando que a modificação com fibra pode ser capaz de mitigar potencial craqueamento induzido por assentamentos diferenciais e, assim, estabilizar superfícies de aterro. O uso de fibras em baixos teores é apresentado por Plé e Lê (2012) como econômica e

tecnicamente viável, devido ao baixo custo e facilidade de uso em campo e por não necessitar de qualquer ancoragem para aplicação.

Li et al. (2014) e Sales (2011) também defendem que a modificação com fibra é uma técnica viável de melhoramento do terreno, com potencial de aumentar a resistência à quebra do solo e a estabilidade das estruturas de terra, devido ao aumento da ductilidade. Li et al. (2014) observaram aumento de resistência à tração de 65,7% com o acréscimo de 0,2% de fibras de polipropileno com 12 mm de comprimento, enquanto Sales (2011) obteve melhora em amostras submetidas a compressão não confinada na ordem de 180% com o acréscimo de 0,25% de cabelo humano com comprimento variando de 10 a 15 mm.

A modificação de solos com fibras naturais pode atingir altas resistências, contudo a durabilidade pode representar um problema dado o tempo de decomposição desses materiais (FERREIRA, C., 2010; MONGROVEJO, 2013). Dentre as fibras citadas por Hejazi et al. (2012) para aplicação como reforço de solos encontram-se fibras naturais como sisal, coco, palma, juta, palha de cevada, bambu e cana de açúcar.

Em relação à cana de açúcar, produto de grande disponibilidade no sudeste do Brasil, ao retirar-se o caldo com altos teores de açúcares, obtém-se um resíduo fibroso chamado bagaço. A partir do bagaço é possível extrair fibras de cana (*Saccharum officinarum* L.) que, segundo Farias (2012), são compostas, principalmente, por celulose, hemicelulose e lignina; ou seja, cadeias de carbono orgânico com alta relação C:N, que tornam a decomposição do material mais lenta. Contudo, a durabilidade continua sendo muito inferior às fibras sintéticas, como de polipropileno, que permanecem inertes no solo por vários anos, aspecto que pode ser considerado negativo ou positivo, dependendo do ponto de vista ambiental. As fibras sintéticas proporcionam estabilidade prolongada e aumento de condutividade hidráulica saturada, contudo, uma vez aplicada a técnica, não é possível separar o material sintético da matriz (solo), inserindo permanentemente um hidrocarboneto no ecossistema solo sem estudos, a longo prazo, do impacto na biota do mesmo.

A melhora de força de tração do solo provocada pelo acréscimo de fibra pode ser notada mesmo com pequenas quantidades acrescentadas, embora a resistência intensifique-se com o aumento do teor de fibras (LI et al., 2014). Para esses autores a massa específica seca do solo e o teor de água representam aspectos que modificam a resistência à tração pelo acréscimo de fibra. Quanto maior a densidade seca do solo, maior será a superfície de contato das suas partículas com a fibra, proporcionando maior força interfacial entre ambas e maior

resistência à tração, enquanto o acréscimo do teor de água funciona em detrimento da resistência à tração nesse processo.

De modo geral, segundo Tang, Shi e Zhao (2010), o pico de força interfacial (IPS) e força residual interfacial (IRS) de fibra/solo crescem com o aumento da massa específica seca do solo, enquanto diminuem com o aumento do teor de água. Sendo que a resistência ao cisalhamento interfacial de fibra/solo depende principalmente do rearranjo das partículas, da área de contato eficaz, a rugosidade da superfície da fibra e da composição do solo, dentre outros fatores.

Todavia, Das (2011) afirma que a própria resistência ao cisalhamento de solos não saturados é afetada pela umidade das amostras. Assim, solos compactados com a mesma massa específica seca apresentam, para uma dada tensão normal total, queda da resistência ao cisalhamento necessária para produzir a ruptura, conforme aumenta o grau de saturação.

3.2.2 Alterações físicas no solo

Os solos são compostos de conjuntos de agregados altamente variáveis, derivados de materiais de origens diferentes, existentes em inúmeras paisagens e climas, e formam em conjunto com o desenvolvimento das comunidades, complexos de organismos vivos que compõem a biosfera em geral, a forma, o tamanho e o arranjo dos agregados dentro do perfil do solo, descrevendo sua estrutura. De acordo com Paul (2007), os agregados do solo são formados pelo revestimento e colagem de partículas minerais por matéria orgânica coloidal e incrustados com cimento inorgânico. O principal composto ligante das partículas de solo exsudado pelos microrganismos são os polissacarídeos.

A compactação do solo, parte da técnica de melhoramento de resistência, consiste na diminuição dos espaços vazios entre os grãos. Dessa forma, há o aumento da densidade do solo e a diminuição da porosidade, principalmente, dos macroporos, reduzindo também o oxigênio disponível no solo. Neste contexto, Paul (2007) afirma que micro e meso agregados tendem a ser especialmente resistentes ao rompimento mecânico, como por exemplo, o impacto de gotas de chuva, melhorando a resistência à erosão. Esse efeito também protege a estrutura do solo de práticas inadequadas de uso e manejo, assim como a compactação, que possam desestruturá-lo.

O tamanho restrito dos poros dentro dos agregados pode limitar as interações dos organismos do solo, de modo que macroagregados são importantes no controle da atividade microbiana e no volume de matéria orgânica em solos superficiais, permitindo uma maior

interação entre os organismos do solo (PAUL, 2007). Logo, a diminuição dos espaços vazios impacta diretamente na atividade microbiana do solo, afetando sua estrutura.

Modificações estruturais nos solos, assim como a compactação, interferem também na resistência mecânica à penetração de raízes, afetando a produtividade de culturas. Os efeitos da compactação variam com a profundidade da camada compactada e de sua densidade, podendo alterar a disponibilidade de nutrientes nessas diferentes profundidades (FREDDI et al., 2007; NETO; PIERANGELI; LAL, 2013).

Estudos em Latossolo Vermelho distroférico, compactado artificialmente, apresentam enraizamento com densidades do solo até, aproximadamente, $1,60 \text{ kN/m}^3$, inclusive por espécies frutíferas de raiz pivotante, sistema radicular que apresenta maiores dificuldades em penetrar solos compactados do que espécies de raízes fasciculadas (BORDIN et al., 2005).

Já Reinert et al. (2008), estudando um Argissolo Vermelho distrófico típico, encontraram o valor limite para enraizamento, sem deformação morfológica do sistema radicular, para espécies de cobertura fasciculadas e pivotantes, de $1,75 \text{ kN/m}^3$.

Devido à diminuição dos espaços vazios, solos compactados apresentam uma diminuição da condutividade hidráulica saturada, tornando-se uma camada quase impermeável. No entanto, solos com acréscimo de fibras apresentam aumento da condutividade hidráulica saturada com o acréscimo do teor de fibra na matriz (PLÉ; LÊ, 2012). Esse aumento contribui para a infiltração de água no solo e, conseqüentemente, para a recarga de aquíferos, para o fornecimento de água para culturas e menor carreamento de água na superfície, diminuindo a erosão.

3.2.3 Contribuição da mineralogia no comportamento do solo modificado

O resultado da modificação do solo está atrelado à qualidade da compactação do material compósito e essa, por sua vez, será afetada por características físicas, como a textura do material, e por características químicas/mineralógicas, como a atividade e o tipo da fração argila presente no material que influenciarão na compressibilidade, compacidade e plasticidade do solo.

Martínez (2003), durante seu estudo de solos lateríticos, observou que o teor de óxidos de ferro presente no solo é proporcional à dureza dos agregados formados, e que sua cimentação promove a estabilidade dos microagregados, que se mantém mesmo após revolvimento e compactação mecânica. A partir disso, a autora concluiu que a mineralogia, como o teor de óxidos de Fe, e a CTC, influencia diretamente características de resistência

mecânica como o ângulo de atrito interno, grau de compactação, índice de vazios e a resistência ao cisalhamento.

Costa e Bigham (2009) afirmam que a hematita, óxido de ferro de coloração vermelha, possui estrutura hexagonal compacta, onde cada octaedro de FeO_6 compartilha suas arestas com mais três octaedros no mesmo plano, sendo que uma face é comum com um octaedro do plano adjacente, que permite um arranjo justaposto de suas faces formando o sistema cristalográfico trigonal. A goethita, de coloração amarela brunada, por sua vez, possui sistema cristalográfico ortorrômbico, diferente da hematita, não ocorre o compartilhamento de faces entre os octaedros vizinhos, apenas de arestas e vértices, ou seja, sua estrutura apresenta filas duplas de octaedros preenchidos e vazios alternados, que a torna menos coesa que a estrutura da hematita, afetando o tamanho dos agregados, a estabilidade dos mesmos e a condutividade hidráulica, dentre outros fatores.

Tanto a hematita quanto a goethita são óxidos de Fe comuns, ambos encontrados na fração argila do solo, porém com comportamento divergente devido à diferença cristalográfica, que implica em respostas diferentes à adição de fibras.

Acerca de mudanças estruturais no solo, Sommer (2006) destaca que solos são corpos naturais quadridimensionais, com a característica chave da variação espaço-temporal em propriedades e processos e, dessa forma, ao se interferir em um perfil de solo com adições de materiais, são formados os chamados solos tecnológicos.

Portanto, outro elemento a ser observado na construção de solos são os fatores pedogenéticos, tais como: intemperismo, clima, relevo e organismos, que contribuem para a evolução do material compósito, modificando sua estrutura ao longo do tempo. Solos reforçados apresentam indícios de uma evolução dinâmica, tanto transferência de partículas e íons por lixiviação quanto, agregação, transformação de matéria orgânica e intemperismo mineral (SÉRÉ et al., 2010).

Por conseguinte, solos de mesma textura podem apresentar massa específicas secas máximas diferentes, em função de sua mineralogia, afetando diretamente o resultado da modificação do solo e outros aspectos como quantidade de poros e condutividade hidráulica saturada.

Nos solos reforçados, ocorrem mudanças significativas no intemperismo químico e estado físico do material, alterando rapidamente as características dos horizontes do solo de forma semelhante aos processos naturais, como a agregação, mesmo que ocorram processos característicos de solos construídos, como a drenagem hidráulica inicial e a dissolução, por

exemplo, de gipsita. Em todos os casos a velocidade das reações é muito alta, fato explicado pelos desequilíbrios entre o material e as condições ambientais, indicando que os processos podem ser apenas um passo na evolução dos solos antropogênicos para se tornarem solos naturais (SÉRÉ et al., 2010).

3.2.4 Alterações biológicas no solo

Oliveira (2011) afirma que os microrganismos têm um importante papel no solo desde a sua formação, sendo que as bactérias possuem papel proeminente na decomposição de compostos orgânicos e fixação de nutrientes. Os fungos, por sua vez, contribuem diretamente com a formação e estabilidade de agregados, através do envolvimento dos grãos de solo pelas hifas, forma-se uma malha de micélio que proporciona resistência à estrutura do solo.

Segundo Van Elsas, Jansson e Trevors (2007) as características físicas, químicas e microbiológicas dos solos influenciam no seu potencial de biodegradação e na eficácia da decomposição. O crescimento, a sobrevivência e atividade microbiana dependem do conjunto de fatores que formam as condições ambientais do solo e dos limites da bagagem genética, sendo a atividade resultante uma consequência do alcance e rapidez das respostas fisiológicas às condições ambientais dominantes (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Em regiões do solo nas quais há maior ocorrência de matéria orgânica, encontra-se maior biomassa microbiana do que nas outras regiões. Por outro lado, a textura do solo afeta o fornecimento de nutrientes e o provimento de ar, que determinam a atividade da comunidade microbiana. Van Elsas, Jansson e Trevors (2007) ressaltam que o oxigênio é um fator chave na biodegradação, pois a degradação aeróbia é muito mais rápida que a anaeróbia, tornando processos com disponibilidade de oxigênio mais eficientes. Assim, os solos compactados com menor quantidade de poros limitam a atividade microbiana através da redução da disponibilidade de oxigênio, embora esse processo também ocorra quando os poros existentes estão total ou parcialmente ocupados por água (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Além disso, a textura também afeta a disponibilidade de água que é um componente essencial para o metabolismo microbiano, tornando-se um importante fator limitante à biodegradação (VAN ELSAS; JANSSON; TREVORS, 2007).

Fatores externos como a temperatura, radiação solar e o pH impactam diretamente na atividade microbiana, incluindo no seu crescimento e sua sobrevivência, consequentemente afetando a biodegradação. Teores de macro nutrientes, como nitrogênio e fósforo, também influenciam a biodegradação devido à exigência microbiana por esses nutrientes para

decompor o carbono orgânico e construir células microbianas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; VAN ELSAS; JANSSON; TREVORS, 2007).

Em situações de equilíbrio no solo, ao se adicionar matéria orgânica, como fibras vegetais, dá-se início a uma série de reações. Primeiramente a população microbiana é estimulada devido à presença de carbono oxidável, aumentando também a demanda de nutrientes por essa população (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

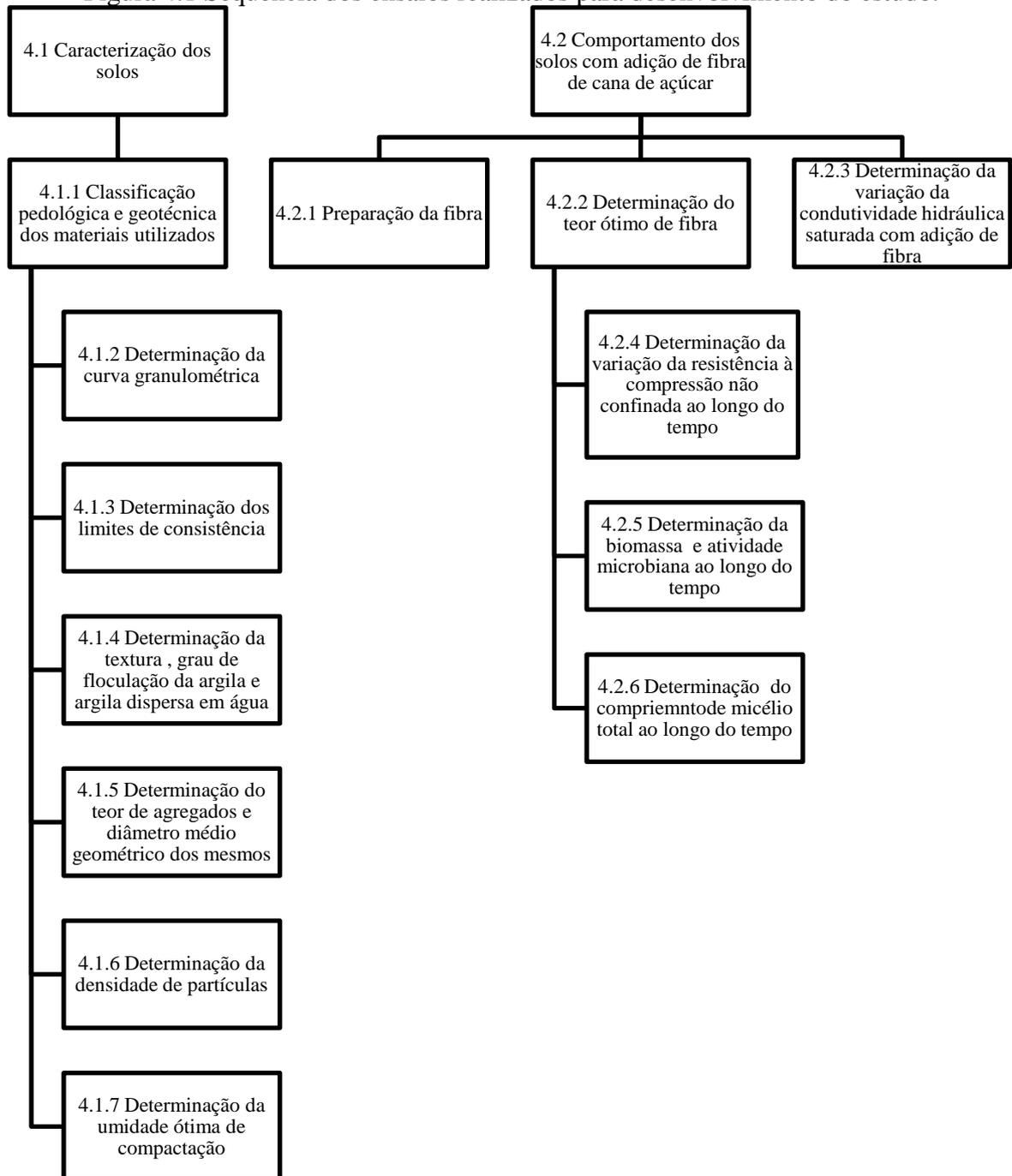
Um grande influenciador no comportamento desse processo é a relação C:N do material adicionado, que pode propiciar esgotamento do nitrogênio em casos de relação C:N alta, como cadeias de lignina e celulose, e a liberação do elemento mineralizado em casos de relação C:N baixa, alterando a velocidade de decomposição do material (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Fato esse que influencia diretamente a durabilidade de reforços de origem vegetal nos solos.

Nesse contexto, espera-se que a adição de fibras de cana de açúcar aos solos com diferentes composições mineralógicas nas frações coloidais apresentem diferentes respostas ao acréscimo (de fibras) das mesmas, no que tange a sua resistência mecânica, condutividade hidráulica saturada e alterações biológicas.

4 METODOLOGIA

Para realização do trabalho, a metodologia foi separada em duas etapas, sendo a primeira de caracterização dos solos e a segunda de ensaios com o material estudado para avaliação do comportamento do mesmo com a adição de fibra natural. Após a obtenção de resultados parciais, pode-se dar prosseguimento aos estudos, conforme o esquema apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 Sequência dos ensaios realizados para desenvolvimento do estudo.



4.1 Caracterização dos solos

4.1.1 Classificação pedológica e geotécnica dos materiais utilizados

Os materiais utilizados neste estudo foram coletados no município de Delfim Moreira – MG e são compostos por dois solos, ambos de relevo ondulado a forte ondulado, sendo um perfil de Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico (Figura 4.2) e o outro um Latossolo Vermelho distrófico típico (Figura 4.3). Ambos foram classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). De cada horizonte foram retiradas amostras para a determinação de características morfológicas *in situ* e amostras para determinações laboratoriais. As características químicas foram determinadas no laboratório de Análise de Fertilidade do solo da UFLA. As características físicas foram determinadas no laboratório de solos da UNIFEI. Após essas determinações, foram feitas as classificações pedológicas destes solos até o 4º nível categórico. Os resultados estão apresentados nos Quadros 4.1 e 4.2.

Figura 4.2 Perfil do Argissolo Amarelo.
Coordenadas: 23k 0468447S 7511706W



Figura 4.3 Perfil do Latossolo Vermelho.
Coordenadas: 23k 0467057S 7511674W



Quadro 4.1 Perfil de Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico

Horizonte/ Profundidade (cm)	Textura (%)/ Classe	Estrutura dominante	Amostra/Cor
A1 0 a 18	Argila - 25 Silte - 16,2 Areia - 58,8	Granular pequena e poucos blocos médios subangulares	
	Classe Franco Argilo Arenoso		10YR 4/4 - Bruno Amarelado Escuro
AB 18 a 36	Argila - 30,8 Silte - 17,5 Areia - 51,7	Granular pequena e poucos blocos médios subangulares	
	Classe Franco Argilo Arenoso		10YR4/6 - Bruno Amarelado Escuro
Bt 36 a 59	Argila - 47,7 Silte - 19,4 Areia - 32,9	Blocos angulares pequenos e médios	
	Classe Argila		10YR 5/6 - Bruno Amarelado
Bw 59 a 153	Argila - 39,0 Silte - 28,5 Areia - 32,5	Granular pequena e média e blocos subangulares pequenos, médios e grandes	
	Classe Franco Argiloso		10YR 5/8 - Bruno Amarelado
C 153 a 173	Argila - 34,0 Silte - 31,2 Areia - 34,8	Blocos subangulares pequenos, médios e grandes e poucos granulos pequenos	
	Classe Franco Argiloso		10 YR 5/6 Bruno Amarelado
CG 173 a 220+	Argila - 21,3 Silte - 28,9 Areia - 49,8	Blocos subangulares médios e grandes	
	Classe Franco		10YR 7/2 com mosqueado 10 YR 6/6 - Cinzento Claro Com Mosqueado em lamina difusas, comum, médio na cor Argissolo Brunado

Quadro 4.2 Perfil de Latossolo Vermelho distrófico típico

Horizonte/ Profundidade (cm)	Textura (%)/ Classe	Estrutura dominante	Amostra/Cor
A 0 a 15	Argila – 30,5 Silte – 35,1 Areia – 34,4	Granular pequena e média	
	Classe Franco Argiloso		7,5 YR 3/3 - Bruno escuro
AB 15 a 35	Argila – 30,3 Silte – 20,1 Areia – 49,6	Granular pequena e média	
	Classe Franco Argilo Arenoso		5YR 4/4- Bruno avermelhado
BA 35 a 80	Argila – 38,7 Silte – 17,5 Areia – 43,8	Granular pequena e blocos subangulares médios	
	Classe Franco Argiloso		5YR 4/6- Vermelho amarelado
B1 80 a 132	Argila – 46,6 Silte – 16,1 Areia – 37,3	Blocos angulares pequenos e médios	
	Classe Argila		2,5YR – 4/6 Vermelho
B2 132 a 200+	Argila – 51,8 Silte – 15,8 Areia – 32,4	Blocos angulares pequenos, médios e grandes	
	Classe Argila		2,5 YR 4/8 - Vermelho

O material coletado para o estudo foi o horizonte B, que no perfil Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico, referido daqui em diante como Argissolo Amarelo, corresponde à profundidade de 40 até 150 cm, e no perfil de Latossolo Vermelho distrófico típico, que daqui em diante será citado como Latossolo Vermelho, corresponde à profundidade de 90 até 180 cm. Ambos os materiais correspondem ao residual maduro e foram classificados segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM, 2011), utilizado para fins geotécnicos, como silte elástico arenoso. Para tal foram realizadas análises físicas no laboratório de Geotecnia da UNIFEI. Os resultados estão apresentados no Quadro 4.3.

A coleta foi realizada em julho de 2016, fora do período chuvoso, e os pontos de coleta foram registrados em coordenadas UTM através de GPS Garmin Vista HCx, em datum

SAD 69. O material coletado foi acondicionado em sacos plásticos, transportado até o laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Itajubá, local no qual foi homogeneizado e armazenado para a condução dos ensaios.

Quadro 4.3 Classificação das amostras segundo o Sistema Unificado de Classificação de solos (SUCS)

Solo	Teor < #n° 40	Limite de liquidez	Índice de plasticidade	Classificação
	-----%-----			
Argissolo Amarelo	68	63	13	MH – Silte elástico arenoso
Latossolo Vermelho	69	64	24	MH – Silte elástico arenoso

4.1.2 Determinação da curva granulométrica

Para determinação da curva granulométrica seguiu-se as normas *NBR 6457/1986 – Amostra de Solos – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização* (ABNT, 1986a) e *NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica* (ABNT, 1984c).

As amostras de ambos os solos foram peneiradas e preparadas com descanso em solução de defloculante hexametáfosfato de sódio por 12h antes do ensaio, sendo realizadas três réplicas para cada. Os valores de diâmetro de grão de interesse foram obtidos a partir da média dos valores de cada curva.

4.1.3 Determinação dos limites de consistência

Os ensaios para determinação dos limites de liquidez e plasticidade foram realizados conforme as normas *NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez* (ABNT, 1984a) e *NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade* (ABNT, 1984b).

Para determinação do limite de liquidez foi utilizada a curva semi-logarítmica com 5 pontos, obtendo-se o valor do limite no ponto correspondente a 25 golpes em cada solo.

Para determinação do limite de plasticidade foram moldados cinco cilindros de cada amostra, adotando o valor médio para cada solo.

4.1.4 Determinação da textura, grau de flocculação da argila e argila dispersa em água

Para determinação da textura do material utilizado, do grau de flocculação da argila e da argila dispersa em água do material, seguiu-se as recomendações descritas pela

EMBRAPA (2017) nas metodologias de análise granulométrica e grau de floculação. Todos os ensaios foram realizados em tréplica, utilizando-se como resultado final a média entre esses.

4.1.5 Determinação do teor de agregados e diâmetro médio geométrico dos mesmos

A determinação do percentual de agregados, assim como do diâmetro médio geométrico dos mesmos, foram realizados conforme metodologia descrita pela EMBRAPA (2017), utilizando-se três amostras de cada solo estudado. Como resultado foi adotada a média das três amostras testadas.

4.1.6 Determinação da densidade de partículas

Para determinação do peso específico dos grãos utilizou-se a metodologia de Densidade de Partículas, descrita pela EMBRAPA (2017) e foram realizadas seis réplicas do procedimento para cada solo, adotando como densidade a média dos valores obtidos para cada um.

4.1.7 Determinação da umidade ótima de compactação

O ensaio foi realizado conforme as normas *NBR 6457/1986 – Amostra de Solos – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização* (ABNT, 1986a) e *NBR 7182/1986 - Ensaio de Compactação* (ABNT, 1986b).

Os ensaios foram realizados sem reaproveitamento de material, na energia de compactação de Proctor normal em molde cilíndrico de 1000 cm³, com 3 camadas.

Para determinação da umidade ótima, foram confeccionadas três curvas de umidade gravimétrica x massa específica seca para cada solo, com cinco pontos cada, a partir dos quais se determinou a umidade ótima de compactação de cada curva, obtida a partir da média dos máximos de cada uma das três curvas.

4.2 Comportamento dos solos com adição de fibra de cana de açúcar

4.2.1 Preparação da fibra

As fibras de cana de açúcar utilizadas neste trabalho foram coletadas após a passagem do material por moenda. Em seguida, elas foram lavadas em água corrente e secas em estufa de Secagem e Esterilização - SOLAB modelo SL100 (Figura 4.4) a 75°C, por cinco dias. Posteriormente, removeram-se as cascas e o restante do material foi moído por moinho de facas LOGEN Scientific modelo LSW 5000 (Figura 4.5) para logo após ser peneirado até atingir o comprimento médio de 10 mm, sendo aceitas fibras de 8 a 12 mm de comprimento.

Figura 4.4 Estufa de secagem e esterilização SOLAB modelo SL100 com fibras de cana de açúcar lavadas.



Figura 4.5 Moinho de facas LOGEN Scientific modelo LSW 5000.



4.2.2 Determinação do teor ótimo de fibra

Para determinação do teor ótimo de fibra foi montado um experimento fatorial com trinta e seis unidades experimentais, sendo os fatores dois solos (Argissolo Amarelo e Latossolo Vermelho), seis teores de fibra (0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5%) testados com três repetições para cada tratamento.

Seguiu-se a metodologia descrita por Head (1994) para determinação do teor ótimo de fibra através de ensaio de compressão simples. Para tal, os corpos de prova foram moldados em molde de aço cilíndrico com as dimensões de 100 mm de altura por 50 mm de diâmetro.

A energia de compactação para confecção dos corpos de prova adotada foi a de Proctor normal, igual a 5,9 kg.cm/cm³ (DAS, 2011). O cálculo para determinação do número de golpes por camada (N) foi realizado segundo a Equação 4.1, considerando três camadas (n), o peso do soquete (P) em 1,8 kg, a altura de queda (h) do mesmo em 43 cm e o volume do corpo de prova (V) de aproximadamente 196 cm³. Obteve-se o valor de 5 golpes por camada.

$$N = \frac{E.V}{P.h.n} \quad (4.1)$$

A umidade dos corpos de prova foi corrigida para a umidade ótima de cada solo, obtida através do ensaio de Proctor normal. As adições de fibra de cana de açúcar, feitas após a adequação de umidade, foram realizadas com distribuição aleatória nos teores de massa.

Os corpos de prova foram extraídos dos moldes cilíndricos com o auxílio de um macaco hidráulico. Em seguida, foram submetidos à compressão não confinada em prensa motorizada, sob a velocidade de aproximadamente 5 cm/min, seguindo as orientações da *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil* (ASTM, 2016) para o ensaio.

Das (2011) afirma que o ensaio de compressão não confinada, normalmente utilizado para corpos de prova de argila, é realizado com pressão de confinamento σ_3 igual a 0. Aplica-se rapidamente uma carga axial no corpo de prova para causar a ruptura, momento no qual, a tensão principal maior é σ_1 que é igual a resistência à compressão não confinada (q_u), de forma que podemos obter os valores de coesão (c_u), segundo a Equação 4.2.

$$c_u = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2} \quad (4.2)$$

Os valores de resistência máxima foram registrados, conforme a metodologia proposta por Head (1994). Procedeu-se a análise estatística dos dados através do *software* SISVAR (2014), com análise de variância e teste F, seguido de análise complementar de comparação de médias pelo teste de Scott- Knott a 5% de probabilidade para o fator solo e regressão para o fator teor de fibra, através dos quais foi possível determinar o valor ótimo de adição de fibra ao solo.

4.2.3 Determinação da variação da condutividade hidráulica saturada com adição de fibra

Para determinação da condutividade hidráulica saturada foi montado um experimento fatorial com trinta e seis unidades experimentais, utilizando o mesmo número de fatores, níveis e repetições que a determinação do teor ótimo de fibra.

Os corpos de prova foram moldados com as mesmas dimensões e energia de compactação que foram utilizadas no ensaio de determinação do teor ótimo de fibra.

Para a confecção dos corpos de prova, o material foi adicionado ao cilindro metálico e compactado na energia determinada. Após a compactação, a coroa foi removida, o corpo de prova foi nivelado para altura do corpo de prova e realizou-se a medida de massa para verificação da massa específica seca.

Em seguida, a coroa foi recolocada e presa com fita adesiva de alta resistência (*Silver Tape*), a fim de evitar a passagem de água pela junção do molde com a coroa. A parte inferior do corpo de prova foi protegida com tecido preso por elástico, para evitar a perda de material (Figura 4.6).

Após o preparo, o corpo de prova foi submetido à saturação ascendente em vasilha plástica, cheia de água (Figura 4.7). Após a saturação, deu-se prosseguimento às leituras de condutividade hidráulica empregando o método de coluna variável. Foi utilizada uma bureta graduada presa a uma rolha afixada no topo da coroa do molde (Figura 4.8), anotando os valores de altura inicial no nível da bureta em relação ao nível de água onde o corpo de prova permaneceu inserido, o nível de água final da bureta em relação do nível da vasilha e o tempo decorrido para que ocorresse a variação da água na bureta.

Foram realizadas, no mínimo, cinco leituras em cada corpo de prova, para determinação da condutividade hidráulica saturada média de cada unidade experimental.

As análises estatísticas dos dados foram realizadas através do *software* SISVAR (2014), com análise de variância e teste F, seguido de análise complementar de comparação de médias pelo teste de Scott- Knott a 5% de probabilidade para o fator solo e regressão para o fator teor de fibra, através dos quais foi possível determinar a variação da condutividade hidráulica com o acréscimo de fibra ao solo, bem como verificar se os dois solos apresentam comportamento distinto para essa alteração.

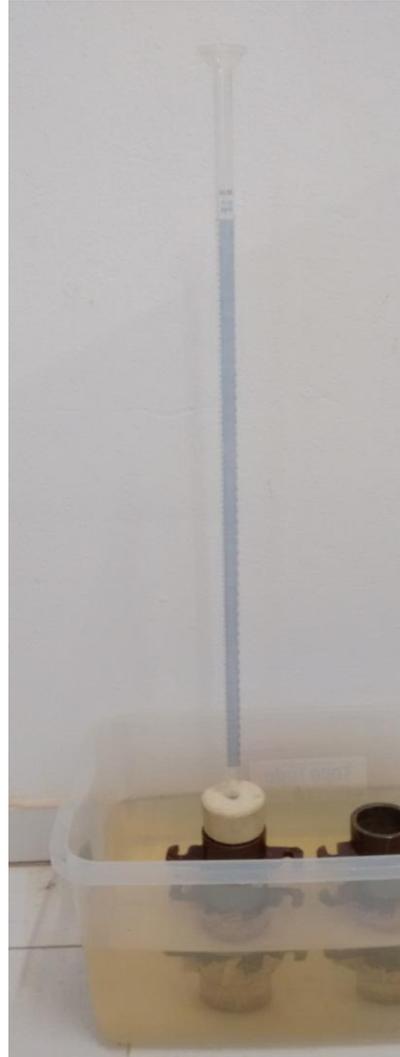
Figura 4.6 Corpo de prova preparado para saturação



Figura 4.8 Corpo de prova durante a saturação



Figura 4.7 Esquema de ensaio de condutividade hidráulica com carga decrescente



4.2.4 Determinação da variação da resistência à compressão não confinada ao longo do tempo

Para avaliação da variação da resistência à compressão simples com acréscimo de fibra ao longo do tempo, foi montado um experimento com o mesmo procedimento metodológico que o ensaio de determinação do teor ótimo de fibra (item 4.2.2). O ensaio foi realizado em esquema fatorial com delineamento inteiramente casualizado, a fim de observar as modificações nos aspectos de resistência à compressão não confinada com a evolução da decomposição da fibra adicionado ao solo.

Os fatores foram classe de solo (Argissolo Amarelo e Latossolo Vermelho), teor de fibra (0 e 1,5%) e período de armazenamento (0, 2, 4 e 6 meses), com quatro repetições para

cada tratamento, totalizando 64 unidades experimentais moldadas em molde cilíndrico de metal, com 100mm de altura por 50mm de diâmetro.

As unidades experimentais foram moldadas com energia de Proctor normal em três camadas, assim como no ensaio de determinação do teor ótimo de fibra (item 4.2.2).

Depois de extraídos dos moldes, os corpos de prova foram pesados e acondicionados em sacos de plástico com a boca fechada com papel toalha e barbante, permitindo trocas gasosas. Após o acondicionamento, as amostras foram armazenadas em refrigerador à 5°C pelo período estipulado.

No final do período de armazenamento, as amostras foram retiradas do refrigerador, removidas dos sacos, pesadas, medidas a altura e o diâmetro, e submetidas à compressão não confinada, assim como no ensaio de determinação de teor ótimo de fibra (item 4.2.2).

As análises estatísticas dos dados foram realizadas através do *software* SISVAR (2014), com análise de variância e teste F, seguido de análise complementar de comparação de médias pelo teste de Scott- Knott a 5% de probabilidade para o fator solo e presença de fibra e regressão para o fator tempo de armazenamento, através dos quais foi possível determinar a variação da resistência à compressão não confinada dos dois solos com acréscimo de fibra ao solo, ao longo do tempo.

4.2.5 Determinação da biomassa e atividade microbiana ao longo do tempo

Após o ensaio de determinação da variação da resistência à compressão não confinada ao longo do tempo (item 4.2.4), determinaram-se o carbono da biomassa microbiana e a atividade microbiana nos corpos de prova rompidos.

Conforme a metodologia de Ferreira, Camargo e Vidor (1999) para determinação de biomassa pelo micro-ondas foram retirados 80 g de cada amostra, sendo que 40 g utilizados no estado natural e 40 g irradiados em micro-ondas por 2 minutos. Em seguida, adicionou-se a água perdida devido ao aquecimento da amostra e inseriu-se inóculo de 2 g de solo da amostra original.

As amostras foram transferidas para frascos de vidro de 1L hermeticamente fechados, acompanhadas de béquer plástico contendo 10 mL de solução de NaOH a 1mol/L para captação do CO₂ emitido. Os recipientes foram acondicionados em incubadora com ausência de luz, pelo período de 10 dias à temperatura de 28°C. Juntamente, foram adicionados três frascos para controle, apenas com a solução de NaOH, para determinar a concentração de carbono presente no ar.

Ao término do período de incubação, os frascos foram abertos e foram adicionados 5 mL de solução de BaCl₂ e algumas gotas de fenolftalína na solução de NaOH. Em seguida, as soluções foram tituladas com HCl, em concentração de 1mol/L, anotando o volume gasto na titulação. O CO₂ liberado pela respiração foi calculado segundo a Equação 4.3, na qual B corresponde ao volume médio necessário para titular o excedente de NaOH nos frascos de controle sem solo, V corresponde ao volume de necessário para titular o excedente de NaOH da amostra com solo, M corresponde a concentração molar de HCl e E corresponde a massa molar de CO₂.

$$mgCO_2 = \frac{(B - V) \cdot M \cdot E}{2} \quad (4.3)$$

Para cada grama de gás carbônico na amostra, 0,27g são de C, portanto, fazendo a correção dos valores, pode-se determinar o carbono presente na biomassa do solo (C_{mic}) através da Equação 4.4, onde CIR é o carbono da amostra Irradiada, CNIR é o carbono presente na amostra não irradiada e o valor de correção K_C, definido para o método de IR e NIR por De-Polli e Guerra (1996), vale 0,45.

$$C_{mic} = (C_{IR} - C_{NIR})/K_C \quad (4.4)$$

O delineamento foi inteiramente casualizado, e realizou-se análise estatística dos dados através do *software* SISVAR (2014), com análise de variância e teste F, seguido de análise complementar de comparação de médias pelo teste de Scott- Knott a 5% de probabilidade para o fator solo e presença de fibra e regressão para o fator tempo de armazenamento. Determinaram-se as variações de atividade e biomassa em ambos os solos, com e sem fibra, ao longo do tempo.

4.2.6 Determinação do comprimento de micélio total ao longo do tempo

A determinação do comprimento de micélio total ao longo do tempo seguiu o mesmo delineamento estatístico, tratamentos, repetições e análise de dados que o ensaio de determinação da biomassa e atividade microbiana ao longo do tempo (item 4.2.5). Para isso, as amostras também foram retiradas dos corpos de prova após os ensaios de determinação da variação da resistência ao longo do tempo (item 4.2.4).

Para a extração do micélio total seguiu-se o método proposto por Melloni e Cardoso (1999). Para cada corpo de prova, retiraram-se 10 g de amostra à qual foram adicionados 500 mL de água, em um béquer de 1 L.

A suspensão água mais solo foi agitada de forma padronizada com bastão de vidro, e peneirada utilizando 1 L de água sobre as malhas de 500 e 250 mm.

O peneirado foi inserido em liquidificador e submetido a uma agitação vigorosa por 30 segundos. Após a agitação, aguardaram-se 2 minutos para a retirada de alíquota de 500 mL.

A alíquota foi peneirada na malha de 45 μm , retirando-se 10 mL do retido com auxílio de uma pipeta volumétrica de 20 mL. Seguiu-se com a transferência do retido para frasco de penicilina de cerca de 15 mL de capacidade, calibrado em 5 mL.

Em seguida, realizou-se uma filtração a vácuo em membrana de triacetato de celulose de 47 mm de diâmetro e 0,45 μm de porosidade, quadriculada com malha de 4,7 mm. Após secagem ao ar, a membrana foi colocada sobre uma lâmina de vidro de 25 cm^2 .

Para a leitura em microscópio, acoplou-se na ocular do microscópio uma ocular reticulada com área de 100 mm^2 (no aumento de 10 vezes), composta de 10 linhas verticais e 10 horizontais. A área correspondente ao reticulado foi sobreposta a cada campo da membrana, somando 64 campos (8 x 8). Em todos os campos, contou-se o número de interseções de hifas com as linhas horizontais do reticulado (n) e aplicou-se a equação de Newman (1966) (Equação 4.5) para encontrar o comprimento de micélio extrarradicular (C) em m/g, na qual U corresponde ao teor de água (g) presente nos 10g de substrato úmido utilizado na extração.

$$C = \frac{0,21387 \cdot n}{10 - U} \quad (4.5)$$

5 RESULTADOS

5.1 Caracterização do solo

Os resultados da curva granulométrica (Figura 5.1 e Figura 5.2) mostram que apenas o Argissolo Amarelo apresentou equivalência ao ensaio de textura (Tabela 5.2), sendo que o Latossolo Vermelho apresentou curva granulométrica com descontinuidade no valores de transição entre peneiramento e sedimentação. Isso se atribuiu à ineficácia do defloculante hexametáfosfato de sódio em desagregar todas as partículas da amostra de Latossolo Vermelho que, apesar de apresentar o mesmo grau de flocculação de argila (Tabela 5.2) que o Argissolo Amarelo estudado, possui um teor de agregados (Tabela 5.3) com diâmetro menor que 0,106 mm inferior ao último.

Todavia, a descontinuidade da curva granulométrica não interferiu na classificação dos solos pelo SUCS (ASTM, 2011), que utiliza apenas dos valores de grão de solo acima de 0,075 mm de diâmetro e dos limites de consistência, apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Valores de umidade para limites de liquidez e plasticidade do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico

Solo	Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade
	-----%-----	
Argissolo Amarelo	63	50
Latossolo Vermelho	64	40

A partir dos dados de textura (Tabela 5.2), utilizou-se o triângulo de classificação para classes texturais (SANTOS et al., 2005) para determinar que o horizonte B do Argissolo estudado possui textura Franco Argilosa, enquanto o Latossolo apresenta, na mesma camada, textura Argila devido ao percentual de argila quase 20% superior ao Argissolo.

Tabela 5.2 Tamanho de grãos, grau de flocculação da argila e argila dispersa em água do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico

Solo	Argila	Silte	Areia	Grau de flocculação	Argila dispersa em água
	-----%-----				
Argissolo Amarelo	35	28	37	99	<1
Latossolo Vermelho	52	15	33	99	<1

Figura 5.1 Granulometria do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico.

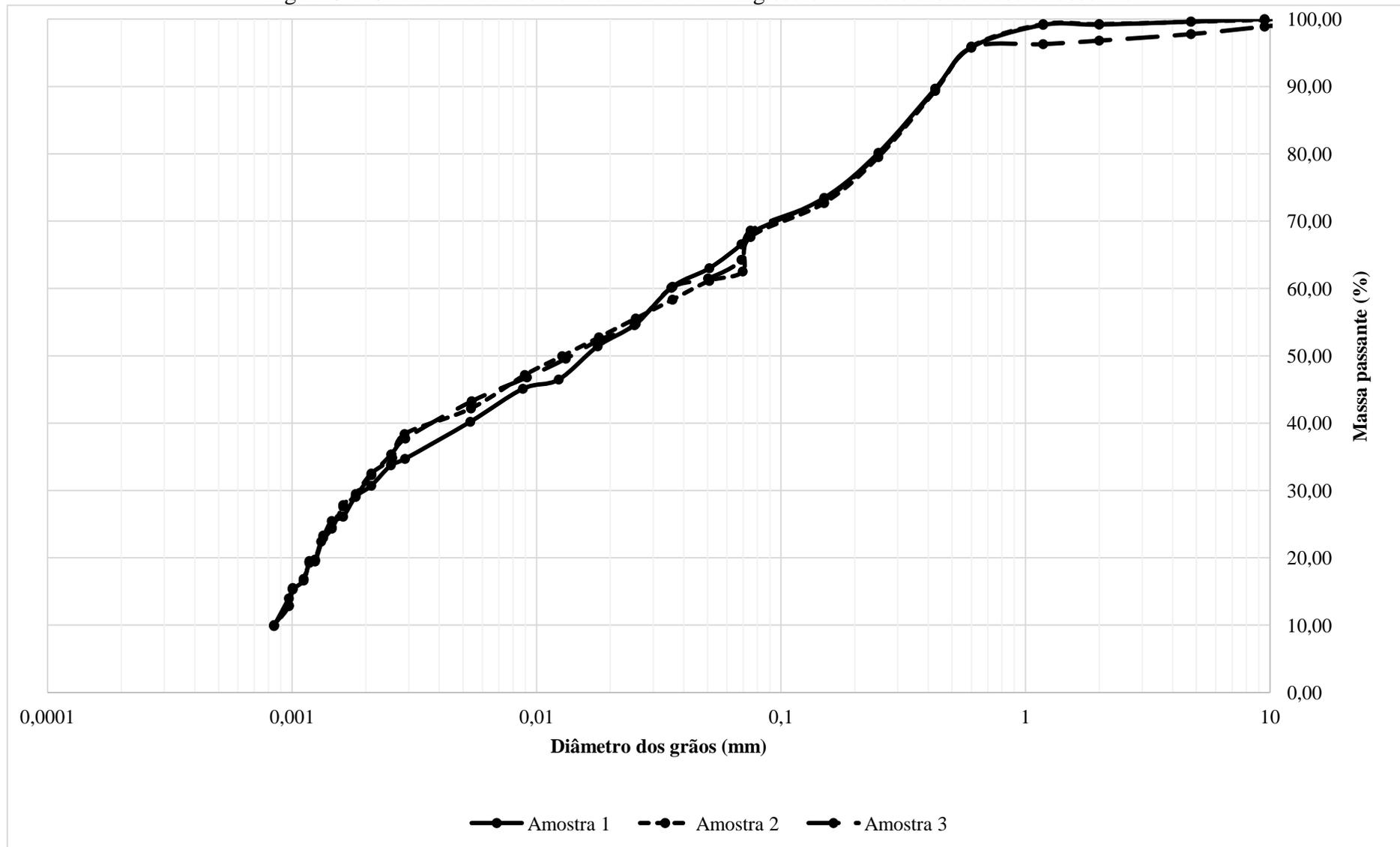
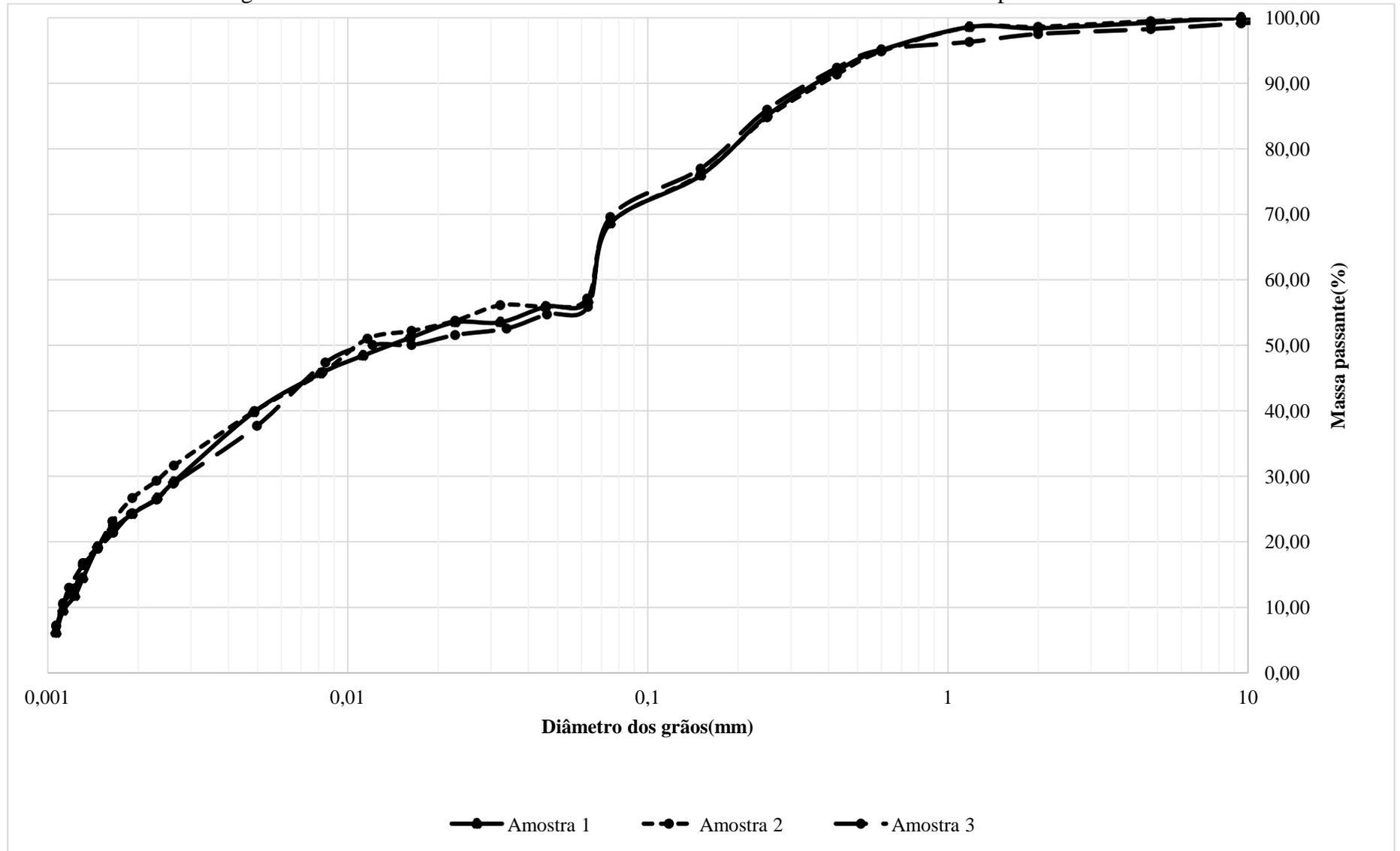


Figura 5.2 Granulometria do horizonte B de um Latossolo Vermelho distrófico típico.



Através da Tabela 5.3, pode-se observar que mais de 50% dos agregados do Latossolo Vermelho possuem diâmetro superior à 2 mm, enquanto o Argissolo Amarelo apresenta a maior parcela dos agregados em diâmetros inferiores à 1mm. Indicando que, apesar dos teores elevados de argila, a estrutura mineralógica do Latossolo Vermelho permite a formação de agregados maiores, enquanto a estrutura do Argissolo Amarelo forma agregados pequenos.

Tabela 5.3 Teor de Agregados (TA) do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico

Solo	Diâmetro dos agregados	TA
	mm	%
Argissolo Amarelo	4 - 2	17
	2 - 1	14
	1 - 0,50	19
	0,5 - 0,25	25
	0,25 - 0,106	15
	<0,106	10
Latossolo Vermelho	4 - 2	54
	2 - 1	13
	1 - 0,50	14
	0,5 - 0,25	11
	0,25 - 0, 106	5
	<0,106	3

O diâmetro médio geométrico (DMG), apresentado na Tabela 5.4, reforça o fato do Latossolo Vermelho possuir mais agregados de diâmetro superior ao Argissolo Amarelo. O tamanho dos agregados irá influenciar na interação do solo com a fibra de cana de açúcar, afetando diretamente o resultado da modificação e, da mesma forma, também irá influenciar no teor de oxigênio disponível para os micro- organismos, em função dos espaços vazios entre os agregados do solo.

Segundo Costa e Bigham (2009) a coloração amarela brunada do Argissolo Amarelo indica predominância de goethita, mineral que apresenta diâmetro médio inferior à hematita, mineral de coloração vermelha presente em maior abundância no Latossolo Vermelho, justificando o maior teor de agregados de diâmetro superior no Latossolo Vermelho em relação ao Argissolo Amarelo.

Em contrapartida, ambos os solos estudados apresentaram valores de densidade de partículas (Tabela 5.5) próximos a $2,5 \text{ g/cm}^3$. Segundo Kiehl (1979), valores médios de densidade de partículas para solos, são de 2,3 a $2,9 \text{ g/cm}^3$, portanto, os solos estudados encontram-se dentro dessa faixa.

Tabela 5.4 Diâmetro médio geométrico de agregados (DMG) do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico

Solo	DMG
	-----mm-----
Argissolo Amarelo	0,55
Latossolo Vermelho	1,48

Tabela 5.5 Valores de densidade de partículas do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico

Solo	Densidade de partículas
	(g/cm^3)
Argissolo Amarelo	2,50
Latossolo Vermelho	2,53

Durante os ensaios de Proctor normal, obtiveram-se os pontos máximos das curvas de compactação do Argissolo Amarelo (Figura 5.3), a partir dos quais, foram obtidos o valor de umidade ótima média de 29%, sendo a massa específica seca máxima nesse ponto de aproximadamente $1,44 \text{ g/cm}^3$. Por outro lado, o Latossolo Vermelho apresentou curvas (Figura 5.4) com comportamento mais próximo de uma parábola, sendo a densidade seca máxima próxima a $1,45 \text{ g/cm}^3$, e a umidade ótima para atingir esse valor, a de 27%.

Apesar do contraste na distribuição do tamanho de agregados das duas amostras, ambos atingiram valores semelhantes de densidade seca máxima e umidade ótima de compactação, corroborando com os valores de densidade de partículas encontrados.

Segundo Pinto (2006), ambos os solos apresentaram conduta semelhante a argilas siltosas provenientes de metabasito, embora a curva mais aberta do Argissolo Amarelo se assemelhe mais ao comportamento de solos finos, enquanto a curva com pico mais acentuado do Latossolo Vermelho seja mais próxima da conduta de materiais de granulometria maior.

O comportamento das curvas de compactação, oposto aos teores de argila encontrados, se deve à prática de ensaio de Proctor sem reuso de material, que reflete com maior eficiência uma situação de compactação de talude. O material sem reuso mantém grande parte da

estrutura dos agregados, de forma que materiais com alto grau de floculação, como os solos observados, irão apresentar comportamento de materiais de granulometria maior, proporcionalmente ao tamanho dos agregados do respectivo material. De forma que o Latossolo Vermelho, por possuir agregados maiores, apresenta comportamento de solos arenosos, enquanto o Argissolo Amarelo, por possuir agregados menores, apresenta o comportamento de solos mais argilosos.

O comportamento dos agregados desses solos pode ser atribuído a um reflexo da mineralogia devido à diferença de tamanho das argilas presentes nos solos estudados e sua cristalografia. A hematita no Latossolo vermelho possui sistema cristalográfico mais coeso que a goethita predominante no Argissolo Amarelo. Portanto, a hematita permite a formação de agregados maiores estáveis, que resultam em um comportamento de grãos, justificando o aspecto da curva de compactação semelhante a um solo de granulometria maior.

Da mesma forma, o alto grau de floculação da argila em ambas os solos indica que mesmo após processos que causam destorroamento, assim como a compactação, os solos mantêm parte de sua estrutura, sendo a do Argissolo Amarelo menor e a do Latossolo Vermelho maior em função dos diâmetros médios dos agregados. Fato esse que reforça o comportamento das curvas de compactação apesar de ambas as amostras serem de solos argilosos.

Figura 5.3 Curvas de compactação obtidas no ensaio de Proctor normal do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico

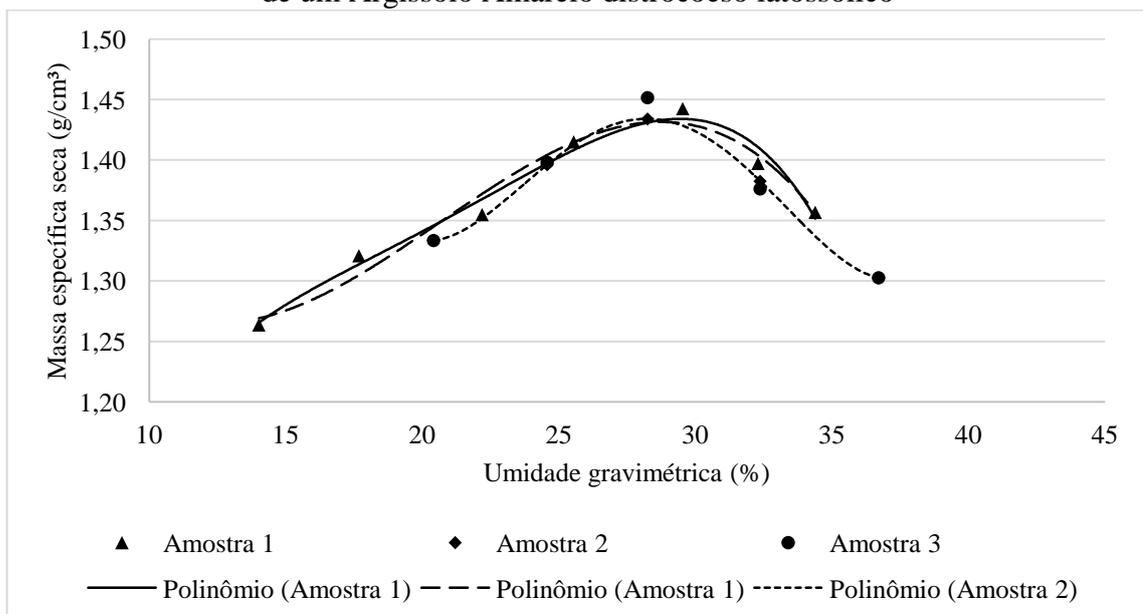
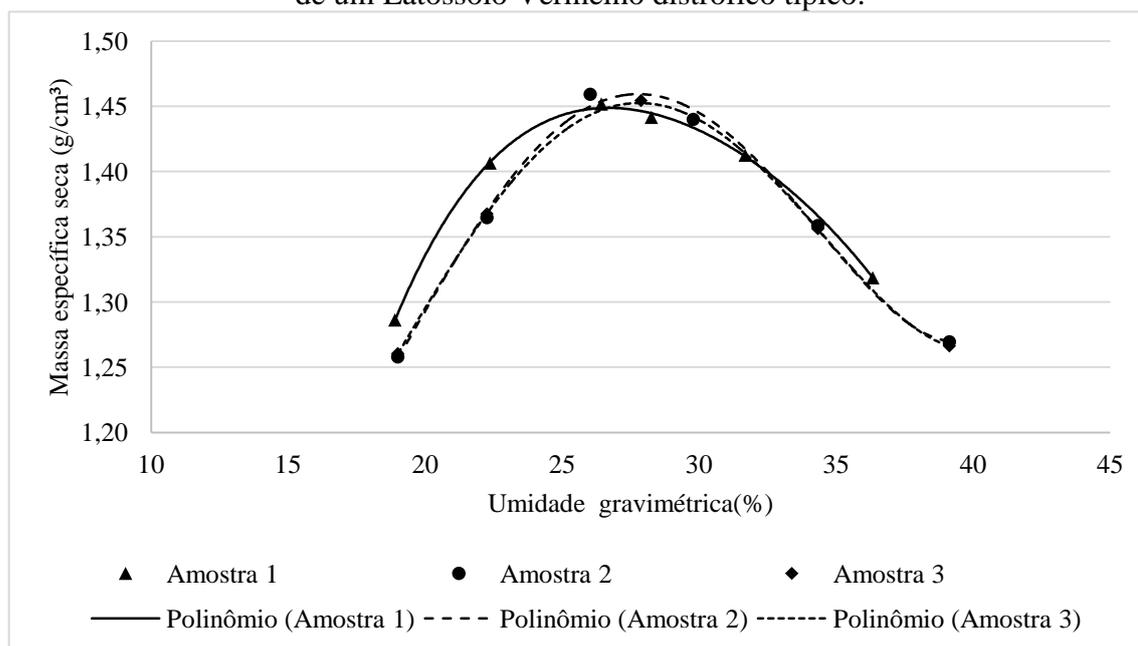


Figura 5.4 Curvas de compactação obtidas no ensaio de Proctor normal do horizonte B de um Latossolo Vermelho distrófico típico.



5.2 Modificações do solo com fibra de cana de açúcar

Todas as análises de variância, coeficientes de variação e demais dados estatísticos utilizados na avaliação dos resultados do estudo dos solos modificados com a adição de fibra de cana de açúcar se encontram no Apêndice (Item 9).

Tanto o Latossolo, quanto o Argissolo estudados, apresentaram ganho de coesão na ordem de 130 e 36% (Figura 5.5), respectivamente. O ganho de resistência à compressão não confinada com adição de fibra condiz com os resultados encontrados por Leocádio (2005), Sales (2011), Trindade et al. (2006), Malekzadeh e Bisel (2012), Pradham, Kar e Naik (2012), Li et al. (2014), Tang, Shi e Zhao (2010), Festugato (2008), Plé e Lê (2012) e Diambra et al. (2010).

Os resultados observados são semelhantes a outros estudos com fibra natural, como Bolanões (2013) que obteve melhor desempenho da fibra de coco verde com 1,5% de adição ao solo, atingindo um aumento de 188% da coesão em relação ao solo puro. Já Leocádio (2005) estudou fibras de sisal com 15 mm, adicionadas em teores de 0,5% a um solo laterítico, obtendo aumento da coesão do solo em torno de 57%, sem alteração do ângulo de atrito interno.

A análise de variância dos resultados de resistência à compressão não confinada (q_u) revelou que a interação solo x teor de fibra é significativa e que há diferença entre os

diferentes níveis de teor de fibra, ambos com 99% de confiança. O fator solo apresentou diferença com 95% de confiança no teste F.

As análises de comparação de médias por Scott- Knott permitiram observar que os solos não diferem entre si em valores de q_u apenas para o teor de 1,5% de adição de fibra de cana de açúcar (Tabela 5.6).

No Argissolo Amarelo, o maior valor de coesão foi obtido com a adição de fibra de 1,5 %, tornando o valor de teor 1,5 % o valor ótimo para o Argissolo Amarelo estudado, concordando com Bolanões (2013), que obteve o valor de teor ótimo de acréscimo de fibra de coco verde de 1,5% para as amostras de solo estudadas.

Já para o Latossolo Vermelho, o teor de adição de fibra que atingiu maior valor de coesão foi 2%, com todos os teores acima de 1% não apresentando diferença significativa em relação a esse. Entretanto, os solos não apresentam diferença significativa com 1,5% de acréscimo de fibra, fazendo desse o valor mais adequado para as análises seguintes, por permitir a observação do comportamento de ambos os solos em resposta ao mesmo teor de adição de matéria orgânica.

Tabela 5.6 Valores médios de resistência à compressão não confinada (q_u)* com diferentes teores de fibra no horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico

Teor de Fibra	Solo			
	Latossolo Vermelho		Argissolo Amarelo	
%	-----KPa-----			
0	134,52	C b	200,14	Ba
0,5	187,02	B b	223,11	Ba
1	292,01	A a	236,23	B b
1,5	300,21	A a	272,32	A a
2	308,41	A a	259,20	A b
2,5	305,13	A a	239,51	B b

*Letras iguais maiúsculas não diferem na coluna e minúsculas não diferem nas linhas a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott

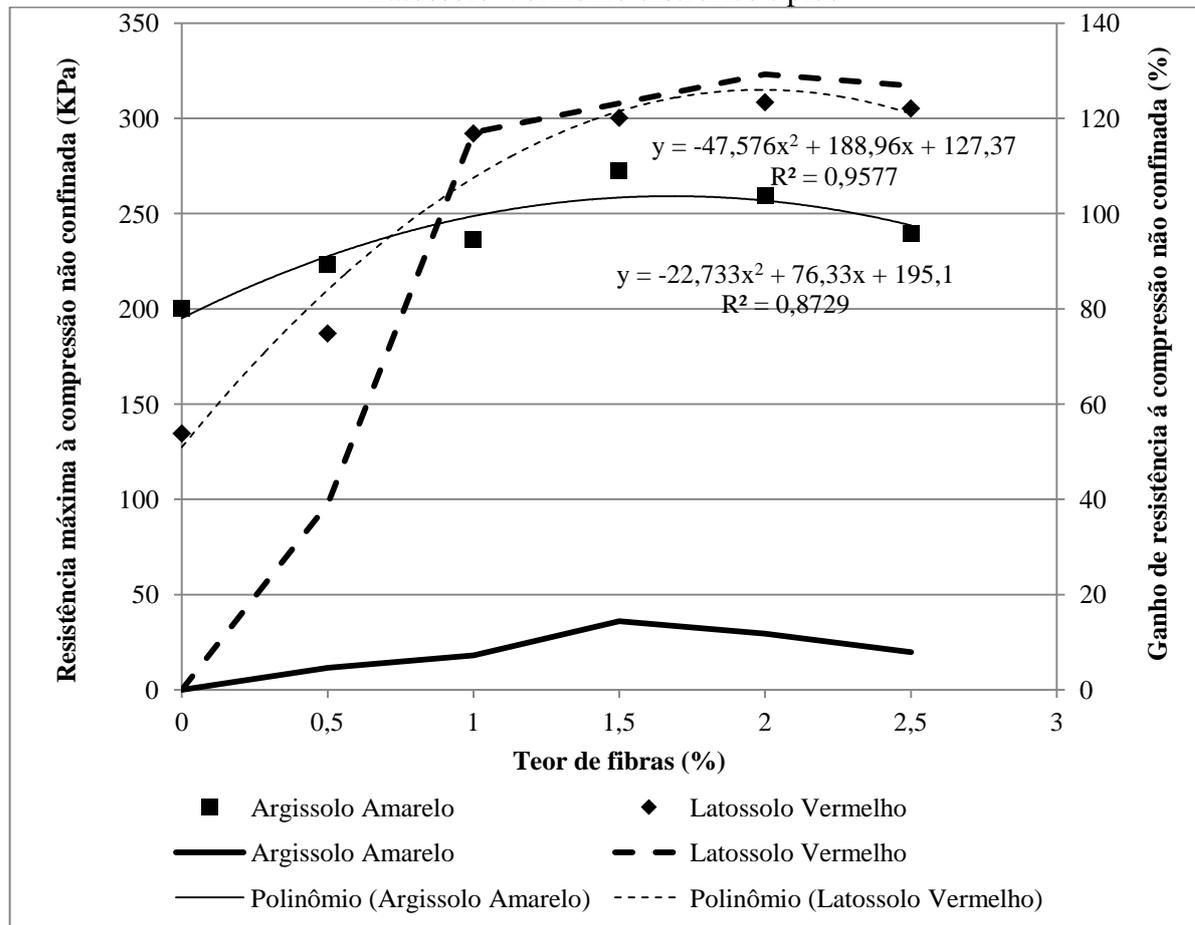
As regressões ajustadas (Figura 5.5) aos valores observados permitem verificar que o comportamento do Latossolo Vermelho apresenta valor de resistência máximo em 2% de acréscimo de fibra. Enquanto isso, o Argissolo Amarelo apresentou um menor ajuste ao polinômio de 2º grau ($R^2=87,29\%$) com curvatura menos acentuada, exibindo menor sensibilidade à modificação com acréscimo de fibra do que o Latossolo Vermelho, indicando

que o Argissolo Amarelo não sofre alterações de comportamento tão significativas quanto o Latossolo Vermelho perante o acréscimo de fibra.

Zaimoglu e Yetimoglu (2011) afirmam que os valores de resistência estabilizam após um certo valor de acréscimo de fibra e Pradham, Kar e Naik (2012) afirmam que os valores se estabilizam ou caem após o teor ótimo de acréscimo.

Outros trabalhos, como Sales (2011) e Trindade et al. (2006), acrescentam ainda que quanto maiores os teores de acréscimo de fibra e os comprimentos da mesma, o material compósito se torna quebradiço, com planos preferenciais de ruptura, devido à orientação das fibras em planos horizontais durante a compactação, que compromete a moldagem do corpo de prova.

Figura 5.5 Resistência à compressão não confinada em função do teor de fibra adicionado ao solo do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocioso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico



Sobre a análise da condutividade hidráulica saturada com acréscimo de fibra (Tabela 5.7), os dados não apresentaram uma distribuição normal segundo o teste de Shapiro Wilk. Portanto, foram transformados por BoxCox através do software Action Stat (2014). As análises de comparação de médias por Scott- Knott permitiram concluir que há aumento linear

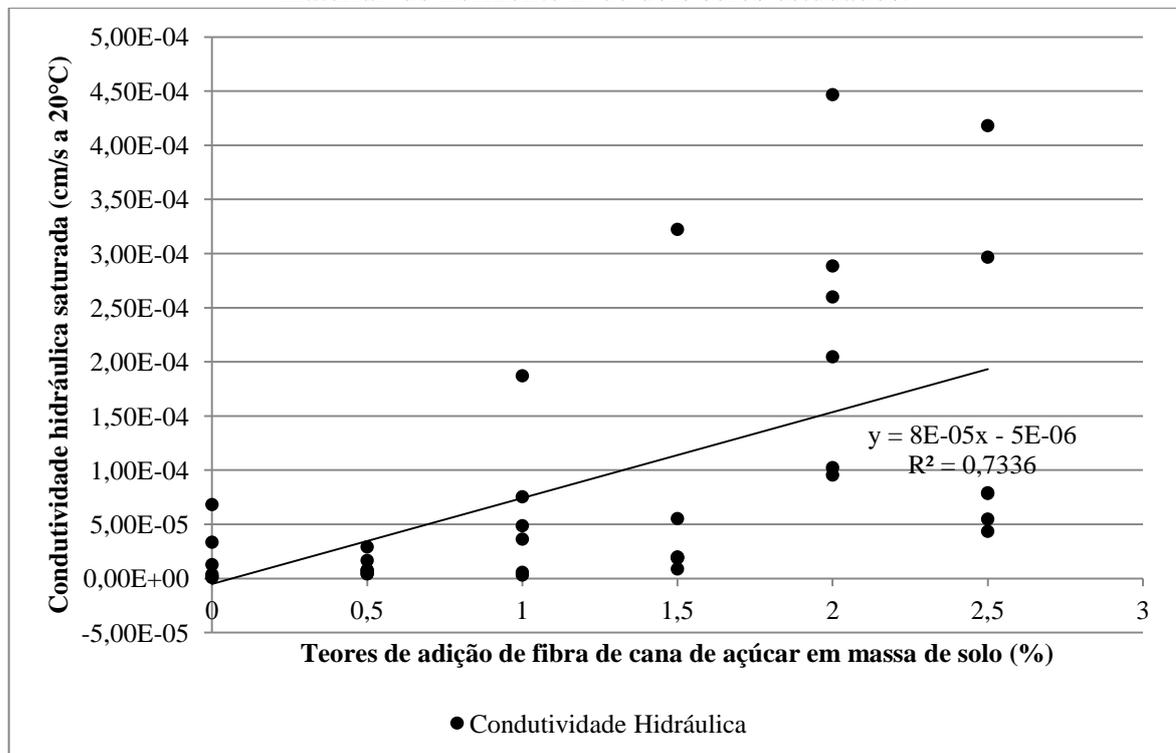
da condutividade hidráulica em função do acréscimo de fibra (Figura 5.6), como foi observado no estudo de Plê e Lê (2012), que analisaram fibras de polipropileno adicionadas a um solo argiloso com teores variando de 0,1 a 0,8% de massa. Houve diferença significativa, entre os valores de condutividade hidráulica saturada a cada 1% de adição de fibra no solo, sendo que, o valor máximo de condutividade hidráulica saturada foi observado com adição de 2% de fibra de cana de açúcar (Tabela 5.7).

Tabela 5.7 Valores médios de Condutividade Hidráulica Saturada* para o horizonte B de solos com adição de fibra nos teores de 0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 e 2,5 % de massa.

Teor de Fibra	Condutividade Hidráulica
%	10^{-5} cm/s a 20°C
0	1,3 c
0,5	1,9 c
1	6,2 b
1,5	7,5 b
2	23,3 a
2,5	16,2 a

*Letras iguais não diferem a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott

Figura 5.6 Condutividade hidráulica saturada em função do teor de fibra adicionado ao material do horizonte B de dois solos estudados.



Após a classificação dos solos e a determinação do teor ótimo de adição de fibra como sendo de 1,5% para ambas as amostras, iniciaram-se os ensaios com incubação, a partir do quais se obteve os valores de compressão não confinada apresentados nas Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10.

Não se observou interação significativa entre os solos, a presença de fibra e o tempo de incubação. Entretanto, dentro de cada teor de fibra houve diferença significativa entre os solos, sendo que tanto para 0 quanto para 1,5% de adição, o Latossolo Vermelho apresentou maiores valores de resistência à compressão não confinada (Tabela 5.8).

Em relação ao efeito do teor de fibra sobre a resistência à compressão não confinada, o Argissolo Amarelo não apresentou diferença significativa devido à adição de fibra de cana de açúcar, reiterando os resultados do ensaio de teor ótimo de fibra, nos quais o mesmo apresentou menor reação à adição de fibra que o Latossolo Vermelho. Enquanto no último, os valores obtidos se diferenciaram a 5% de probabilidade e o acréscimo de 1,5% de fibra obteve melhor desempenho.

Tang, Shi e Zhao (2010) afirmam que a força interfacial fibra/solo e, conseqüentemente, o efeito gerado pela adição de fibra, dependem do rearranjo das partículas e da área de contato eficaz dessas superfícies, ou seja, o resultado é afetado pela mineralogia do solo devido à estrutura e organização das partículas. Esse comportamento destaca que a mineralogia do Latossolo Vermelho permite maior favorecimento do material com o acréscimo de fibra do que o Argissolo Amarelo.

Tabela 5.8 Valores médios de coesão (c_u)* do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico com adição de fibra nos teores de 0 e 1,5% de massa.

Solo	Teor de fibra (%)	
	0	1,5
	-----KPa-----	
Argissolo Amarelo	136,88 Ba	132,88 Ba
Latossolo Vermelho	159,02 A b	192,55 A a

*Letras iguais maiúsculas não diferem na coluna e minúsculas não diferem nas linhas a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott

A análise da interação entre os solos e os períodos de incubação (Tabela 5.9 e Figura 5.7) apresentou um comportamento inicial semelhante dos solos, enquanto, que aos 2 meses de armazenamento o Argissolo Amarelo apresentou ganho de resistência linear durante o

período de incubação. Já o Latossolo Vermelho apresentou um comportamento parabólico, sofrendo uma leve perda de resistência aos 6 meses de incubação em relação ao período anterior. Contudo, não é possível afirmar que a partir de 6 meses de incubação há a perda de resistência por parte do Latossolo Vermelho, pois não houve diferença significativa entre os valores de coesão obtidos com 4 e 6 meses de armazenamento. Portanto, dentro do período observado, não há perda de coesão devido à decomposição da fibra orgânica utilizada em ambos os solos.

Durante seu estudo de 60 dias, Mongrovejo (2013) observou que quanto maior for o tempo de cura do corpo de prova, maior será a resistência à compressão, conclusão que concorda com o observado dentro do mesmo período deste estudo. Entretanto, a autora não apresentou justificativa para o comportamento das amostras em relação ao tempo. O estudo foi realizado com adição de fibras de papel Kraft, de 0 a 15%, em amostras arenosas e argilosas de solo, sendo que o teor utilizado para análise temporal foi de 5%.

Tabela 5.9 Valores médios de coesão (c_u)* do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico armazenados por 0, 2, 4 e 6 meses em refrigerador à 5°C

Solo	Tempo de armazenamento (meses)							
	0		2		4		6	
-----KPa-----								
Argissolo Amarelo	118,12	A b	127,96	Bb	139,03	Ba	154,41	Ba
Latossolo Vermelho	108,89	A c	175,94	A b	217,16	A a	201,16	A a

*Letras iguais maiúsculas não diferem na coluna e minúsculas não diferem nas linhas a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott

Apesar do ganho inicial significativo de coesão devido a adição de fibra, não houve diferença entre as amostras de cada período com e sem adição de fibra a partir de dois meses de armazenamento (Tabela 5.10). Isso pode ser atribuído ao fato de os valores observados serem médias dos dois solos estudados, que apresentaram diferença significativa nos valores de coesão ao longo do tempo, devido à diferente resposta à modificação com fibra, mesmo que não haja interação significativa entre todos os fatores estudados. Apesar disso, independente da adição de fibra, as amostras apresentaram ganho de resistência ao longo do tempo (Figura 5.8), não ocorrendo diferença significativa nos valores de coesão a partir de 4 meses de incubação. O ganho inicial de resistência, inclusive das amostras sem fibra, pode ser justificado pelo comportamento de solos não saturados, onde ocorre aumento da resistência ao cisalhamento necessária para produzir a ruptura conforme o grau de saturação das amostras

diminui (DAS, 2011). Mesmo que as amostras tenham sido armazenadas em envoltórias para evitar a perda de umidade, a mesma ocorreu superficialmente nas amostras devido ao contato com o ar, proporcionando o ganho de resistência observado, que ocorre pela diminuição da saturação superficial das amostras.

Figura 5.7 Valores médios de coesão (c_u) (KPa) do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico armazenados por 0, 2, 4 e 6 meses em refrigerador à 5°C.

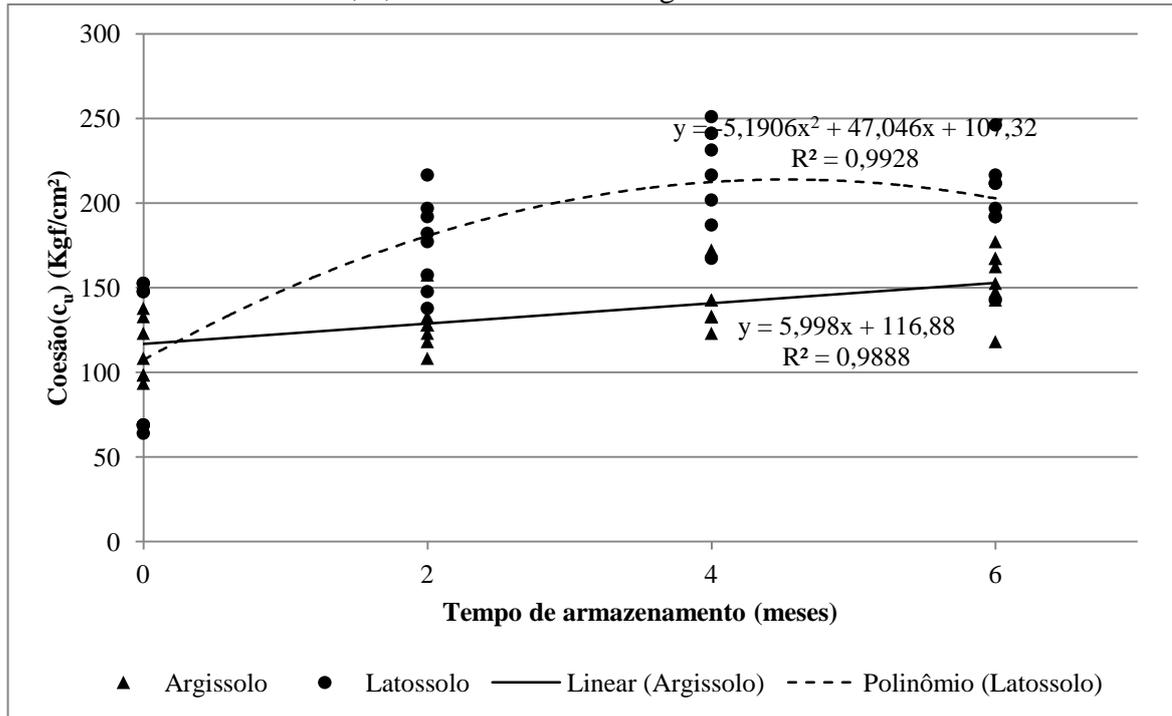
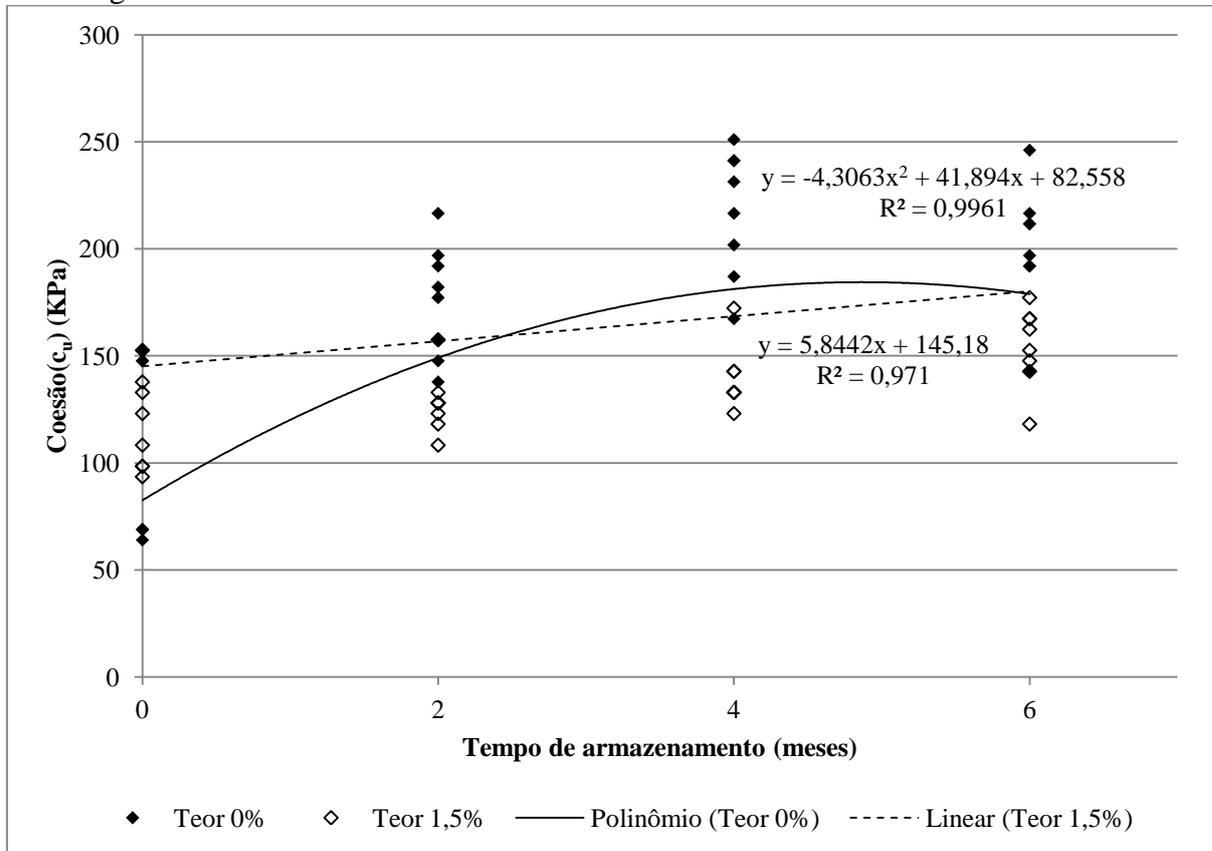


Tabela 5.10 Valores médios de coesão (c_u) (KPa)* do horizonte B de solos com adição de 0 e 1,5% de fibra de cana de açúcar armazenados por 0, 2, 4 e 6 meses em refrigerador à 5°C

Teor	Tempo de armazenamento (meses)							
	0		2		4		6	
%	-----KPa-----							
0	83,66	B c	145,80	A b	184,55	A a	177,79	A a
1,5	143,34	A b	158,10	A b	171,64	A a	177,79	A a

*Letras iguais maiúsculas não diferem na coluna e minúsculas não diferem nas linhas a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

Figura 5.8 Valores médios de coesão (c_u) (KPa) do horizonte B de solos com acréscimo de 0 e 1,5% de massa de fibra de cana de açúcar armazenados por 0, 2, 4 e 6 meses em refrigerador à 5°C



Os valores de biomassa microbiana não puderam ser determinados devido à baixa quantidade de micro-organismos nas amostras estudadas, de forma que a metodologia utilizada, mesmo com adaptações de período de incubação e concentração de reagentes, não foi capaz de quantificá-los. A pequena população de micro-organismos presentes nas amostras é justificada pela composição das mesmas, horizonte mineral com baixo teor de matéria orgânica, pela profundidade de coleta de material que apresenta populações menos abundantes que as camadas superficiais do perfil do solo e, também, pela baixa disponibilidade de oxigênio dos corpos de prova compactados.

Já as análises de atividade microbiana (Tabela 5.11) resultaram em um comportamento não normal pelo teste de Shapiro - Wilk, que levou a uma transformação por Johnson através do software Action Stat (2014), para que os dados pudessem ser analisados segundo uma distribuição normal, que resultou em interação entre todos os fatores observados. A análise de comparação de médias por Scott-Knott provou que as amostras com e sem adição de fibra diferem a 5% de probabilidade para ambos os solos em todos os períodos estudados, com exceção do Argissolo a 6 meses de incubação. Nos demais casos, o teor de 1,5% de adição de fibra forneceu valores médios de atividade microbiana superiores ao solo puro, sustentando

que há maior atividade da microbiota nos solos com adição de matéria orgânica devido à presença da mesma, que estimula a atividade dos micro-organismos em sua decomposição.

Quanto a comparação da atividade microbiana entre os solos (Tabela 5.11), houve diferença significativa apenas para as amostras de 2 meses de incubação com 0% de adição de fibra, nas quais o Argissolo Amarelo apresentou valores de atividade microbiana significativamente superiores a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott.

Através da Figura 5.9, pode-se observar a diferença de atividade microbiana nos solos com adição de fibra contra os solos sem adição. Isso se deve à adição de matéria orgânica às amostras, o que causa um quebra do equilíbrio do solo, estimulando a população microbiana pela presença de carbono oxidável (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Após esse período, há uma queda significativa da atividade microbiana (Figura 5.9) devido ao processo de compactação das amostras que leva à diminuição dos espaços vazios, e consequentemente, à restrição do fornecimento de oxigênio para a biota, que diminuiu a velocidade de decomposição das fibras.

As longas cadeias de carbono que compõem as fibras de cana de açúcar estimulam comunidades de micro-organismos que decompõem celulose e de fixadores de nitrogênio, devido à necessidade do nutriente no processo de decomposição da fibra para formação de novas células.

Portanto, independente do solo observado, a decomposição da fibra presente nas amostras sofreu uma interrupção devido ao processo de compactação do solo, que diminui os espaços vazios e limitou a oxidação do carbono. Após certo período as populações se desenvolveram, aumentando a atividade, que indica decomposição das fibras, embora não haja diferença significativa entre os valores de atividade após 2 meses para os solos com acréscimo de fibra.

As amostras sem adição de fibra apresentaram crescimento gradual da atividade microbiana ao longo do tempo devido

Figura 5.9 Valores médios de atividade microbiana ($\mu\text{g CO}_2/\text{g}$ de solo seco.dia) no horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico com 0 e 1,5% de adição de massa de fibra de cana de açúcar, armazenados por 0, 2, 4 e 6 meses em refrigerador à 5°C.

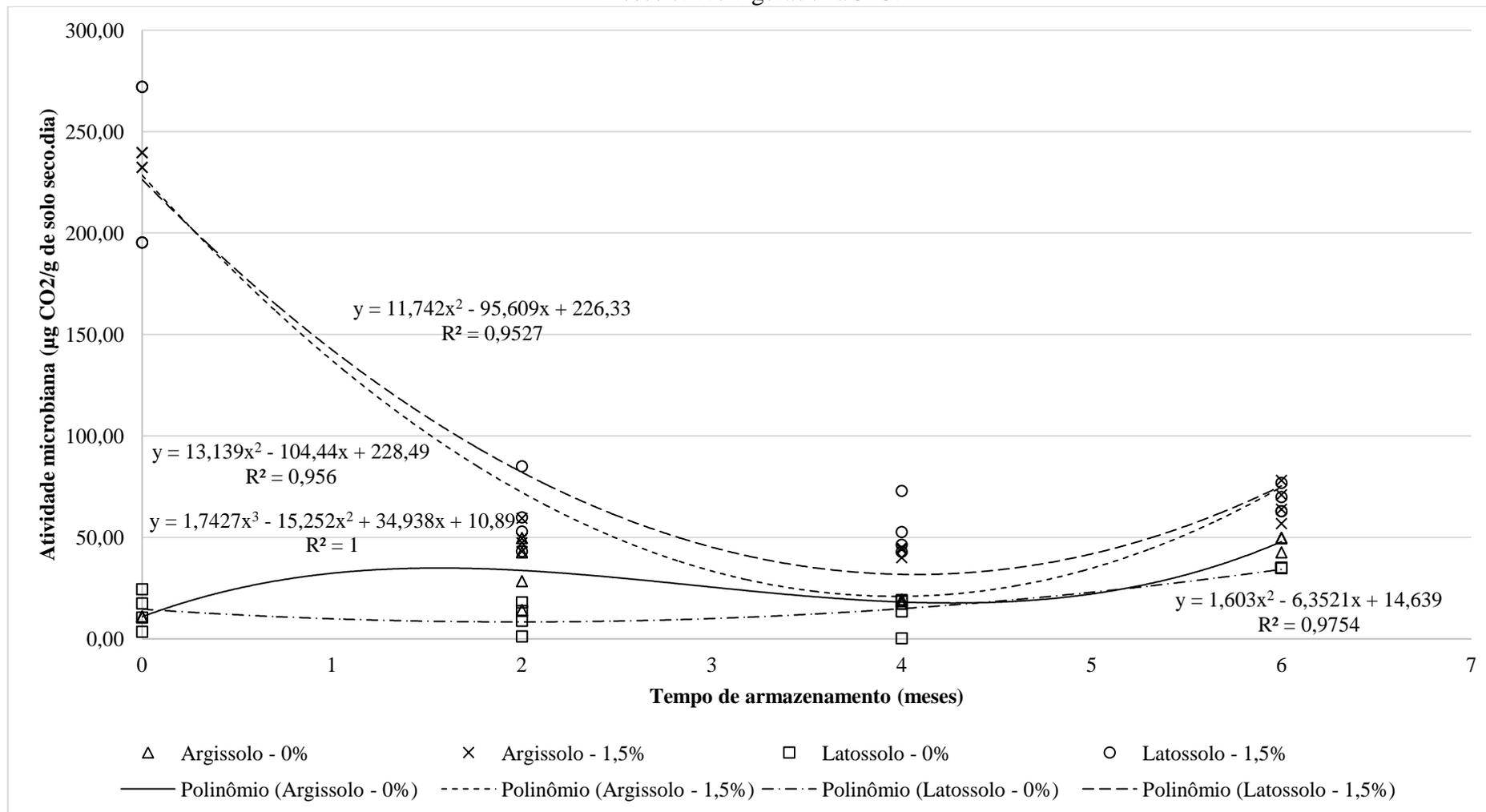


Tabela 5.11 Valores médios de atividade microbiana* no horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico com 0 e 1,5% de adição de massa de fibra de cana de açúcar, armazenados por 0, 2, 4 e 6 meses em refrigerador à 5°C

Solo	Teores %	Tempo (meses)			
		0	2	4	6
		-----µg CO ₂ /g de solo seco.dia-----			
Argissolo	0	10,89 b	33,70 b	18,15 b	47,89 a
Amarelo	1,5	235,95 a	49,78 a	43,34 a	67,40 a
Latossolo	0	13,95 b	10,42 b	12,81 b	34,93 b
Vermelho	1,5	233,63 a	60,19 a	53,67 a	68,10 a

*Letras iguais minúsculas não diferem nas linhas a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott.

Na análise do comprimento do micélio total das amostras, não houve interação significativa entre os fatores, contudo, o efeito deles sobre o comprimento do micélio total foi significativo. Avaliando os dados, predominaram em comprimento de micélio total o Latossolo Vermelho sobre o Argissolo Amarelo (Tabela 5.12) e a adição de fibra a 1,5% sobre o solo sem adição (Tabela 5.13).

A diferença significativa entre os solos mostra que o Latossolo Vermelho oferece um ambiente mais favorável ao desenvolvimento de micélio do que o Argissolo Amarelo, seja pela composição, umidade ou estrutura.

Tabela 5.12 Valores médios de micélio total* do horizonte B de um Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico e um Latossolo Vermelho distrófico típico

Solo	
Argissolo Amarelo	Latossolo Vermelho
-----m/g de solo seco-----	
4,86 b	7,94a

*Letras iguais não diferem a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott.

Tabela 5.13 Valores médios de micélio total* do horizonte B de solos com 0 e 1,5% de adição de massa de fibra de cana de açúcar

Teor de fibra (%)	
0	1,5
-----m/g de solo seco-----	
5,51 b	7,29a

*Letras iguais não diferem a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott.

Os valores de comprimento de micélio total ao longo do tempo (Tabela 5.14) apresentam valores altos de micélio no primeiro momento, devido às amostras ainda refletirem a situação do solo em campo. Em seguida, há uma queda dos valores devido à compactação do solo que, assim como afetou a atividade microbiana, causa uma diminuição

dos espaços vazios e restrição do fornecimento de oxigênio, diminuindo o comprimento de micélio.

Com o passar do tempo, o armazenamento dos corpos de prova sem alteração permitiu que os micélios se desenvolvessem, sobretudo na superfície (Figura 5.10), que resultou no crescimento do comprimento de micélio total, indicado pela diferença significativa dos valores de 6 e 4 meses em relação a 2 meses de incubação (Tabela 5.14).

Tabela 5.14 Valores médios de micélio total* do horizonte B de solos armazenados por 0, 2, 4 e 6 meses em refrigerador à 5°C

Tempo de armazenamento (meses)			
0	2	4	6
-----m/g de solo seco-----			
7,50a	3,90 b	6,60a	7,60a

*Letras iguais não diferem a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott.

Figura 5.10 Corpos de prova de Argissolo Amarelo (acima) e Latossolo Vermelho (abaixo) com 1,5% de fibra armazenados por 2, 4 e 6 meses, respectivamente, da esquerda para direita.



6 CONCLUSÕES

Observou-se que a adição de fibras de cana de açúcar promoveu ganho de coesão, aumento de condutividade hidráulica e alterações na atividade microbiana de formas diferentes para os solos em função de sua mineralogia. As análises permitiram concluir que:

- Houve ganho de resistência à compressão não confinada com o acréscimo de fibra em ambos os solos estudados, sendo o ganho do Latossolo Vermelho na ordem de 130% e do Argissolo Amarelo de 36%;
- Ocorreu aumento da condutividade hidráulica em ambos os solos com o acréscimo de fibra, aumentando os valores de condutividade conforme a adição de fibra;
- Verificou-se aumento da resistência à compressão não confinada em ambos os solos durante os seis meses de observação;
- Ocorreu, de forma geral, em ambas as classes de solo estudadas, queda da atividade microbiana e do comprimento de micélio total após a compactação das amostras, seguida de crescimento desses parâmetros ao longo do período observado.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para os solos estudados, apesar da diferença na classificação pedológica, sendo uma amostra de Latossolo Vermelho distrófico típico e outra de Argissolo Amarelo distrocoeso latossólico, a Classificação Unificada engloba ambos na classe MH – Silte elástico arenoso.

Os materiais apresentaram semelhanças quanto às curvas granulométricas, limite de liquidez, teor de argila flocculada, densidade de partículas, umidade ótima de compactação e densidade seca máxima segundo o ensaio de Proctor.

A respeito dos dados de classificação, o comportamento dos solos divergiu quando aos valores de diâmetro médio ponderado e geométrico de partículas, teor de agregados, cor e textura e estrutura, que são aspectos influenciados, principalmente, pela mineralogia do solo.

Corroborando a diferença apontada pela classificação pedológica, houve diferença significativa entre os solos nas análises de ganho de resistência à compressão não confinada com adição de fibra, resistência à compressão não confinada, atividade microbiana e micélio total ao longo do tempo.

Na análise do teor ótimo de fibra, apesar da diferente resposta de comportamento em relação ao acréscimo de fibra, sendo o Latossolo Vermelho mais sensível à adição de fibra que a do Argissolo Amarelo, ambos obtiveram o valor de teor ótimo de 1,5%, com ganho de resistência para o Latossolo Vermelho na ordem de 130% e do Argissolo Amarelo de 36%.

Houve aumento crescente da condutividade hidráulica saturada de ambos os solos com o aumento da adição de fibra, não ocorrendo diferença significativa entre ambos para esse parâmetro.

Ocorreu aumento dos valores de resistência à compressão não confinada de ambos os solos, tanto das amostras com fibra, quanto das sem fibra durante o armazenamento. O ganho inicial de resistência de todas as amostras pode ser atribuído ao leve ressecamento superficial das mesmas durante o período. Apesar dos valores de resistência das amostras de solo sem adição de fibra terem um crescimento mais acentuado que as amostras com fibra ao longo do tempo, as primeiras não atingiram valores de resistência superiores às amostras com fibra durante o período observado, demonstrando que as fibras naturais são eficientes como reforço.

A atividade microbiana foi superior no Latossolo Vermelho e nas amostras com reforço em detrimento das demais, sendo observado um crescimento gradual da respiração nas amostras sem fibra ao longo dos 6 meses de incubação.

Os valores de atividade microbiana das amostras com fibra, assim como os valores de comprimento de micélio total de todas as amostras, apresentaram queda inicial devido à compactação do solo, que limita a atividade microbiana, seguida de crescimento.

As diferenças de mineralogia dos solos estudados, indicadas pela cor dos mesmos, mostraram-se determinantes no comportamento mecânico, físico e até mesmo microbiológico das amostras observadas. Destaca-se que, apesar de semelhanças físicas, que resultaram na mesma classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM, 2011), os solos apresentaram comportamento completamente divergente no que se trata de reforço por acréscimo de fibra, evidenciando a necessidade de um maior rigor na classificação de solos para fins geotécnicos.

Portanto, sugere-se a continuidade de estudos sobre solos com alterações geotécnicas por acréscimo de fibras orgânicas, com uma descrição mais detalhada da mineralogia das amostras e a observação das comunidades microbianas responsáveis tanto pela decomposição do material empregado na técnica, quanto pela formação de agregados no solo.

8 REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6459** – Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984a.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7180** – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984b.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7181** – Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984c.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6457** – Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986a.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7182** – Ensaios de Compactação. Rio de Janeiro, 1986b.
- ACTION STAT, Versão 3.3.111.1178 build 2. São Carlos – SP: Estatcamp - Consultoria em estatística e qualidade, 2014. Disponível em: < <http://www.portalaction.com.br/>>. Acesso em: outubro de 2017.
- ASTM International, **ASTM D2166/D2166M** - Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. West Conshohocken, PA, 2016.
- ASTM International, **ASTM D2487-11** - Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, PA, 2011.
- BARISON, M. R.; ALVARENGA, M. I. N.; PONS, N. A. D. Solos. In: NOGUEIRA, L. A. H.; CAPAZ, R. S. (Org.). **Ciências Ambientais para engenharia**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. p. 55- 83.
- BOLAÑOS, R. E. Z. **Comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com fibras de coco**. 2013. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- BORDIN, I.; NEVES, C. S. V. J.; AZEVEDO, M. C. B. de; VIDAL, L. H. I. Desenvolvimento de mudas de aceroleira propagadas por estacas e sementes em solo compactado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 530-536, maio/jun. 2005.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M. Óxidos de Ferro. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Org.). **Química e mineralogia do solo**: Parte I – Conceitos básicos. Viçosa, MG: SBCS, 2009. p. 506-572.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 561 p.

DE-POLLI, H; GUERRA, J.G.M. Biomassa microbiana: perspectivas para o uso e manejo do solo. In: ALVAREZ V., H.V.; FONTES, L.E.F.; FONTES, M.P. **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. p. 552-564.

DIAMBRA, A.; IBRAIM, E.; MUIR WOOD, D.; RUSSELL, A. R. Fibre reinforced sands: Experiments and modelling. **Geotextiles and Geomembranes**, Kidlington, United Kingdom. v. 28, n. 3, p. 238–250, Jun. 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006. 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2017. 230 p.

FARIAS, F. O. M. **Caracterização de biomassas brasileiras para fins de aproveitamento energético**. 2012. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) -Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP, 2012.

FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C.. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 4, p. 991-996, dez. 1999.

FERREIRA, C. A. **Estudo do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras através do método de elementos discretos**. 2010. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

FERREIRA; M. M. Caracterização Física do solo. In: JONG VAN LIER, Q. (Org.). **Física do Solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2010.

FERREIRA; M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, p. 507-524, 1999.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. 2000. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

FESTUGATO, L. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices e aspectos**. 2008. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n. 4, p.627-636, 2007.

HEAD, K.H. **Manual of soil laboratory testing: permeability, shear strength and compressibility tests**. 2. ed. New York: JohnWiley & Sons, 1994. 454 p. 2 v.

HEJAZI, S. M.; SHEIKHZADEH, M.; ABTAHI, S. M.; ZADHOUSH, A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, Netherlands, v. 30, p. 100–116, May, 2012.

KÄMPF, N.; MARQUES, J. J.; CURI, N. Mineralogia de solos brasileiros. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. (Org.). **Pedologia: Fundamentos**. Viçosa, MG: SBCS, 2012, p. 82 – 145.

KIEHL, E. D. **Manual de Edafologia: Relações Solo- Planta**. São Paulo: Ceres, 1979. 262 p.

LEOCÁDIO, G. A. S. **Reforço de solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória, tratadas superficialmente com EPS reciclado**. 2005. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

LI, J.; TANG, C.; WANG, D.; PEI, X.; SHI, B. Effect of discrete fibre reinforcement on soil tensile strength. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, Amsterdam, Netherlands v. 6, n. 2, p. 133–137, Apr, 2014.

MALEKZADEH, M.; BISEL, H. Effect of Polypropylene Fiber on Mechanical Behaviour of Expansive Soils. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**. v. 17. p. 55 – 63. 2012.

- MARTINÉZ, G. S. S. **Estudo do comportamento mecânico de solos lateríticos da formação barreiras**. 2003. 291 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2003.
- MELLONI, R.; CARDOSO, E. J. B. N. Quantificação de micélio extrarradicular de fungos micorrízicos arbusculares em plantas cítricas e endófitos: I. Método empregado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 1, p. 53-58, mar. 1999.
- MONGROVEJO, D. R. L. **Avaliação das propriedades geotécnicas de um solo argiloso e outro arenoso com adição de fibras de papel Kraft**. 2013. 225 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP, 2013.
- MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006.
- NETO, E. L. de S.; PIERANGELI, M. A. P.; LAL, R. Compaction of an oxisol and chemical composition of palisadegrass. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 928-935, 2013.
- NEWMAN, E.I. A method for estimating the total length of root in a sample. **Journal of Applied Ecology**, London, v. 3, n. 1, p. 139-145, May, 1966.
- OLIVEIRA, J. B. de. **Pedologia aplicada**. 4. Ed. Piracicaba: FEALQ, 2011.
- PAUL, E. A (Ed.). **Soil microbiology and biochemistry**. 3. ed. Oxford: Academic Press, 2007. c. 2. p. 25-49.
- PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- PLÉ, O.; LÊ, T.N.H. Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty clay. **Geotextiles and Geomembranes**, Kidlington, United Kingdom. v. 32, p. 111–116, June 2012.
- PRADHAN, P. K.; KAR, R. K.; NAIK, A. Effect of Random Inclusion of Polypropylene Fibers on Strength Characteristics of Cohesive Soil. **Geotechnical and Geological Engineering**, [S.l.], v. 30, p. 15–25, 2012.
- REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de

cobertura em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p.1805-1816, 2008.

SALES, K. C. S. **Melhoria de solos por inclusão de fibras naturais**. 2011. 113 f.

Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Brasília- DF, 2011.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5 ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p.

SÉRÉ, G.; SCHWARTZ, C.; OUVRARD, S.; RENAT, J. C.; WATTEAU, F.; VILLEMEN, G.; MOREL, J. L. Early pedogenic evolution of constructed Technosols. **Journal of Soils and Sediments**, Heidelberg, v. 10, n. 7, p. 1246 – 1254, 2010.

SISVAR, Versão 5.6 build 86. Lavras: FERREIRA, D. F., 2014. Disponível em: <<http://www.dex.ufla.br/~danielff/programas/sisvar.html>>. Acesso em: 10 maio 2017.

SOMMER, M. Influence of soil pattern on matter transport in and from terrestrial biogeosystems—a new concept for landscape pedology. **Geoderma**, Amsterdam, Netherlands, v. 133, p. 107–123, 2006.

TANG, C. S.; SHI, B.; ZHAO, L.Z. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. **Geotextiles and Geomembranes**, Kidlington, United Kingdom. v. 28, n. 1, p. 54–62, Feb. 2010.

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 residual arenoso reforçado com fibras de polipropileno visando aplicação em estradas florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 215-222, 2006.

VAN ELSAS, J.D.; JANSSON, J.K.; TREVORS, J.T. (Ed.) **Modern soil microbiology**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. v.21, p.521– 552.

ZAIMOGLU, A. S.; YETIMOGLU, T. Strength Behavior of Fine Grained Soil Reinforced with Randomly Distributed Polypropylene Fibers. **Geotechnical and Geological Engineering**, [S.l.], v. 30, p. 197–213, 2011.

9 APÊNDICE

9.1 Dados estatísticos

9.1.1 Determinação do Teor ótimo de Fibra

Variável analisada: Resistência à compressão não confinada

Tabela 9.1 Teste de normalidade para variável Resistência à compressão não confinada por Shapiro-Wilk

Variável	n	W	Pr<W
Resistência	36	0.9448011923677	0.0717682

Tabela 9.2 Análise de variância da variável resistência à compressão não confinada

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Solo	1	2342.015209	2342.015209	6.605	0.0168
Teor	5	71610.774459	14322.154892	40.394	0.0000
Solo*Teor	5	21995.837153	4399.167431	12.407	0.0000
Erro	24	8509.568397	354.565350		

Total corrigido 35 104458.195218
 CV (%) = 7.64
 Média geral: 246.4832136 Número de observações: 36

9.1.2 Determinação da variação da Condutividade Hidráulica com acréscimo de fibra

Variável analisada: Condutividade hidráulica

Tabela 9.3 Teste de normalidade para variável condutividade hidráulica por Shapiro-Wilk

Variável	n	W	Pr<W
CH	36	0.7594455604509	0.0000028

Tabela 9.4 Testes de normalidade da variável condutividade hidráulica transformada por Box Cox

Testes	Estatísticas	P-valores
Anderson - Darling	0,296849323	0,5726
Kolmogorov - Smirnov	0,073509744	0,8923
Shapiro - Wilk	0,969325673	0,4074
Ryan - Joiner	0,98868662	0,5651

Tabela 9.5 Análise de variância da variável condutividade hidráulica transformada por Box Cox

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Solo	1	2.216957	2.216957	1.739	0.1997
Teor	5	52.573211	10.514642	8.247	0.0001
Solo*Teor	5	11.796914	2.359383	1.850	0.1409
Erro	24	30.600314	1.275013		
Total corrigido	35	97.187397			
CV (%) =	-10.94				
Média geral:	-10.3201797		Número de observações:	36	

9.1.3 Determinação da variação da Resistência à compressão não confinada ao longo do tempo

Variável analisada: Resistência à compressão não confinada

Tabela 9.6 Teste de normalidade para variável resistência à compressão não confinada por Shapiro-Wilk

Variável	n	W	Pr<W
Resistência	64	0.9752234554629	0.2247420'

Tabela 9.7 Análise de variância da variável resistência à compressão não confinada

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Solo*Teor*Tempo	3	8459,11	2819,703	2,088	0,1141
Solo*Teor	1	22531,39	22531,39	16,686	0,0002
Solo*Tempo	3	63730,94	21243,65	15,732	0
Teor*Tempo	3	48114,59	16038,2	11,877	0
Solo	1	107110,4	107110,4	79,323	0
Teor	1	13951,17	13951,17	10,332	0,0023
Tempo	3	178156	59385,33	43,979	0
Erro	48	64814,82	1350,309		
Total corrigido	63	506868.399602			
CV (%) =	11.83				
Média geral:	310.6672781		Número de observações:	64	

9.1.4 Determinação da biomassa microbiana e respiração ao longo do tempo

Variável analisada: Atividade Microbiana

Tabela 9.8 Teste de normalidade da variável atividade microbiana por Shapiro-Wilk

Variável	n	W	Pr<W
Resistência	64	0.6844163996924	0.000000

Tabela 9.9 Testes de Normalidade dos dados de atividade microbiana transformados por Johson

Testes	Estatísticas	P-valores
Anderson - Darling	1,004817	0,0112
Kolmogorov - Smirnov	0,121064	0,0208
Shapiro - Wilk	0,958726	0,0314
Ryan - Joiner	0,981424	0,0564

Tabela 9. 10 Análise de variância da variável atividade microbiana transformada por Jonhson

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Solo*Teor*Tempo	3	1,36	0,45	3,24	0,0302
Solo*Teor	1	1,33	1,33	9,53	0,0033
Solo*Tempo	3	0,74	0,25	1,77	0,1655
Teor*Tempo	3	16,97	5,66	40,43	0,0000
Solo	1	0,58	0,58	4,12	0,0479
Teor	1	42,70	42,70	305,24	0,0000
Tempo	3	7,69	2,56	18,33	0,0000
Erro	48	6,71	0,14		
Total corrigido	63	78.082245			
CV (%) =	248.12				
Média geral:	0.1507383		Número de observações:	64	

9.1.5 Determinação do micélio total ao longo do tempo

Variável Analisada: micélio total

Tabela 9.11 Teste de normalidade para variável Micélio Total por Shapiro-Wilk

Variável	n	W	Pr<W
Resistência	64	0.9750894053573	0.2212586

Tabela 9.12 Análise de variância da variável micélio total

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Solo*Teor*Tempo	3	10,62368	3,541228	0,967	0,416
Solo*Teor	1	2,297589	2,297589	0,627	0,4322
Solo*Tempo	3	27,94119	9,31373	2,543	0,0672
Teor*Tempo	3	12,31245	4,10415	1,121	0,35
Solo	1	152,0753	152,0753	41,529	0
Teor	1	50,31842	50,31842	13,741	0,0005
Tempo	3	143,5207	47,84023	13,064	0
Erro	48	175,7721	3,661918		
Total corrigido	63	574.861399			
CV (%) =	29.90				
Média geral:	6.3994362		Número de observações:	64	



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

A N E X O I

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Título da Dissertação: **“Avaliação pedológica e geotécnica de solos modificados com fira de cana de açúcar”**

Autor: **Ana Carolina Moraes Rangel**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito		Rubrica
	A = Aprovado	R = Reprovado	
1º	A		
2º	A		
3ª	A		
4ª	A		

Observações:

(1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.

(2) O Trabalho será considerado Reprovado se for atribuído pelos menos 1 conceito R.

Este documento terá a validade de 30 (trinta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Resultado Final: Conceito: A , ou seja, APROVADA

Observações: _____

Itajubá, 06 de abril de 2018

Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior
1º Examinador - UFLA

Prof. Dr. Rogério Melloni
2º Examinador - UNIFEI

Prof.ª Dr.ª Adinele Gomes Guimarães
3ª Examinadora (Coorientadora) - UNIFEI

Prof.ª Dr.ª Maria Inês N. Alvarenga
4ª Examinadora (Orientadora) - UNIFEI