



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANTÔNIO ITALCY DE OLIVEIRA JÚNIOR

**COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE MISTURAS COMPACTADAS DE SOLO
ARGILOSO COM FIBRAS CURTAS DE COCO**

Recife

2018

ANTÔNIO ITALCY DE OLIVEIRA JÚNIOR

**COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE MISTURAS COMPACTADAS DE
SOLO ARGILOSO COM FIBRAS CURTAS DE COCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof^o. Dr. José Fernando Thomé Jucá

Recife

2018

Catálogo na fonte

Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

O48c Oliveira Júnior, Antônio Italcy de.

Comportamento geotécnico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras curtas de coco./ Antônio Italcy de Oliveira Júnior - 2018.

112folhas, Il.; Tab.; Abr.e Sigl.

Orientador (a): Profº. Dr. José Fernando Thomé Jucá.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.

Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Compósitos. 3. Comportamento Geotécnico. 4. Microestrutura. 5. Interface solo-fibra. I.Jucá, José Fernando Thomé (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-410

ANTÔNIO ITALCY DE OLIVEIRA JÚNIOR

**COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE MISTURAS COMPACTADAS DE
SOLO ARGILOSO COM FIBRAS CURTAS DE COCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em: 06/07/2018.

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. José Fernando Thomé Jucá (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Profª. Drª. Karla Salvagni Heineck (Examinadora Externa)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profª. Drª. Maria Odete Holanda Mariano (Examinadora Interna)

Universidade Federal de Pernambuco

A toda minha família, em especial à minha mãe Madalena.

AGRADECIMENTOS

À Deus por ser esta força motriz que faz a roda da vida girar, por ter me concedido coragem, determinação e por colocar verdadeiros anjos em meu caminho.

À toda minha família, pelos incentivos e entusiasmos. Em especial, agradeço a minha mãe Madalena que foi a minha maior incentivadora, para além da vida acadêmico, por todo o seu amor a mim dedicado e por sempre me fortalecer nos momentos difíceis.

Ao prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá pela orientação, incentivos e confiança; por todos os ensinamentos, por oferecer as condições que tornou possível a realização desta pesquisa e por ter aberto as portas do Grupo de Resíduos Sólidos da UFPE.

Ao corpo técnico do Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE, em especial a Gutemberg pela amizade e por toda atenção e auxílio dedicado aos meus ensaios e a Antonio de Brito pela condução dos ensaios de condutividade.

À todos do Grupo de Resíduos Sólidos da UFPE, em especial a Savio que me ajudou na coleta do solo, Dani, Riadny e Guilherme.

Aos amigos e colegas, Laís, Mário, Miguel, Karlla, Thalita, Rafaella, Amabelli e todos os demais amigos e colegas pelas horas de estudos compartilhados, pelos incentivos e por tornaram tudo mais leve.

Aos amigos cearenses, Saymo, Janilson e Ângela, por toda ajuda, pelos momentos de descontração, por dividir comigo tanto os momentos de alegria, quanto os momentos difíceis. Em especial, a Janilson por sua grande contribuição ao trabalho, me auxiliando na realização do MEV, EDS e nas análises dos componentes químicos do solo e da fibra. A Nara por me ajudar no tratamento das Figuras.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes pela concessão da bolsa e aos departamentos de Química Fundamental e Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco pelo apoio na realização das análises microscópicas.

RESUMO

O reforço de solos argilosos compactados com fibras causa modificações nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, compressibilidade, condutividade hidráulica, capacidade de retenção de água e na estrutura do material. A inclusão de fibras de coco pode melhorar o comportamento geotécnico de solos argilosos compactados, agregando valor aos solos que inicialmente não possuem as características requeridas para determinadas obras de engenharia. O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento geotécnico de misturas compactadas de solo argiloso com diferentes teores de fibras de coco distribuídas aleatoriamente. Neste sentido foram analisadas misturas com teores de fibras de 0, 0,5, 1 e 2% em relação ao peso seco de solo. O programa experimental abrangeu: ensaios de compactação, cisalhamento direto e compressão edométrica em condições inundadas e não inundadas, condutividade hidráulica saturada em permeâmetro de parede flexível, curva de retenção de água ou sucção-umidade pelo método de papel filtro, análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS) na interface solo-fibra. O teor de umidade ótima aumentou e a densidade seca reduziu com adição das fibras de coco, sendo observado uma variação de 1,3% a mais e uma pequena variação de $0,1\text{g/cm}^3$ a menos em relação ao solo natural, respectivamente. A inclusão das fibras de coco aumentou os parâmetros de resistência ao cisalhamento para até 1% de fibra de coco, sendo verificado ganhos de 34,4% na coesão e 7,5% no ângulo de atrito para a condição não inundada e 59,5% na coesão e 5,8% no ângulo de atrito para condição inundada. A compressibilidade das misturas aumentou a medida que o conteúdo de fibra foi aumentado, sendo observado elevações em mais de 30% no coeficiente de compressão em ambas as condições de inundação em relação ao solo natural. A condutividade hidráulica saturada não apresentou alterações para até 1% de fibras, mas observou-se aumento de uma ordem de grandeza para a mistura com 2% de fibras. Por outro lado, a adição da fibra aumentou a retenção de água, principalmente para as misturas com 0,5 e 1% de fibras respectivamente em 30 e 50%. As análises de MEV e EDS indicaram que houve adesão do solo a fibra de coco nas misturas com 0,5 e 1% de fibras e redução da adesão na mistura com 2% de fibras devido aglomerações pontuais dos elementos de reforços. Estes resultados são promissores para aplicação em obras geotécnicas do tipo camadas de base e coberturas de aterros sanitários, entre outras.

Palavras-chave: Compósitos. Comportamento geotécnico. Microestrutura. Interface solo-fibra.

ABSTRACT

The reinforcement of clayey soils compacted with fibers causes changes in the parameters of shear strength, compressibility, hydraulic conductivity, water retention capacity and material structure. The inclusion of coconut fibers can improve the geotechnical behavior of compacted clay soils, adding value to soils that do not initially have the characteristics required for certain engineering works. The objective of this work is to analyze the geotechnical behavior of compacted mixtures of clayey soil with different levels of randomly distributed coconut fibers. In this sense, mixtures with fiber contents of 0, 0.5, 1 and 2% in relation to the dry weight of soil were analyzed. The experimental program included: compaction tests, direct shear and edometric compression in flooded and non-flooded conditions, saturated hydraulic conductivity in flexible wall permeability, water retention or suction-moisture curve by filter paper method, electron microscopy analysis (SEM) and dispersive energy spectroscopy (EDS) at the soil-fiber interface. The optimum moisture content increased and the dry density decreased with the addition of coconut fibers, with a variation of 1.3% more and a small variation of 0.1 g / cm^3 less than the natural soil, respectively. The inclusion of coconut fibers increased the parameters of shear strength for up to 1% of coconut fiber, with a 34.4% gain in cohesion and 7.5% in the friction angle for the non-flooded condition and 59.5 % in cohesion and 5.8% in friction angle for flooded condition. The compressibility of the mixtures increased as the fiber content was increased, with increases of more than 30% in the compression coefficient in both flood conditions compared to the natural soil. The saturated hydraulic conductivity did not show changes for up to 1% of fibers, but an increase of one order of magnitude was observed for the mixture with 2% of fibers. On the other hand, the addition of fiber increased water retention, especially for mixtures with 0.5 and 1% fibers respectively in 30 and 50%. The SEM and EDS analyzes indicated that the soil adherence to coconut fiber in the mixtures with 0.5 and 1% of fibers and reduction of the adhesion in the mixture with 2% of fibers due to the occasional agglomeration of the reinforcement elements. These results are promising for application in geotechnical works, such as base layers and landfill covers, among others.

Keywords: Composites. Geotechnical behavior. Microstructure. Soil -fiber interface.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Poluição a partir da disposição irregular de resíduos do coco verde	20
Figura 2 –	Distribuição espacial da produção de coco no Brasil, em 1990 e 2010.....	25
Figura 3 –	Partes constituintes do coco.....	27
Figura 4 –	Fluxograma operacional das etapas de produção das fibras longas e das fibras curtas e pó.....	29
Figura 5 –	Sequência de etapas do maquinário utilizado para beneficiamento da casca do coco. Em “a)” é ilustrada a etapa de descarga; Em “b)” é ilustrada a etapa de alimentação; Em “c)” a máquina trituradora de casca de coco verde; Em “d)” a máquina de prensagem do material triturado para remoção do LCCV e em “e)” é apresentado a etapa de classificação e a descarga das fibras curtas e o pó.....	30
Figura 6 –	Classificação de materiais compósitos segundo o reforço	34
Figura 7 –	Orientação fibra e plano de ruptura idealizado para compósitos ..	36
Figura 8 –	Diagrama esquemático dos mecanismos de adesão na interface fibra-matriz: (a) adesão mecânica; (b) adesão eletrostática; (c) adesão química, em que R e X representam grupos químicos compatíveis; (d) adesão química com a aplicação de um agente de acoplamento; (e) adesão por reação ou interdifusão.....	38
Figura 9 –	Estrutura Química da Celulose.....	43
Figura 10 –	Coesão fictícia de um solo reforçado.....	49
Figura 11 –	Preparação do solo: Secagem ao ar.....	52
Figura 12 –	Curvas de distribuição granulométrica do solo com e sem defloculante	53

Figura 13 –	Resíduos fibrosos da casca do coco utilizados na pesquisa	55
Figura 14 –	Composição gravimétrica do resíduo fibroso utilizado na pesquisa	55
Figura 15 –	Preparação das misturas.....	56
Figura 16 –	Corpo de prova compactado de acordo com parâmetros obtidos no ensaio de compactação.....	57
Figura 17 –	Moldagem das amostras e transferência das mesmas para a caixa de cisalhamento direto.....	58
Figura 18 –	Amostras na condição não inundada (a) e na condição inunda (b) para realização do ensaio de cisalhamento direto	59
Figura 19 –	Moldagem dos corpos de prova para realização do ensaio na célula edométrica.....	60
Figura 20 –	Montagem da célula edométrica.....	61
Figura 21 –	Célula edométrica na condição inundada (a) e na condição não inundada (b).....	62
Figura 22 –	Montagem da amostra para realização do ensaio de condutividade hidráulica no equipamento Tri-flex da Soil Test – ELE.....	63
Figura 23 –	Célula montada para realização do ensaio de condutividade hidráulica	64
Figura 24 –	Curvas de compactação do Solo Natural e das misturas Solo-Fibra de Coco.....	70
Figura 25 –	Resultado do ensaio de cisalhamento na condição não inundada. Em a), c) e e) curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para a tensão normal de 50, 100 e 200 kPa, respectivamente; Em b), d) e f) curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal para a tensão normal de 50, 100 e 200 kPa, respectivamente.....	72
Figura 26 –	Resultado do ensaio de cisalhamento na condição inundada. Em a), c) e e) curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para a tensão normal de 50, 100 e 200 kPa,	

	respectivamente; Em b), d) e f) curvas deslocamento vertical versus deslocamento.....	73
Figura 27 –	Envoltórias de resistência do solo natural e das misturas solo-fibra na condição não inundada referente ao deslocamento horizontal relativo de 2 mm em a) e de 4 mm em b).....	76
Figura 28 –	Envoltórias de resistência do solo natural e das misturas solo-fibra na condição inundada referente ao deslocamento horizontal relativo de 2 mm em a) e de 4 mm em b).....	77
Figura 29 –	Curva tensão vertical versus índice de vazios do solo natural e das misturas solo-fibra para a condição não inundada.....	82
Figura 30 –	Curva tensão vertical versus índice de vazios do solo natural e das misturas solo-fibra para a condição inundada.....	83
Figura 31 –	Curvas de retenção de água do solo natural e das misturas solo-fibra.....	89
Figura 32 –	Curvas grau saturação versus condutividade hidráulica não saturadas ajustadas a partir do modelo de van Genuchten (1980) do solo natural e das misturas solo-fibras.....	94
Figura 33 –	Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das blendas com as diferentes porcentagens de fibra de coco: Em a) ampliação de 1000x da mistura com 0,5% de fibras; Em b) aumento de 50x da mistura com 1% de fibras; Em c) aumento de 200x da mistura com 1% de fibras; e em d) aumento de 50x da mistura com 2% de fibras.....	97
Figura 34 –	Imagens do solo argiloso aderido na superfície das fibras ampliadas em 1000x das misturas com 0,5 (imagem à esquerda) e 1% (imagem à direita)	98

Figura 35 –	Análise elementar da interface da mistura com 0,5% pela espectroscopia de energia dispersiva (EDS).....	100
Figura 36 –	Análise elementar da interface da mistura com 1% pela espectroscopia de energia dispersiva (EDS).....	101
Figura 37 –	Análise elementar da interface da mistura com 2% pela espectroscopia de energia dispersiva (EDS).....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Valores típicos de características físicas e propriedades mecânicas de algumas fibras sintética.....	40
Tabela 2 –	Composição química de fibras lignocelulósica.....	44
Tabela 3 –	Algumas propriedades físicas e mecânicas das fibras lignocelulósica.....	44
Tabela 4 –	Propriedades Físicas do Solo.....	54
Tabela 5 –	Composição Química do Solo.....	54
Tabela 6 –	Parâmetros de compactação do Solo Natural e das misturas Solo-Fibra de Coco.....	71
Tabela 7 –	Parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos das envoltórias do solo natural e das misturas Solo-Fibra em condição não inundada e inundada.....	78
Tabela 8 –	Variação dos valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento das diferentes misturas em relação aos parâmetros do solo natural	79
Tabela 9 –	Variação do índice de vazios inicial e final do solo natural e das misturas solo-fibra.....	84
Tabela 10 –	Parâmetros de compressibilidade do solo natural e das misturas solo-fibra na condição não inundada e inundada.....	85
Tabela 11 –	Valores de umidade antes e depois do ensaio de compressibilidade.....	86
Tabela 12 –	Condutividade hidráulica saturada do solo natural e das misturas solo-fibra.....	88
Tabela 13 –	Parâmetros da equação de van Genuchten (1980) e coeficientes de determinação (R^2) obtidos nos ajustes das curvas de retenção de água do solo natural e das misturas	90

Tabela 14 –	Parâmetros obtidos através das curvas de retenção do solo natural e das misturas solo-fibra	92
Tabela 15 –	Grau de saturação, umidade volumétrica, sucção matricial e condutividade hidráulica na condição de umidade ótima de compactação do solo natural e das misturas solo-fibras	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
UFPE.	Universidade Federal de Pernambuco
CL	Argila Inorgânica de Baixa a Média Plasticidade
pH	Potencial Hidrogeniônico
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
Al	Alumínio
K	Potássio
Na	Sódio
P	Fósforo
C.O	Carbono Ogrânico
M.O	Matéria Orgânica
N	Nitrogênio
Relação C/N	Relação carbono/nitrogênio
Fe	Ferro
w_{ot}	Teor de Umidade Ótima de Compactação
γ_{dmax}	Peso específico aparente seco máximo
c	Intercepto de Coesão
ϕ	Ângulo de Atrito
Cc	Índice de Compressão
Cd	Índice de Descompressão
σ'_a	Tensão de Sobre Adensamento
e	Índice de vazios
Δ	Variação
$k_{\text{água}}$	Condutividade Hidráulica Saturada
ψ	Sucção
ψ entrada de ar	Sucção Correspondente ao Ponto de Entrada de Ar
θ residual	Teor de Umidade Volumétrica Residual
R ²	Coefficiente de Determinação

C	Capacidade Sucção ou Capacidade Diferencial de Umidade
θ_{cc}	Teor de Umidade Volumétrica Referente a Capacidade de Campo
WS_{max}	Capacidade de Armazenamento de Água Máxima
$\Psi_{\text{umidade Ótima}}$	Sucção Referente ao Teor de Umidade Ótima
$K_{\text{umidade ótima}}$	Condutividade Hidráulica Referente ao Teor de Umidade ótima

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
1.2	JUSTIFICATIVA	17
1.3	OBJETIVO	22
1.3.1	Geral	22
1.3.2	Específico	23
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	23
2	REVISÃO DE LITERATURA	25
2.1	O COCO VERDE E SEUS RESÍDUOS.....	25
2.2	FIBRA DE COCO: OBTENÇÃO E APLICAÇÕES ATUAIS.....	27
2.3	DESENVOLVIMENTO DE NOVOS MATERIAIS: COMPÓSITOS E INTERFACE MATRIZ-REFORÇO.....	32
2.4	TIPOS DE FIBRAS UTILIZADAS COMO REFORÇO DE MATERIAIS COMPÓSITOS.....	39
2.5	SOLOS ARGILOSOS REFORÇADOS COM FIBRAS	45
2.6	ALGUMAS EXPERIÊNCIAS COM MISTURAS COMPACTADAS DE SOLO COM FIBRAS	48
2.6.1	Influência na compactação.....	48
2.6.2	Influência na resistência ao cisalhamento.....	49
2.6.3	Influência na compressibilidade.....	50
2.6.4	Influência na condutividade hidráulica e na curva característica sucção- umidade	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.1	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	52
3.2	PREPARAÇÃO DAS MISTURAS DO COMPÓSITO.....	56
3.3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	57
3.3.1	Ensaio de compactação.....	57
3.3.2	Ensaio de cisalhamento direto	57
3.3.3	Ensaio compressibilidade	59

3.3.4	Ensaio de condutividade hidráulica	62
3.3.5	Ensaio para determinação da curva de retenção de água e estimativa da condutividade hidráulica não saturada.....	64
3.3.6	Análise da interface solo-fibra	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1	COMPACTAÇÃO	70
4.2	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	71
4.3	COMPRESSIBILIDADE	82
4.4	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA	87
4.5	ANÁLISE DA INTERFACE SOLO-FIBRA.....	96
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
5.1	CONCLUSÕES	103
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	104
	REFERÊNCIAS	106

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O crescimento populacional e econômico das civilizações está diretamente relacionado ao consumo de bens e serviços que por sua vez gera resíduos que devem ser coletados, tratados e dispostos corretamente, evitando assim impactos negativos ao meio ambiente e a saúde pública.

Nesse contexto, a produção do coco verde vem ganhando destaque devido ao grande volume de resíduos produzidos, tendo em vista que para nutrição humana é aproveitado do fruto apenas a água e a polpa localizada em seu interior. No entanto, um dos grandes desafios na atualidade é buscar soluções de valorização dos resíduos, inclusive a casca do coco. A mesma configura-se completamente como resíduos da produção dos derivados do coco, haja visto que a casca do coco possui a maior parte de seu volume e peso.

Embora existam diversas pesquisas sendo desenvolvidas visando obter materiais a partir do aproveitamento da fibra de coco como insumo, conforme mostrado por Silva (2014), ainda é comum encontrar o fruto após consumo sendo depositado em lixões e aterros sanitários, sendo que essa disposição tem reduzido a vida útil dos aterros sanitários.

O desenvolvimento de novos materiais a partir da combinação de dois ou mais elementos de origens distintas em uma unidade organizacional macroscópica formada por duas fases, pode ser denominado de compósitos pela ciência e engenharia de materiais (CALLISTER, 2012). As duas fases de um compósito correspondem, a uma matriz e uma outra fase dispersa na matriz que tem o intuito de reforçar a mesma e por esta razão é denominada de fase reforço. Os compósitos resultam da necessidade de atender demandas por materiais alternativos que possam ter desempenho igual ou superior aos materiais convencionais utilizados em diversos produtos, serviços ou obras.

A prática de utilizar materiais fibrosos para reforçar solos compactados visando aplicações na engenharia geotécnica tem demonstrado eficiência, sobretudo, devido aos seus efeitos no comportamento mecânico dos materiais resultantes (PALACIOS *et al.*, 2015). Os solos argilosos compactados são utilizados em várias finalidades na geotecnia,

por exemplo, na construção de aterros, camadas de base e cobertura de aterros de resíduos sólidos urbanos, barreiras para contenção de contaminantes, dentre outras.

Na engenharia geotécnica, algumas características dos materiais argilosos ao serem compactados são fundamentais para o adequado desempenho de suas aplicações, tais como, a condutividade hidráulica, curva característica sucção-umidade, a compressibilidade, a resistência ao cisalhamento e estrutura do material. No entanto, devido à grande heterogeneidade dos solos, as jazidas de materiais com propriedades consideradas adequadas para as diversas finalidades geotécnicas nem sempre se encontram próximas ao local de sua utilização ou muitas vezes as jazidas não possuem um volume satisfatório para suprir as demandas por material. Isto onera a aquisição de materiais para estas finalidades.

Em razão disso, muitas vezes é necessário realizar um planejamento logístico para aquisição de materiais em áreas distantes do local de sua aplicação ou realizar um melhoramento das propriedades dos materiais locais, visando torna-los adequados para atender as finalidades ao qual serão aplicados.

A fibra de coco possui características favoráveis para aplicação em compósitos, porém sua aplicação em matrizes de solo ainda é pouco investigada. Além das características da fibra, o comportamento de compósitos reforçados com este tipo de material depende também da compatibilidade do mesmo com a matriz de solo. A interface reforço/matriz, a área de contato entre os elementos do compósito, é fundamental, por exemplo, na transmissão das solicitações mecânica da matriz para o reforço (IOZZI *et al.*, 2010). Portanto, a adesão do solo a fibra é fundamental para que ocorra melhoramento do seu desempenho.

Diante desse cenário, torna-se conveniente compreender o potencial de utilização dos resíduos fibrosos da casca do coco como elemento de reforço em matriz de solo argiloso compactado, tendo em vista que o desenvolvimento de compósitos solo-fibras tem demonstrado bons desempenhos.

1.2 JUSTIFICATIVA

Dentre os problemas ambientais que mais atinge a população está o gerenciamento dos resíduos sólidos. O elevado consumo dos produtos derivados do coco tem aumentado a quantidade de resíduos da casca do coco (material de origem da fibra de coco), acarretando em um sério problema ambiental, principalmente, por se tratar de um material

de difícil degradação. O problema torna-se ainda mais agravante nos grandes centros urbanos, onde esse resíduo sólido encontra dificuldades de ser descartado (Figura 1) sendo comumente enviado para “lixões” e aterros sanitários.

A obtenção de fibras a partir das cascas do coco é uma prática de baixo custo e sua inclusão como reforços de solos pode contribuir para a valorização desse resíduo, além de gerar emprego e renda a partir da criação de unidades de beneficiamento da fibra e com isso diminuir o volume do material a ser descartado. Além do mais, essa prática pode contribuir para aumento da vida útil dos aterros sanitários que é um dos grandes desafios atuais que a geotecnia ambiental vem tentando solucionar.

Figura 1 - Poluição a partir da disposição irregular de resíduos do coco verde



Fonte: O autor

A região Nordeste do Brasil é onde se concentra a maior parte da produção e consumo do coco verde devido ao seu extenso litoral (FERREIRA NETO *et al.* 2002), por consequência é onde há uma maior disponibilidade deste resíduo para beneficiamento da fibra de coco. Atrelado a este fato, a região Nordeste do Brasil é uma das regiões do país com piores indicadores de desenvolvimento socioeconômico da população e de tratamento e disposição de resíduos de modo adequado. Silveira e Aragão (2016) afirmam que há viabilidade técnica e econômica para implantação de unidades de processamento de cascas de coco verde nesta região. O reforço de solos com a fibra de coco pode ser um dos meios de versatilizar o uso da fibra de coco e contribuir para o escoamento da produção das unidades de beneficiamento.

Diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos na atualidade com o intuito de obter metodologias para a inclusão das fibras vegetais visando sua aplicação como reforço de solos na engenharia geotécnica. Isso demonstra a relevância do tema para pesquisas atuais e futuras nesta área da engenharia civil. Como exemplo podem ser citados os trabalhos de Vale, Soares e Casagrande (2007) que adicionou fibras de coco na composição de misturas asfálticas usinadas a quente de alto desempenho estrutural e funcional e observou que a mesma tem proporcionado aumento do contato entre os grãos, resultando em um revestimento asfáltico mais resistente e impermeável e Santiago *et al.* (2012) que observou aumento de coesão e ângulo de atrito em uma areia reforçada com diferentes tamanhos de fibra de curauá.

Embora os efeitos de inclusão de fibras em solos já sejam comumente pesquisados no que se refere ao melhoramento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, ao se reforçar um solo, independente do elemento de reforço, em aplicações geotécnicas, além de compreender seus reflexos na resistência ao cisalhamento, é importante compreender quais são os efeitos gerados na compressibilidade e na condutividade hidráulica. No entanto, poucos estudos abordam os efeitos da adição de fibras nestes aspectos e quando ocorre a abordagem é feita de modo isolado entre as propriedades. Isto torna-se ainda mais importante em solos argilosos onde a compressibilidade é mais pronunciada ao longo do tempo e quando os baixos coeficientes de condutividade hidráulica apresentados por estes solos são requisitos fundamentais para utilização destes materiais na geotecnia tais como camadas de base e cobertura de aterros sanitários e barreiras de contaminantes.

Além do mais, misturas compactadas de solo com fibras enquadram-se no contexto geotécnico não saturado, que é outro aspecto não comumente abordado em

experiências anteriores de misturas solo-fibras. Nesse sentido, além dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, compressibilidade e condutividade hidráulica, é imprescindível que se compreenda a influência da inclusão da fibra na curva de retenção de água ou curva característica sucção-umidade.

Os solos argilosos compactados possuem organização estrutural das partículas entre ramo seco ao ramo úmido, esta estrutura influencia no comportamento geotécnico do solo. Como a adesão solo-fibra é um fator fundamental para um desempenho adequado da mistura. Surge um outro aspecto que requer ser investigado que é a adesão microestrutural do solo argiloso a fibra de coco. A compreensão dos mecanismos de interação solo-fibra também é de fundamental análise para o entendimento do comportamento do compósito resultante desta mistura. Diante desse contexto, surgem algumas questões científicas, conforme apresentadas a seguir:

- Como a inclusão da fibra de coco em matrizes de solo argilosos compactados pode interferir nos parâmetros de compactação, resistência ao cisalhamento, compressibilidade e condutividade hidráulica? Como as condições saturadas e não saturadas podem influenciar no comportamento solo-fibra?
- Quais modificações a fibra de coco pode proporcionar na curva de retenção de água de misturas solo-fibras?
- Dispersando o reforço de fibras de coco aleatoriamente em matriz de solo argiloso compactado ocorrerá a interação solo-fibra? Haverá adesão da matriz ao reforço?

As elucidações das respostas para tais questionamentos consistem na motivação, importância e contribuição científica desse estudo para a área de desenvolvimento de novos materiais na engenharia geotécnica.

1.3 OBJETIVO

1.3.1 Geral

Analisar a influência no comportamento geotécnico e a interface matriz-reforço de um solo argiloso compactado mediante a inclusão de diferentes teores de fibras curtas oriundas dos resíduos do coco verde (*Cocos nucifera*) distribuídas aleatoriamente na matriz de solo.

1.3.2 Específicos

1. Avaliar a influência do incremento de diferentes conteúdos de fibras de coco na compactação de misturas com solo argiloso;
2. Analisar o efeito das inclusões de conteúdos variados de fibra de coco na resistência ao cisalhamento e na compressibilidade em misturas com solo argiloso em condições inundadas e não inundadas;
3. Estudar as alterações devido a adição de diferentes teores de fibra de coco na condutividade hidráulica saturada e não saturada, bem como na curva característica de retenção de água (sucção-umidade) em misturas com solo argiloso;
4. Verificar o arranjo microestrutural, a interação solo argiloso-fibras de coco em escala microscópica e a composição química elementar da interface solo-fibra;

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho é organizado em cinco capítulos:

- o primeiro trata da introdução com uma breve contextualização relacionada à temática abordada, seguida da justificativa do estudo, motivação, objetivos e estrutura da dissertação;
- o segundo trata da revisão de literatura que abrange os temas relacionados diretamente com a pesquisa, abordando a cultura do coco verde e os resíduos gerados por esta atividade, a fibra de coco enfocando na obtenção e aplicações atuais da mesma, desenvolvimento de novos materiais destacando os compósitos e a importância da interface matriz-reforço, em seguida tipos de fibras utilizadas como reforço de compósitos e, por fim, o comportamento de solos argilosos reforçados com fibras;
- o terceiro, descreve os materiais utilizadas e as etapas da metodologia realizadas na pesquisa, destacando a preparação das misturas e das amostras de solo-fibra e a execução dos ensaios de compactação, resistência ao cisalhamento, compressibilidade, condutividade hidráulica, curva de retenção de água, análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria de energia dispersiva (EDS) para avaliação elementar da interface solo-fibra;

- o quarto, refere-se aos resultados e discussões das análises e ensaios realizados, destacando a influência da adição de fibras na curva e nos parâmetros de compactação, resistência ao cisalhamento, compressibilidade, no coeficiente de condutividade hidráulica saturado e não saturado e na curva característica sucção-umidade. Além das análises das micrografias via MEV e dos elementos químicos via EDS presentes na interface solo-fibra;
- o quinto, refere-se as conclusões onde são apresentadas as principais considerações referentes aos resultados obtidos e as recomendações para pesquisas futuras sobre o tema abordado.

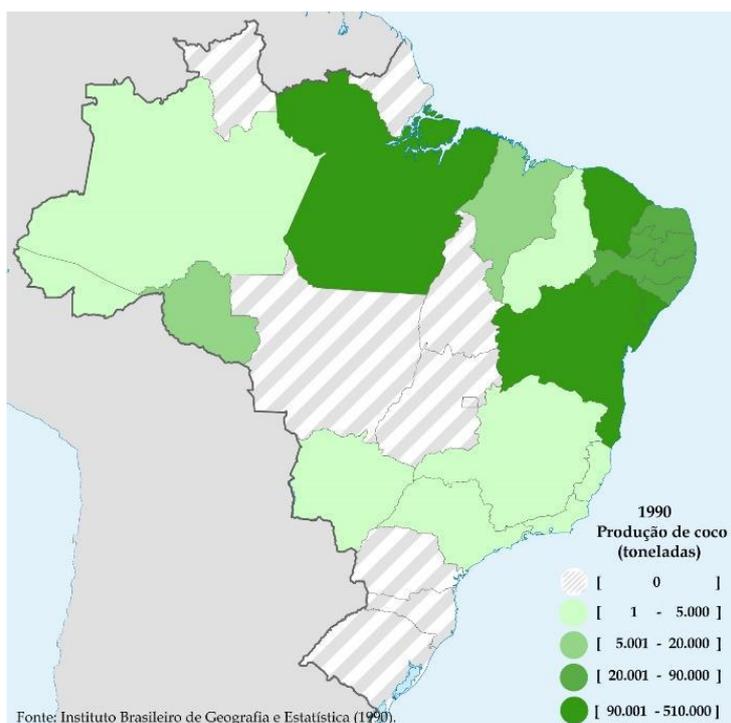
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O COCO VERDE E SEUS RESÍDUOS

O coco verde chegou ao Brasil através da colonização portuguesa, porém o fruto é originário da Índia sendo seu cultivo relatado neste país e em partes da Ásia continental há pelo menos 3000 anos (PINO, 2005). O mesmo é o fruto do coqueiro (*Cocos nucifera L.*), palmeira geralmente de altura de 10 a 20 m presentes na maioria das regiões subtropicais, sendo componente de uma das famílias mais importantes da classe monocotiledôneas (SILVA, 2014).

Para Bolaños (2013) a disseminação do coqueiro ocorreu em meados de 1553, iniciando pelo o que correspondia na época ao estado da Bahia, sendo por isso muitas vezes conhecido por coco-da-baía. A fruteira foi difundida rapidamente pelo litoral nordestino, sobretudo, pelo clima tropical característico destas localidades do Brasil, típico da fruteira, e em seguida adaptou-se em outras regiões do país (SILVA, 2014). Por esta razão, o Brasil configura-se como um dos grandes produtores de coco verde, principalmente devido à região Nordeste do país (Figura 2).

Figura 2 - Distribuição espacial da produção de coco no Brasil, em 1990 e 2010



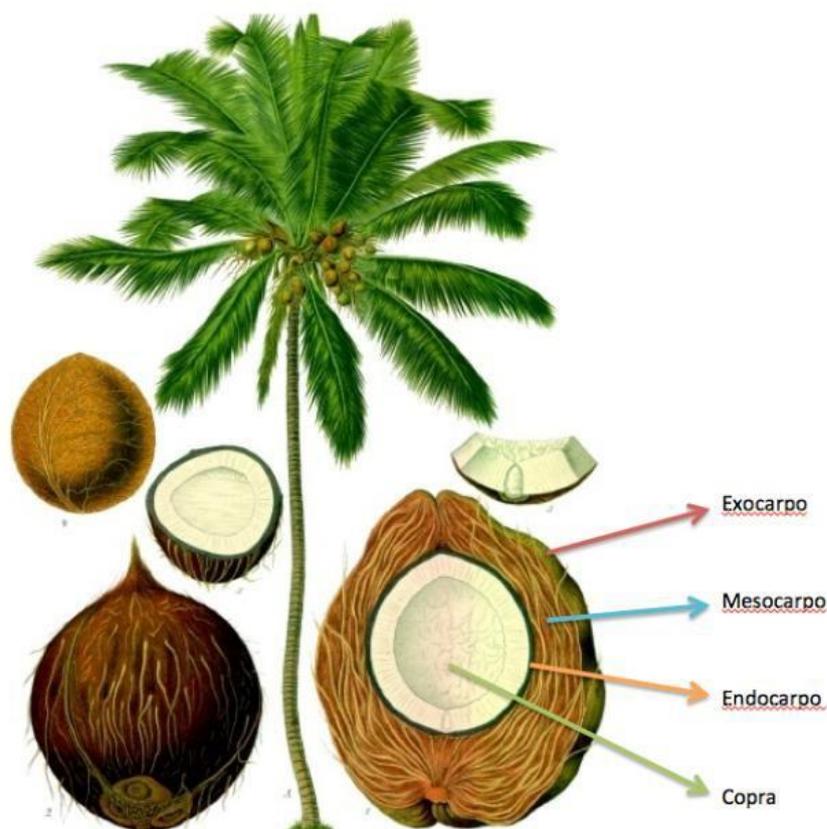
Fonte: Cavalcante (2015)

Aproximadamente 80% das áreas cultivadas com coqueiros no mundo estão situadas na Ásia em países como a Índia, Filipinas, Indonésia, Sri Lanka e Tailândia, os 20% restantes são distribuídos entre a América Latina, África, Caribe, dentre outros (BOLAÑOS, 2013). De acordo com Silveira e Aragão (2016), 92 % do total produzido de coco verde no mundo é oriundo de cinco maiores países produtores, a Indonésia se destaca entre estes cinco tendo em vista sua produção de 18 milhões de toneladas (33%), numa área de aproximadamente três milhões de hectares. A mesma fonte relata que o Brasil ocupa a quarta posição entre os cinco, sendo responsável por 5% da produção mundial, isto é, três milhões de toneladas, em uma área de aproximadamente 257 mil hectares.

A nível nacional, a região Nordeste é responsável por mais da metade da produção e consumo do coco verde, sendo encarregada por cerca de 75% da produção (FERREIRA NETO *et al.* 2002). A maior parte da produção de coco no Brasil é destinada às agroindústrias para obtenção de derivados como o coco ralado, leite de coco, bebidas, óleos, entre outros produtos, com o intuito de suprimir a demanda de fabricação de gêneros alimentícios como doces, biscoitos e chocolates (PINO, 2005). Para Silveira e Aragão (2016) 70% da produção é consumida nesses processos e os demais 30% são comercializados no Nordeste, sendo 20% consumidos na forma de água de coco.

Segundo Bolaños (2013), o coco é uma espécie de drupa (fruto carnoso contendo apenas uma semente ou caroço), só que sem caroço, constituída por uma epiderme lisa ou epicarpo, que envolve o mesocarpo espesso e fibroso, que por sua vez envolve uma camada muita rígida denominada de endocarpo que guarda a copra e a água do coco, conforme esquematizado na Figura 3. Para Silva (2014), o epicarpo da fruta consiste na casca externa esverdeada ou amarelada, dependendo do estágio de amadurecimento, que com o tempo desidrata e sofre escurecimento enzimático ficando com aspecto seco e amarronzado. O mesmo autor relata que o mesocarpo situado sob a casca externa do coco é uma camada de 3 a 5 cm de espessura, constituída por uma fração de fibras curtas e longas e outra fração denominada pó que se encontra agregada às fibras. O endocarpo consiste em uma casca interna do coco de aspecto duríssimo e lenhoso que envolve a amêndoa formada pela corpa (polpa branca) e a água de coco (BOLAÑOS, 2013).

Figura 3 - Partes constituintes do coco



Fonte: Bolaños (2013)

O peso médio do coco é cerca de 1,5 kg, desde 20% correspondem ao conjunto polpa mais água e os 80% restante correspondem a casca (SILVEIRA e ARAGÃO, 2016). Portanto, isto é o mesmo que dizer que 80% do peso bruto do coco representa resíduos após processamento do produto. Todavia, estes resíduos ao serem beneficiados dão origem a um material denominado de fibra de coco, sendo possível observar em diversos setores industriais o uso de fibras longas, curtas e o pó da casca de coco como matéria-prima. No entanto a nível nacional a produção da fibra de coco, embora ainda muito incipiente, vem demonstrando crescimento das usinas de beneficiamento.

2.2 FIBRA DE COCO: OBTENÇÃO E APLICAÇÕES ATUAIS

O processo convencional de beneficiamento dos resíduos da casca do coco para obtenção das fibras consiste em uma série de operações como: dilaceração, moagem, classificação, lavagem e secagem do material (PANNIRSELVAM *et al.*, 2005). De acordo Mattos *et al.* (2014), atualmente a tecnologia utilizada para beneficiar os resíduos

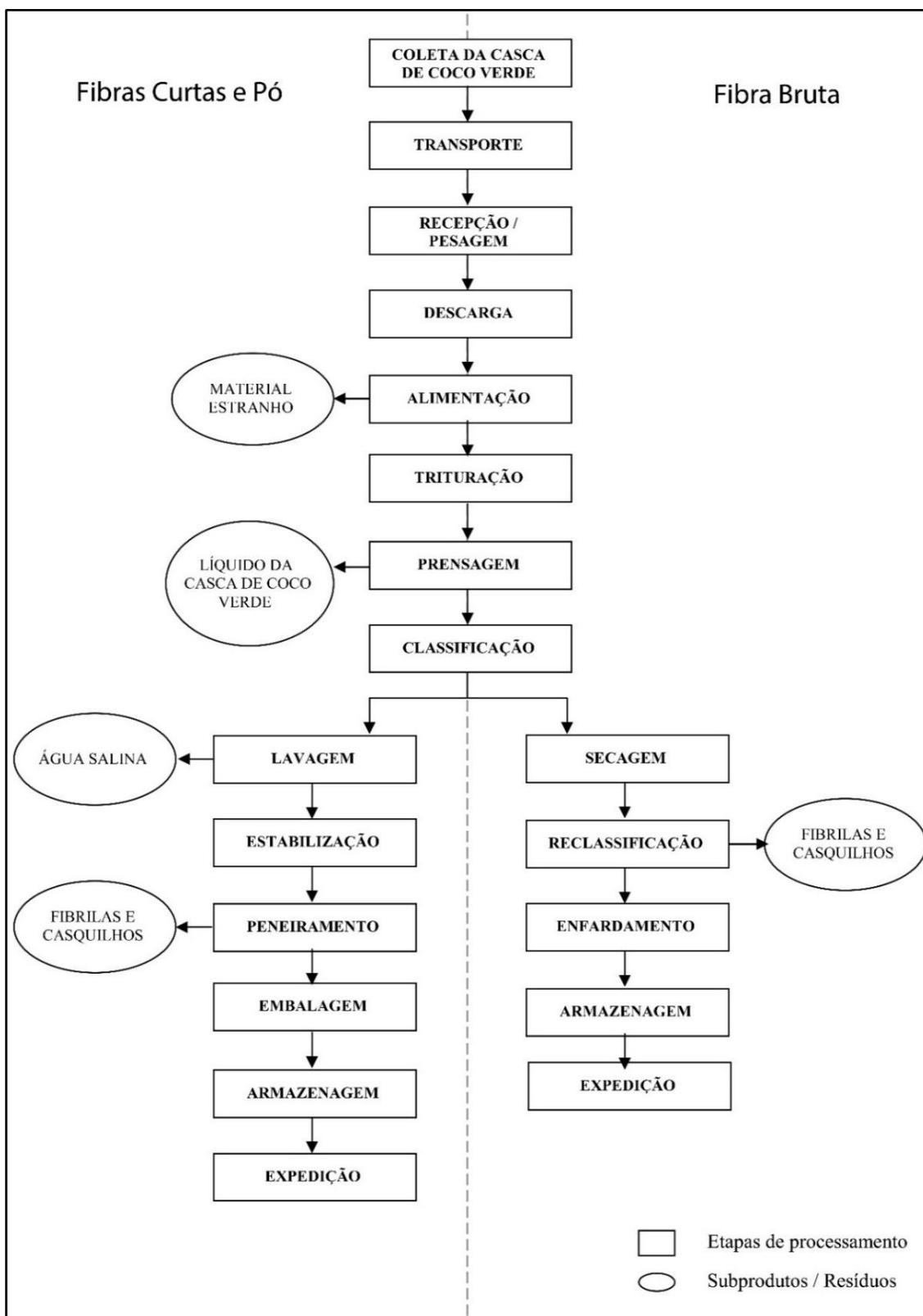
da casca do coco e obter as fibras de coco é realizada utilizando um maquinário que foi desenvolvido pela Embrapa Agroindústria Tropical, situada em Fortaleza-CE, através de uma parceria com uma metalúrgica atuante na região. Segundo a mesma fonte o equipamento completo funciona da seguinte maneira:

- Primeira etapa: o equipamento faz a trituração das cascas inteiras ou cortadas através de um rolo de facas fixas que fazem o esmagamento do mesocarpo;
- Segunda etapa: o material triturado é conduzido para uma prensa rotativa horizontal que visa remover o excesso de umidade do material. Ao final desta etapa é obtido a fibra já desagregada e um efluente denominado de líquido da casca do coco verde (LCCV);
- Terceira etapa: é realizada a classificação do material prensado, as fibras longas são separadas das fibras curtas e do pó em um equipamento selecionador, que utiliza marteletes fixos helicoidais e uma chapa perfurada.

De acordo com Pannirsel *et al.* (2005), as fibras longas (comprimento > 5 cm) representam em média apenas 30% do material classificado e os 70% restantes configuram-se como fibras curtas (comprimento ≤ 5 cm) e pó. Após a classificação, cada fração do material passa por uma sequência diferente de processamento. As fibras longas, por exemplo, seguem para o processo de secagem, depois há uma reclassificação para remoção de possíveis fibrilas e casquilhos oriundos do endocarpo duro do coco e em seguida é realizado o enfardamento (MATTOS *et al.*, 2014). Já as fibras curtas e o pó seguem para tanques d'água salgados, onde o material passa por um processo de fermentação anaeróbia durante meses, em seguida as fibras são lavadas, secas e em seguida o material é moído, peneirado e também reclassificado para remoção de possíveis fibrilas e casquilhos para então ser enfardado (ROSA *et al.*, 2001). Estes procedimentos tem a finalidade de obter um material orgânico com características de composto estabilizado.

Na Figura 4 é apresentado um fluxograma operacional das diversas etapas do beneficiamento da casca do coco verde para obtenção das fibras longas e o pó, bem como seus respectivos subprodutos ou resíduos ao longo do processo de beneficiamento. Já na Figura 5 é apresentado uma sequência de imagens do maquinário desenvolvido pela Embrapa Agroindústria Tropical para as diferentes etapas do beneficiamento da casca do coco.

Figura 4 - Fluxograma operacional das etapas de produção das fibras longas e das fibras curtas e pó



Fonte: Adaptado de Rosa *et al.* (2009)

Figura 5 - Sequência de etapas do maquinário utilizado para beneficiamento da casca do coco. Em “a)” é ilustrada a etapa de descarga; Em “b)” é ilustrada a etapa de alimentação; Em “c)” a máquina trituradora de casca de coco verde; Em “d)” a máquina de prensagem do material triturado para remoção do LCCV e em “e)” é apresentado a etapa de classificação e a descarga das fibras curtas e o pó.



Fonte: Mattos *et al.* (2014)

A fração de fibra longa é o tipo de fibra de coco que, por diferentes processos, é utilizada na composição de inúmeros produtos nas indústrias (SILVA, 2014). Dentre as aplicações das fibras longas da casca do coco, Martins *et al.* (2013) destacam a fabricação de diversos artigos têxteis como vestuário, sacaria, colchões, almofadas e alcochoados para produção de automoveis, escovas e pincéis, cordas, tapetes e passadeiras, cortiças isolantes, dentre outros.

Por outro lado, a fração de fibra curta e o pó são o tipo de fibra de coco que não possuem tantas aplicações como as fibras longas, sendo comumente utilizada como

substrato agrícola ou são carbonizadas e as cinzas são retornadas para o coqueiral (ROSA *et al.*, 2001). Esta fração da casca do coco por vezes também é utilizada para produção de solados de sapatos e artigos de pescaria, no entanto, os materiais sintéticos ainda são os mais utilizados para tais finalidades. Além do substrato, os produtos obtidos a partir do beneficiamento da fibra de coco também são utilizados no setor de paisagismo e jardinagem para fabricação de vasos, placas e palitos.

As fibras de coco tem se mostrado um material de grande valia para os diversos ramos da engenharia no desenvolvimento de materiais e utilização das características físicas e químicas das fibras para realizar diversas operações. Os trabalhos de Pannirsel *et al.* (2005) e Silva (2014) destacam o potencial que os componentes fibrosos do mesocarpo do coco apresentam para aproveitamento como fonte energética, a partir da queima do mesmo para obtenção de carvão, carvão ativado e carvão desodorizante (absorvente de odores). Já Pino (2005) relata o caráter sorvente que as biomassas oriundas da fração curta e pó da casca do coco possuem para remoção de metais pesados de efluentes.

De modo geral, Silva e Jerônimo (2012) descrevem que as fibras vegetais (como a fibra de coco, que é da classe de fibras duras e tem como componentes principais a celulose e a lignina) podem conferir aos materiais utilizados na engenharia civil propriedades interessantes tais como: boa rigidez, resistência ao impacto e isolamento térmico e acústico. Os autores relatam ainda que a fibra de coco possui características que possibilitam a obtenção de um material com isolamento acústico e térmico quase que perfeito, tendo em vista que a fibra de coco reduz significativamente os níveis sonoros de origem aérea e impacto.

Na engenharia civil, sobretudo, na construção civil, a fibra de coco vem sendo utilizada na composição de materiais de construção como reforço de matrizes cimentícias para produção de argamassas e concreto (SILVA, MARQUES e FORNARI JÚNIOR, 2012), pois tornam o material mais leve e reduz as sollicitações estruturais devido ao peso próprio dos materiais. As fibras de coco também vem sendo utilizadas na composição de tijolos adobe (material vernacular constituído de solo e fibras vegetais misturados com água, moldados e secos ao ar livre sem queima) e solo-cimento, pois a inclusão dos resíduos da casca do coco tem proporcionado características físicas e ambientais melhores em relação aos tijolos sem a presença das fibras. No entanto, Silva e Jerônimo (2012) citam que a inclusão dos resíduos a massa para fabricação de tijolos geram aumentos nos custos de produção.

Na engenharia de solos, as fibras de coco são empregadas no desenvolvimento de materiais visando a proteção, controle da erosão e recuperação de áreas degradadas. Através de técnicas de bioengenharia, as fibras de coco são utilizadas para tecelagem de mantas e telas que apresentam excelente desempenho como cobertura de superfícies susceptíveis à erosão oriunda da ação de chuvas e ventos, em taludes de rodovias e ferrovias, áreas reflorestadas e parques urbanos e em áreas situadas em declives acentuados ou de ressecamento rápido (HOLANDA, ROCHA e OLIVEIRA, 2008).

O uso de biotêxtil produzido 100% com resíduos da casca do coco foi utilizado por Gomes (2005) como mecanismo para recuperação ambiental de áreas localizadas as margens do rio São Francisco. A autora descreve que as mantas e telas utilizadas desempenharam papel fundamental no processo de recuperação de áreas degradadas, pois o material apresentou decomposição muito lenta, favorecendo maior proteção ao solo, redução da evapotranspiração e por consequência maior retenção de água no solo. Isto contribuiu para o desenvolvimento da atividade microbiana do solo e resultou em um melhor desenvolvimento da vegetação.

Em áreas sujeitas a movimentos de massa, Holanda, Rocha e Oliveira (2008) destacam a existência de uma técnica de bioengenharia que consiste em redes orgânicas fabricadas com resíduos da casca do coco, onde nas mesmas são realizados plantio de espécie vegetal de interesse para estabilização da massa de solo. Nesse sentido, são incorporadas nas fibras de coco sementes de gramíneas ou capim, que germinarão a medida que as redes orgânicas sejam instaladas no solo e regadas regularmente.

Embora hajam muitas aplicações para as fibras de coco, nota-se que as fibras curtas e o pó ainda são pouco explorados. Desenvolver materiais que utilizem as fibras de coco com variados tamanhos desde fibras longas até o pó, conjuntamente, pode reduzir as etapas do beneficiamento e assim otimizar a sua produção, além de obter maiores possibilidades de aplicações para as fibras curtas e o pó e proporcionar maior viabilidade para produção das fibras de coco.

2.3 DESENVOLVIMENTO DE NOVOS MATERIAIS: COMPÓSITOS E INTERFACE MATRIZ-REFORÇO

Os materiais utilizados no cotidiano destacaram as variadas Eras e marcaram o desenvolvimento das civilizações no passado, por exemplo, a idade da Pedra, a Era dos metais (do Ferro, do Bronze, do Ouro...). No século atual, as demandas por materiais que

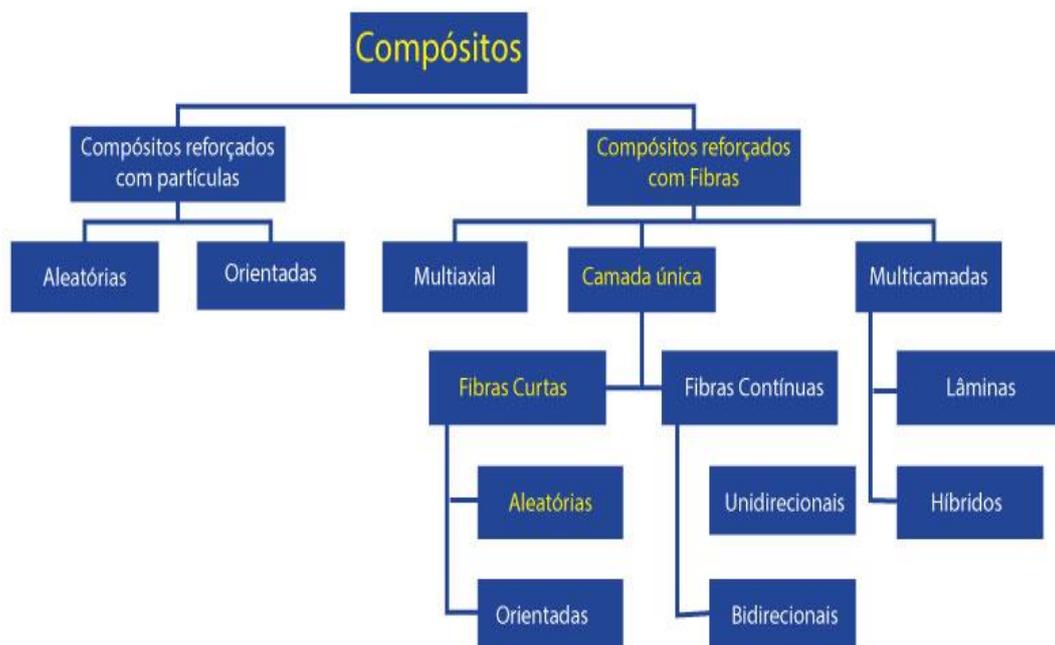
agreguem valores economicos, ambientais e sociais impulsionaram o surgimento dos materiais compósito. Por esta razão, Ventura (2009) destaca a atualidade como a Era dos Compósitos.

Na ciência e engenharia de materiais, os compósitos são determinados em linhas gerais como um material formado por dois ou mais elementos distintos, distribuídos uniformemente de modo macroscópico. O desenvolvimento dos compósitos consiste na combinação de duas fases (matriz e reforço) que formam um material com desempenho igual ou superior aos seus elementos constituintes em condições isoladas, principalmente em relação as propriedades mecânicas. Um exemplo de material compósito é o concreto, material muito utilizado na engenharia civil devido seu excelente desempenho mecânico para construção de estruturas de obras civis. O mesmo consiste em um material constituído por em uma matriz cimentícia, reforçada randomicamente com partículas minerais de variados tamanhos e formas, tais como, areias e britas (SILVA, MARQUES e FORNARI JÚNIOR, 2012).

Nesse contexto de combinação de fases para obtenção de novos materiais com características otimizadas, a fase matricial de um compósito pode ser constituída basicamente por três classes de materiais conhecidos que são os polímeros, as cerâmicas e os metais. Os solos, por exemplo, são considerados matrizes de origem cerâmica. A matriz tem como objetivo proteger e manter os elementos de reforços agregados e organizadas no conjunto. Em termos de desempenho mecânico, é função da matriz absorver as solicitações aplicadas ao compósito e posteriormente transmitir e distribuir para o reforço provocando um compartilhamento da resistência do compósito entre as fases constituintes. Além disso, a fase matricial de um compósito é responsável pela absorção de água do material e à resistência a intemperes químicos como a corrosão e físicos como os desgastes via abrasão e impactos (CALLISTER, 2012).

A fase reforço de um compósito pode ser constituída por materiais na forma de fibras ou partículas, cuja origem pode ser sintética ou natural e de formas, tamanhos e orientações variados. Na Figura 6 é apresentado um fluxograma elaborado por Nossa (2011) com base em Levy Neto e Pardini (2006) que esquematiza a classificação dos compósitos em relação a fase reforço.

Figura 6 - Classificação de materiais compósitos segundo o reforço



Fonte: Nossa (2011)

Para Ventura (2009), existem três categorias gerais que classificam a existência da fase reforço que são: compósitos particulados, compósitos de fibras descontínuas (*whiskers*) e compósitos de fibras contínuas. No caso de compósitos reforçados com fibras, além da classificação em fibras contínuas (longas) ou descontínuas (curtas), os compósitos podem ser classificados também quanto a distribuição das fibras na matriz. Em compósitos com fibras curtas a distribuição pode ser de forma aleatória ou orientada e em compósitos com fibras contínuas a distribuição pode ser orientada de modo unidirecional ou bidirecional formando tecidos (CALLISTER, 2012).

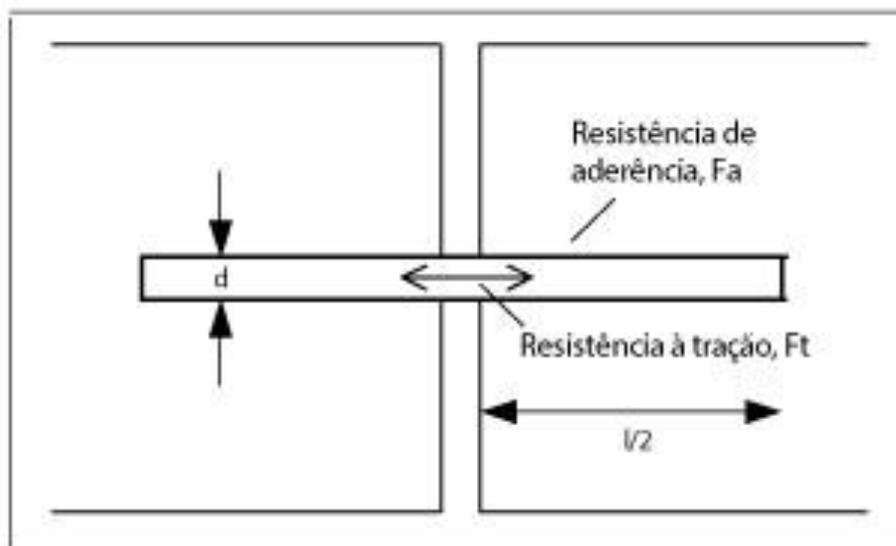
Os compósitos são comumente usados por apresentarem propriedades as quais não podem ser alcançadas por outros materiais atuando isoladamente. Nesse sentido, o reforço tem a função de proporcionar ao compósito força e rigidez, além de aumentar a resistência a corrosão e reduzir ou aumentar a condutividade de fluídos dependendo do tipo e forma de material utilizado no reforço e da interação do mesmo com a matriz (IOZZI *et al.*, 2010). Portanto, ao idealizar a forma da fase reforço (partículas ou fibras) de um compósito deve ser levado em consideração que os elementos utilizados podem otimizar todas ou apenas uma característica em relação aos requisitos solicitados para um novo material. Além da forma do material utilizado como reforço, as propriedades resultantes de um compósito estão condicionadas as propriedades particulares dos

materiais constituintes, das proporções de cada fase, da geometria e do tamanho, distribuição e orientação do reforço (CALLISTER, 2012).

No que se refere a forma do reforço, a utilização de fibras em matrizes de origem cerâmica como as cimentícias e em solos, por exemplo, pode colaborar com dois efeitos fundamentais para o melhoramento das propriedades do compósito (BOLAÑOS, 2013). O primeiro efeito está relacionado com a capacidade das mesmas em proporcionar reforço ao compósito sobre todas as formas de solicitações mecânicas que resultem em tensões de tração, ou seja, tração indireta, cisalhamento e flexão. Vale ressaltar que isoladamente estes tipos de matrizes apresentam melhor desempenho mecânico para esforços de compressão e baixo desempenho para esforços de tração direta (MATTHEWS e RAWLINGS, 2000; LEVY NETO e PARDINI, 2006; CALLISTER, 2012). O segundo efeito está relacionado com a melhoria da ductilidade e tenacidade da matriz, que no caso de matrizes cerâmicas são propriedades consideradas frágeis (LEVY NETO e PARDINI, 2006; CALLISTER, 2012).

Quanto ao modo de orientação, tamanho e distribuição das fibras na matriz, as mesmas podem influenciar no que diz respeito a transferência efetiva de carregamentos da matriz para o reforço. A orientação da fibra em relação ao plano de ruptura, pode implicar na possibilidade que a mesma tem de colaborar com a transmissão de carregamento. Nesse sentido, uma fibra que esteja posicionada paralela ao plano de ruptura não irá contribuir na resistência mecânica do compósito, no entanto uma fibra que esteja posicionada perpendicular ao plano pode contribuir completamente na capacidade de resistir a tração (LEVY NETO e PARDINI, 2006; VENTURA, 2009; CALLIESTER, 2012; BOLAÑOS, 2013). Na Figura 7 é apresentado um modelo idealizado para o equacionamento do equilíbrio de forças no momento em que a fibra é solicitada no compósito.

Figura 7 - Orientação fibra e plano de ruptura idealizado para compósitos



$$\frac{\pi d^2}{4} \cdot F_t = \pi \cdot d \cdot \frac{l}{2} \cdot F_a$$

$$\frac{l}{d} = \frac{F_t}{2F_a}$$

Fonte: Festugato (2011)

Outro fator de influência significativa nas propriedades dos compósitos é a interface entre suas fases constituintes, isto é, a região onde ocorre o contato entre a matriz e os elementos de reforço. Para Nossa (2011) e Iozzi *et al.* (2010), por vezes existem casos que a interface se comporta como uma terceira fase resultante de uma reação entre a matriz e o reforço, já em outros casos a região interfacial é considerada como uma área planar constituída por poucos átomos no contato entre a matriz-reforço, ocorrendo alterações nas propriedades das fases constituintes do compósito.

As propriedades mecânicas de um compósito, por exemplo, são umas das mais afetadas pela interface matriz-reforço, pois é nessa região de contato entre as fases que acontece a transmissão das solicitações mecânicas da matriz para o reforço. Desse modo, a interação entre esses componentes está diretamente relacionada à resistência mecânica e ao comportamento de ruptura do compósito. Pra Levy Neto e Pardini (2006), outras

propriedades como a rigidez, degradação ambiental e a fadiga do material também são significativamente influenciadas pela interface matriz-reforço. Quando há uma adesão inadequada entre as fases constituintes ocorre comprometimento do desempenho do compósito, podendo originar falhas, tais como, caminhos preferenciais para escoamento de fluídos, aumento de porosidade do material, redução de resistência e a intemperes, dentre outras (LEVY NETO e PARDINI, 2006; VENTURA, 2009; IOZZI *et al.*, 2010; CALLISTER, 2012).

Algumas características das fases podem contribuir para que se tenha uma boa interação entre o reforço e a matriz. Para Ventura (2009) o reforço deve ser mais forte e rígido que a matriz e a boa interação entre as fases pode ser obtida através da formação de uma interface que possa aliar a rigidez do reforço com a ductilidade da matriz. Nessa perspectiva, torna-se fundamental que a ductilidade da matriz seja pequena ou até nula para que ocorra um desempenho satisfatório do compósito (CALLISTER, 2012). Para Levy Neto e Pardini (2006) a rugosidade da superfície da fase dispersa pode contribuir para uma melhor adesão da matriz aos elementos de reforço.

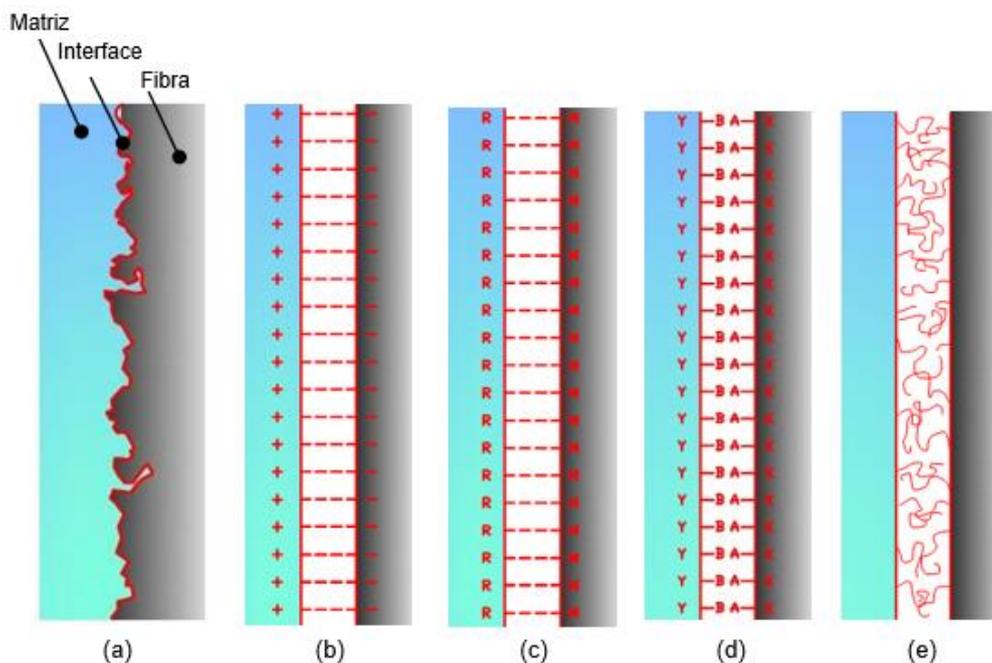
O termo adesão é comumente utilizado na ciência e engenharia de materiais para refere-se à atração entre as fases que formam um compósito. De acordo com Matthews e Rawlings (2000), a afinidade entre os elementos constituintes da matriz e do reforço pode proporcionar a ocorrência de ligações oriundas de forças atrativas entre átomos e/ou superfícies. Os autores relatam ainda que a origem da adesão entre a matriz e o reforço depende de aspectos como, a presença de grupos funcionais na superfície, difusividade entre os elementos, arranjo geométrico e a morfologia do reforço.

Existem diversos mecanismos de adesão fibra-matriz em materiais compósitos como: reação ou interdifusão dos materiais, formação de ligações químicas, atração eletrostática ou encaixe mecânico da matriz em rugosidades presentes na superfície da fibra (MATTHEWS e RAWLINGS, 2000; LEVY NETO e PARDINI, 2006; NOSSA, 2011; CALLISTER, 2012).

Na adesão por reação ou interdifusão a ligação entre as superfícies das fases ocorre por meio da difusão de átomos ou moléculas dos dois constituintes do material compósito. Este tipo de mecanismo acontece quando há condições favoráveis de adesividade e contato entre as superfícies, sendo mais comum em matriz de origem polimérica (IOZZI *et al.*, 2010). As interfaces envolvendo esse tipo de adesão são representadas como um emaranhado de moléculas conforme ilustrado na Figura 8e (NOSSA, 2011).

Figura 8 - Diagrama esquemático dos mecanismos de adesão na interface fibra-matriz:

(a) adesão mecânica; (b) adesão eletrostática; (c) adesão química, em que R e X representam grupos químicos compatíveis; (d) adesão química com a aplicação de um agente de acoplamento; (e) adesão por reação ou interdifusão.



Fonte: Nossa (2011)

Quando ocorre adesão química há a formação de ligações entre um grupamento químico na superfície da fibra e um grupo químico compatível na matriz, conforme exemplo ilustrado na Figura 8c. O tipo e número de ligações químicas por unidade de área são os principais fatores que influenciam na resistência deste tipo de adesão (MATTHEWS e RAWLINGS, 2000; LEVY NETO e PARDINI, 2006; NOSSA 2011). Por vezes, segundo Nossa (2011), ao combinar algumas matrizes e fibras para que haja formações de ligações químicas é necessário a utilização de aditivos que são agentes de acoplamento formados por compostos químicos responsáveis por intermediar a reação necessária para que ocorra a adesão da matriz a fibra (Figura 8d).

Na adesão por atração eletrostática ocorre pela diferença de carregamento eletrostático entre as fases componentes do compósito, ou seja, uma das superfícies é carregada positivamente e a outra superfície é carregada negativamente gerando assim uma atração eletrostática entre as fases constituintes do compósito (Figura 8b). A resistência do compósito será função da densidade de cargas nas superfícies e da distância

entre as fases constituintes, pois interações eletrostáticas são de curto alcance, sendo efetivas apenas para distâncias pequenas, em escala microscópica (MATTHEWS e RAWLINGS, 2000). Portanto, torna-se fundamental que não haja contaminações nas superfícies das fases, tendo em vista que este aspecto pode ser determinante na efetivação desse tipo de adesão (NOSSA, 2011).

Por fim, porém não menos importante, a adesão mecânica acontece por ancoramento mecânico na interface, conforme ilustrado na Figura 8a. Neste mecanismo de adesão a resistência está relacionada com a quantidade de reentrâncias situadas na superfície da fibra, na configuração de microporosidade (MATTHEWS e RAWLINGS, 2000; LEVY NETO e PARDINI, 2006). Na maioria dos casos dos compósitos a ocorrência de interação mecânica não é o único fenômeno atuante na interface do material ela pode acontecer de modo conjunto com os demais mecanismos de adesão (LEVY NETO e PARDINI, 2006; IOZZI *et al.* 2010; CALLISTER, 2012). Para Nossa (2011) se a matriz apresentar caráter de contração durante o processo de cura existe um favorecimento a este tipo de adesão. A mesma fonte relata ainda que esse mecanismo de adesão favorece a resistência ao cisalhamento do compósito, quando o carregamento aplicado no material ocorre de forma paralela a interface, por outro lado, quando acontecem forças tensionais que agem perpendicular a interface é provável que a resistência do material seja baixa, salvo os casos em que existam muitas reentrâncias com ângulos.

2.4 TIPOS DE FIBRAS UTILIZADAS COMO REFORÇO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Na atualidade existe uma gama de fibras que são utilizadas como reforço de materiais compósitos. As mesmas podem ser de origem sintética ou natural e são comumente utilizadas como reforço por proporcionarem propriedades mecânicas elevadas, além de reduzir o peso próprio do compósito. As propriedades físicas, químicas e mecânicas das fibras são características que refletem no desempenho do compósito no qual elas são empregadas (BOLAÑOS, 2013). As características de cada fibra dependem de sua origem, do material que as constituem e do modo como elas são obtidas. As fibras consideradas adequadas para utilização como reforço de compósitos devem ser flexíveis, macroscopicamente homogêneas e possuir relação elevado (≥ 40) entre o comprimento e a seção transversal (CALLISTER, 2012). Segundo Levy e Pardini (2006) as fibras que

constituem um meio efetivo de reforço, possuem menor quantidade de defeitos (falhas estruturais da fibra durante o processamento, material com processo de degradação avançado, etc) comparando-se a sua forma mássica, isto é, à medida que se tornam mais finas a tendência de apresentar defeitos, que possam induzir às falhas e comprometer o desempenho mecânico, é menor. Desta forma os autores relatam que a resistência da fibra tende a se aproximar da resistência teórica do material.

Os materiais fibrosos possuem elevada resistência a tração e módulo de elasticidade alto, sendo este último um dos principais critérios para a seleção adequada da fibra visando reforço de compósitos. De modo geral, ao se comparar as fibras naturais e sintéticas, nota-se que as fibras sintéticas apresentam módulo de elasticidade superior as fibras naturais. Por outro lado, assim como o módulo de elasticidade, a densidade das fibras sintéticas são superiores as fibras naturais, e este fator também é um critério de grande importância para a seleção adequada de fibras para aplicação em reforço (LEVY NETO e PARDINI, 2006, CALLISTER, 2012).

As fibras sintéticas são obtidas a partir do processamento de diferentes materiais e podem ser classificadas como poliméricas, metálicas e minerais. Já as fibras naturais podem ser oriundas de partes de vegetais, frutas e sementes obtidas através de processos mecânicos de desfiamento ou de origem animal e humana como, por exemplo a lã, pêlos e fios de cabelos.

Na Tabela 1 são apresentados os valores típicos de diâmetro, densidade, módulo de elasticidade e resistência a tração para as principais fibras sintéticas descrito Figueiredo (2011). Nota-se que dentre os materiais sintéticos a fibra de carbono é o material que apresenta melhor relação entre a densidade e o módulo de elasticidade.

Tabela 1 - Valores típicos de características físicas e propriedades mecânicas de algumas fibras sintéticas

Fibra	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm ³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à Tração (GPa)	Deformação na Ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	190-210	0,5-2	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,6	70-80	2-4	2-3,5
Polipropileno	20-200	0,9	1-7,7	0,5-0,75	8,0
Kevlar	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4
Carbono	9	1,9	230	2,6	1,0
Nylon	-	1,1	4,0	0,9	13-15
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polietileno	-	0,95	0,3	0,7 x 10 ⁻³	10

Fonte: Adaptada de Figueiredo (2011)

Por se tratar de um material sintético as fibras poliméricas possuem menores efeitos a biodegradação e são menos susceptíveis a intempéries químicas, sendo estas características importantes para o desempenho adequado de um compósito. Isto ocorre devido à estrutura química dos polímeros constituintes deste tipo de fibra. Dentre as fibras poliméricas, as mais utilizadas como reforço de compósitos são as fibras de polipropileno, de poliéster, de polietileno e de poliamida (BOLAÑOS, 2013). As propriedades físicas, químicas e mecânicas de cada fibra varia de acordo com o tipo de polímero constituinte. Por exemplo, segundo Resende (2003), as fibras de polipropileno apresentam baixo módulo de elasticidade, grande deformação, custos relativamente baixos e resistência ao ataque químico e a álcalis. O autor destaca ainda que a fibra de polipropileno possui sensibilidade à luz solar e reduzida aderência à matriz. Bolaños (2013) relata que com excessão do polietileno de alta densidade (PEAD), as fibras de polietileno também possuem baixo módulo de elasticidade e aderência limitada a matriz, sobretudo matriz cerâmica, como solos e cimentos. Para Castro, Tiba e Pandolfelli (2011) as fibras de polipropileno apresentam resistência a tração em torno de 550 MPa, possuem grande flexibilidade e tenacidade devido os seus elementos constituintes e baixo módulo de elasticidade cerca de 3,4 GPa, menor que qualquer outra fibra. Por outro lado, as fibras de poliéster apresentam alta densidade, módulo de elasticidade e resistência elevada, porém as fibras de poliamida, também conhecida como kevlar, são as fibras que podem apresentar os maiores módulos de elasticidade e resistência dentre as fibras poliméricas, devido ao alto grau de orientação das moléculas do polímero constituinte durante o processo de fiação (CALLISTER, 2012).

As fibras metálicas mais utilizadas como reforço de materiais compósitos são as fibras de aço. Estas fibras são empregadas devido seu desempenho mecânico elevado tendo vista que a sua resistência a tração e módulo de elasticidade correspondem a cerca de 1100 MPa e 200 GPa, respectivamente (RESENDE, 2003). Por este motivo, a ruptura de compósitos reforçados com fibras de aço ocorre geralmente não por ruptura da fibra, mas por arrancamento da mesma (PERET e PANDOLFELLI, 2005). Embora as fibras de aço apresentem características mecânicas satisfatórias para aplicação em reforço de compósitos, alguns aspectos deste material são considerados desvantagens para tal finalidade como o custo elevado, a alta densidade e a ocorrência de problemas associados a corrosão, a depender do meio em que o compósito seja inserido (MIGLIORINI, GUIMARÃES e OZÓRIO, 2012). As fibras de aço são geralmente empregadas em

comprimentos que variam de 0,1 a 7,62 cm, diâmetro entre 0,13 e 0,9 mm e fator de forma (relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra) na faixa de 30 a 50 (BOLAÑOS, 2013).

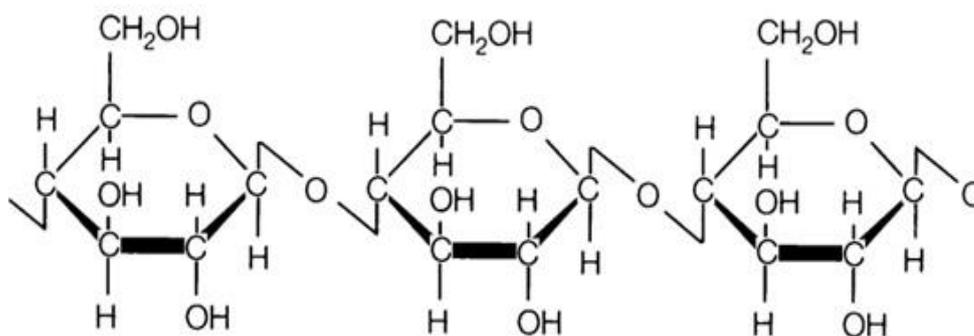
Dentre as fibras minerais mais utilizadas no reforço de compósito destacam-se as fibras de carbono e vidro por se tratarem de materiais de alta resistência e densidade intermediária. De acordo com Figueiredo (2011), as fibras de carbono, por exemplo, possuem alta relação entre a resistência e o peso próprio, sendo cerca de 2,6 GPa a sua resistência a tração, 230 GPa o módulo de elasticidade e 1,9 g/cm³ a densidade. Tais características proporcionam um satisfatório desempenho mecânico do compósito e são indispensáveis para que haja aderência entre a matriz e as fibras. Estas características estão relacionadas com a leveza atômica do átomo de carbono e as resistências das ligações entre este elemento químico. Algumas propriedades das fibras de carbono também são destacadas por Bolaños (2013) como a elevada rigidez, estabilidade dimensional, resistência química e à corrosão elevada, dentre outras características que também são importantes para um compósito. Já as fibras de vidro possuem elevada resistência mecânica e estabilidade dimensional, além disto são resistentes a ataques químicos e a corrosão, apresentam desempenho ao ataque da maioria dos ácidos.

No que se refere as fibras naturais, as que mais são empregadas como reforço em compósitos são as fibras de origem vegetal, tais como: coco, sisal, curauá, cana-de-açúcar, abacaxi, jutá, dentre outras (LEVY NETO e PARDINI, 2006). As mesmas são significativamente mais baratas do que as fibras sintéticas e essa é uma das razões que as tornam interessante para aplicação em compósitos.

As fibras vegetais são constituídas, basicamente, por cadeias de celulose mantidas aglomeradas por um composto denominado de lignina. Estes elementos constitucionais são responsáveis pela estabilidade e resistência das fibras vegetais. Há relatos de que o módulo de elasticidade e a resistência a tração sejam diretamente proporcional ao teor de celulose e lignina contido nas fibras (PINO, 2005; CORRADINI *et al.*, 2009; BOLAÑOS, 2013).

As cadeias de celulose são quimicamente polissacarídeos formados de carbono, oxigênio e hidrogênio, de acordo com a fórmula química (C₆H₁₀O₅)_n (CORRADINI *et al.*, 2009). A molécula C₆H₁₀O₅ corresponde na verdade a glicose e, portanto, a celulose consiste em uma cadeia de várias moléculas de glicose interligadas por um átomo de oxigênio, conforme exemplificado na Figura 9.

Figura 9 - Estrutura Química da Celulose



Fonte: Bolaños (2013)

Já a lignina trata-se, na verdade, de um polímero de estrutura molecular complexa, amorfo, com constituintes alifáticos e aromáticos (PINO, 2005). A mesma se comporta como uma cera colante que tem a função de manter as cadeias celulósicas aglutinadas constituindo uma parede celular. Devido a este comportamento a lignina proporciona resistência à compressão ao tecido das fibras, enrijecendo a parede celular e protegendo o material contra danos físicos e químicos. Portanto, o teor de lignina está diretamente relacionado com a flexibilidade e resistência a biodegradação das fibras (CORRADINI *et al.*, 2009).

Dentre as fibras vegetais, a fibra de coco é uma das que apresenta teores de lignina mais elevado. Todavia, a composição química das fibras sofre influência de vários fatores, tais como: condições climáticas, região de cultivo, tipo de solo, origem vegetal, dentre outros.

Na Tabela 2 são apresentados os valores típicos da composição química de algumas fibras naturais. Como as propriedades mecânicas das fibras vegetais são diretamente proporcionais ao teor de celulose, nota-se que as fibras como as de bananeira, juta, curauá, abacaxi e sisal possuem altos percentuais de celulose e por consequência maiores propriedades mecânicas (Tabela 3), sendo indicada, por este critério, para utilização como elementos de reforço em compósitos.

Por outro lado, as fibras de piaçava e coco apresentam alto teor de lignina, o que lhes confere um melhor desempenho das ligações internas se aplicadas em compósitos, a matriz adere melhor a estas fibras devido a maior flexibilidade do reforço (LEOCÁDIO, 2005). Embora as fibras das cascas de coco tenham um percentual intermediário de celulose, seu teor elevado de lignina auxilia no desempenho mecânico da fibra e a torna mais resistente ao ataque de microrganismos. Para Silva (2014), estes teores de lignina e

celulose presente na fibra de coco proporcionam baixo grau de degradação natural devido à alta relação carbono/ nitrogênio.

Tabela 2 - Composição química de fibras lignocelulósicas

Origem	Fibra	α -celulose (%)	Hemi-celulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Extrativos (%)
Caule ou folha	Bagaço de Cana	54,3 - 55,2	16,8 - 29,7	25,3 - 24,3	1,1	0,7 - 3,5
	Bambu	33 - 45	30	20 - 25	-	-
	Bananeira	60 - 65	6 - 8	5 - 10	1,2	-
	Jutá	60	22,1	15,9	1	-
	Piaçava	31,6	-	48,4	-	-
	Palha de arroz	51 - 70	-	12 - 16	15 - 20	9 - 14
Folha	Curauá	70,7 - 73,6	21,1	7,5 - 11,1	0,79 - 0,9	2,5 - 2,8
	Abacaxi	80	-	12	0,1 - 1	4
	Sisal	60 - 67	10 - 15	8 - 12	0,14 - 0,87	1,7 - 6
Fruta ou Semente	Coco	43,4 - 53	14,7	38,3 - 40,77	-	3,5
	Algodão	62	20	11,2	0,4	3,1

Fonte: Adaptado de Satyanarayana, Guimarães e Wypych (2007)

Tabela 3 - Algumas propriedades físicas e mecânicas das fibras lignocelulósicas

Origem	Fibra	Diametro (μm)	Densidade (g/cm^3)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à Tração (GPa)	Deformação na Ruptura (%)
Caule ou folha	Bagaço de Cana	-	0,45 - 0,49	27,1	0,22	1,1
	Banana	150	1,5	27 - 32	0,71 - 0,79	2,5 - 3,7
	Jutá	20 - 30	1,45	10 - 30	0,4 - 0,8	1,5 - 1,8
	Piaçava	-	-	1,07 - 4,59	0,13 - 0,14	6,4 - 21,9
Folha	Curauá	97	0,92	30 - 80	1,25 - 3	4,5 - 6
	Abacaxi	1,56 - 4,5	1,44	25 - 36	0,36 - 0,75	2 - 2,8
	Sisal	100 - 300	1,26 - 1,33	17 - 22	0,53 - 0,63	3,64 - 5,12
Fruta ou Semente	Coco	100 - 450	1,25 - 1,5	6	0,22	23,9 - 51,4
	Algodão	25 - 60	0,82	12	0,4	-

Fonte: Adaptado de Satyanarayana, Guimarães e Wypych (2007)

Para Levy Neto e Pardini (2006) as principais vantagens das fibras vegetais em relação as fibras sintéticas para reforço de compósitos são: baixa massa específica, maciez e abrasividade reduzida, baixo custo, reciclabilidade, atoxidade e biodegradabilidade, geração de emprego e renda através de usinas de beneficiamento em comunidades rurais e o baixo consumo de energia para sua produção. Já como desvantagens os autores relatam: acentuada variabilidade nas suas propriedades mecânicas, sensibilidade a efeitos

ambientais, presença de seções transversais de geometria complexa e não uniforme e propriedades mecânicas modestas quando comparadas às fibras sintéticas, sobretudo as fibras minerais como a de carbono e de vidro.

2.5 SOLOS ARGILOSOS REFORÇADOS COM FIBRAS

A necessidade de melhorar as características existentes de um solo visando aumento de resistência dos materiais para utilização na construção de estruturas e na melhoria de terrenos onde as construções são assentadas é uma demanda bastante antiga. A técnica de reforçar solos a partir da adição de materiais resistentes à tração foi, e ainda é, uma das mais utilizadas na história dos sistemas construtivos.

Na atualidade, o conceito de solo reforçado foi consolidado na engenharia geotécnica a partir do desenvolvimento da técnica de terra armada para construção de estruturas de contenção de maciço de solos, no final da década de 60 e início da década de 70. Esta técnica foi desenvolvida pelo arquiteto francês Henry Vidal que consistiu em reforçar o solo introduzindo tiras metálicas ligadas a painéis de concreto que ficavam situados na face do maciço (BOLAÑOS, 2013).

A partir deste conceito, diversas misturas constituídas por matrizes de solo e fibras sintéticas ou naturais (elemento resistente a tração) foram estudadas, sendo que o desempenho destas misturas tem sido bastante satisfatório para aplicações de engenharia geotécnica. Inicialmente, os estudos destes compósitos enfocavam nos efeitos do desempenho geotécnico do material a partir da inclusão de fibras de forma discreta (pequenas quantidades e tamanhos da fibra) e orientada, semelhante ao conceito de terra armada (GRAY e AL-REFEAI, 1986). No entanto, ao longo do tempo, o método de matrizes de solo com a adição de reforços com fibras de modo discreto e randômico passou a ser mais estudado devido a melhor eficiência dessa metodologia em solos cimentados e não cimentados (GRAY e OHASHI, 1983; FATANI, BAUER e AL-JOULANI, 1991; CONSOLI, PRIETTO e ULBRICH, 1998; MAHER e HO, 1994; CASAGRANDE e CONSOLI, 2002; CASAGRANDE, COOP e CONSOLI, 2006; PALACIOS *et al.*, 2015).

A metodologia de solos reforçados com fibras, geralmente esta associada a solos que são utilizados comumente para compactação visando a construção de obras geotécnicas. A compactação de um material, por si só, é realizada com intuito de conferir maior homogeneidade ao material, aumentar a resistência ao cisalhamento e reduzir os

vazios do material, que conseqüentemente, reduz a compressibilidade e a condutividade hidráulica. Neste mesmo sentido, o melhoramento ou reforço de solos é entendido como a utilização de processos físicos e/ou químicos que proporcionem melhorias nas propriedades dos solos, sobretudo, no comportamento mecânico. Para Casagrande e Consoli, (2002) procura-se obter no solo tratado aumentos na resistência ao cisalhamento e diminuição da compressibilidade e condutividade hidráulica. Para Casagrande, Coop e Consoli (2006), melhoria de solos é um termo relacionado ao solo tratado via processos químicos (por exemplo a adição de cimento, cal, cinzas, etc.). Ainda de acordo com os mesmos autores o reforço é o termo relacionado ao tratamento do solo com adição de materiais sintéticos ou naturais, geralmente fibras e geotêxteis, visando aplicação em aterros, taludes artificiais, camadas compactadas como base e coberturas de aterros sanitários, barreiras de contaminantes e infraestrutura de pavimentos.

Os solos reforçados na geotecnia são estudados para atender diversas finalidades como: obtenção de materiais com melhores propriedades geotécnicas, valorização de resíduos como elementos de reforço, aumento da vida útil das jazidas de aquisição de materiais, contribuição para redução de impactos ambientais negativos, dentre outros.

Para Leocádio (2005) no desenvolvimento de materiais geotécnicos constituídos por solos reforçados são investigados fatores como:

- tipo de reforço (fibra ou partículas);
- proporção ótima entre as quantidades de reforço e matriz (percentual ou volume);
- dimensão dos elementos de reforço (tamanho ou diâmetro das fibras e partículas);
- distribuição do reforço no solo (aleatório, unidirecional ou bidirecional);
- tipo de matriz (solo fino ou granular, cimentado ou não cimentado, ou outras adições químicas);
- por fim, e de grande importante, a interface solo-reforço.

No que se refere ao reforço de solos com fibras, Bolaños (2013) apresenta uma listagem de conclusões baseado em estudos de vários pesquisadores sobre a influência dos principais parâmetros como teor de reforço, orientação, distribuição, comprimento, módulo de elasticidade, resistência e mecanismos de adesão no comportamento de solos reforçados com fibras. No entanto, o autor ressalta que deve ser levado em consideração a natureza das diferentes fibras e matrizes empregadas nos diversos trabalhos, conforme mostrado a seguir:

- Teor de fibra: De modo geral, à medida que o teor de fibra aumenta são obtidos maiores ganhos de resistências mecânica, até um certo ponto onde este ganho deixa de ser observado. Isto é, há um certo teor ótimo de fibra que confere melhores propriedades mecânica ao compósito (GRAY e OHASHI, 1983; FATANI, BAUER e AL- JOULANI, 1991; MAHER e HO, 1994; CASAGRANDE *et al.*, 2002; CASAGRANDE, COOP e CONSOLI, 2006; CONSOLI, COOP e CASAGRANDE, 2007; SANTIAGO *et al.* 2012; BOLAÑOS, 2013; PALACIOS *et al.*, 2015).
- Orientação das fibras: o reforço deve ser posicionado no sentido das deformações de tração do solo (CONSOLI, MORAES e FESTUGATO, 2011; CONSOLI, ROCHA e SILVANI, 2014; FESTUGATO *et al.*, 2017); Vale ressaltar que a compactação de misturas de solos com fibras proporciona uma orientação preferencial quase que horizontal das fibras (DIABRAM *et al.*, 2007).
- Distribuição das fibras: a distribuição randômica tende a proporcionar o desenvolvimento isotrópico da resistência, evitando a geração de planos de fragilidade em potencial (CASAGRANDE *et al.*, 2002; CASAGRANDE, COOP e CONSOLI, 2006; PALACIOS *et al.*, 2015);
- Módulo de elasticidade da fibra: Quanto maior o módulo de elasticidade da fibra maior a contribuição para o aumento da resistência mecânica da mistura (GRAY e OHASHI, 1983); Por outro lado, o módulo de elasticidade da fibra é diretamente proporcional a probabilidade de existir arrancamento das fibras (SHEWBRIDGE e SITAR, 1990; FESTUGATO, 2011).
- Interface solo-fibra: as características de resistência, deformação e o comportamento de ruptura dos solos reforçados com fibras é uma função da força de adesão da matriz a superfície das fibras. A força de adesão da matriz ao reforço é o que mobiliza a resistência a tração da fibra após transmissão do carregamento da matriz para o reforço. A compatibilidade entre a matriz e a fibra pode favorecer adesão eletrostática e o processo de compactação favorece a adesão do tipo mecânica (DONATO *et al.*, 2004; TANG *et al.*, 2007; TANG *et al.*, 2010; ANAGNOSTOPOULOS, TZETZIS e BERKETIS, 2013).
- Comprimento da fibra: o comprimento da fibra é diretamente proporcional ao ganho de resistência mecânica, até um certo limite onde ocorre queda do

desempenho com o aumento do comprimento (GRAY e OHASHI, 1993; PRABAKAR e SRIDHAR, 2002; SANTIAGO *et al.*, 2012; BOLAÑOS, 2013).

- Resistência da fibra: a resistência da fibra é diretamente proporcional ao desempenho mecânico da mistura solo-fibra, além disto quanto maior a resistência da fibra, maior é a ductilidade da mistura solo-fibra, assumindo que não ocorra o rompimento das ligações de aderência (HEJAZI *et al.*, 2012).

No que se refere ao tipo de matriz, isto é, solos granulares ou finos. De acordo com Donato *et al.* (2004), o melhoramento do desempenho mecânico de solos reforçados com fibras é significativo em materiais argilosos, pois há maior probabilidade de adesão matriz-reforço devido ao tamanho das partículas de argila que proporcionam maior quantidade de pontos de contato entre a fibra e as partículas do solo.

2.6 ALGUMAS EXPERIÊNCIAS COM MISTURAS COMPACTADAS DE SOLO COM FIBRAS

A seguir será apresentado algumas experiências realizadas com misturas compactadas de solos argilosos reforçados com diferentes fibras, destacando as conclusões de alguns autores em relação as alterações que ocorrem no comportamento mecânico e nas demais propriedades geotécnicas de misturas solo-fibras como, por exemplo, na compactação, na resistência ao cisalhamento, na compressibilidade, na condutividade hidráulica, etc.

2.6.1 Influência na compactação

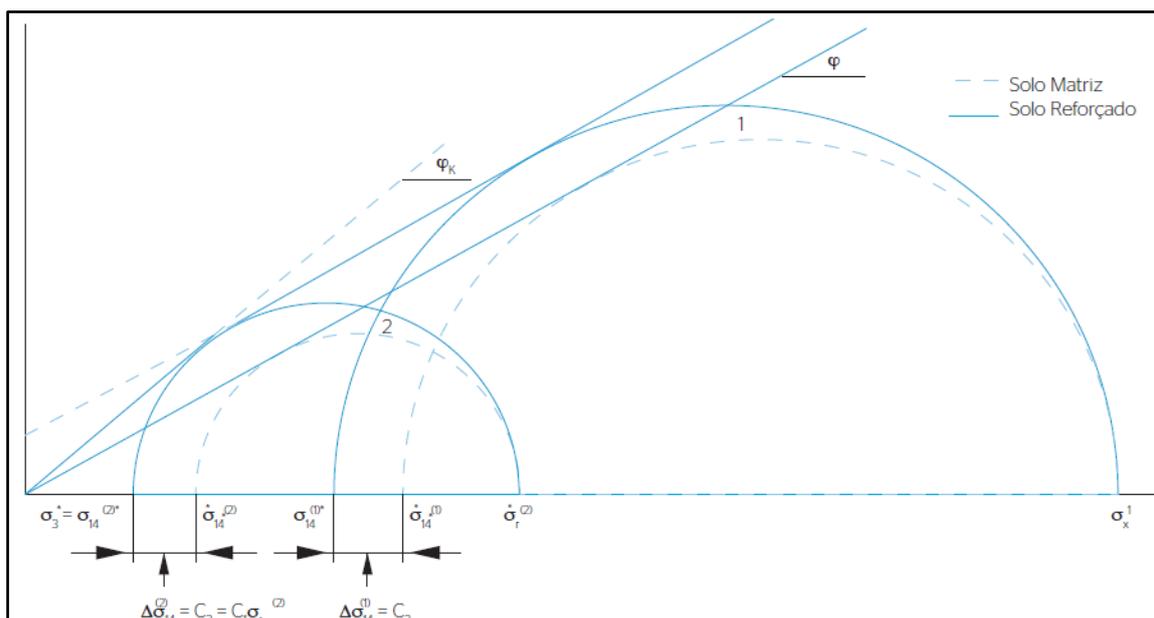
De modo geral, a adição de fibras em solos argilosos tende a aumentar o teor de umidade ótima e reduzir a densidade seca máxima. Este comportamento nos parâmetros de compactação foi verificado por Prabakar e Sridhar (2002) que avaliaram os efeitos da inclusão de fibras de sisal de até 25 mm de comprimento em teores de até 1% em uma matriz de solo argiloso. Mohamed (2013) avaliando adições de até 1,5% de fibras de feno em uma matriz de solo argiloso também verificou este mesmo comportamento. Al Wahab e Al-Qurna (1995) avaliando uma argila reforçada com fibras de diversos materiais também observaram aumentos de umidade ótima e redução da densidade seca considerados insignificantes pelos autores para até 2% de fibra.

2.6.2 Influência na resistência ao cisalhamento

O reforço de solos compactados utilizando fibras melhora o comportamento mecânico dos materiais resultantes. Diversos autores relatam que a inclusão da fibra em matrizes de solos, sobretudo os de granulometria fina, tem proporcionado aumento na resistência de pico e redução da queda pós-pico, além de conferir maior ductilidade e tenacidade (CONSOLI *et al.*, 2007; MALIAKAL e THIYYAKKANDI, 2013; MOHAMED, 2013). Alguns autores relatam que o acréscimo de resistência ocorre de forma linear em relação ao aumento do teor de fibras (GRAY e OHASHI, 1983). Todavia, outros autores relatam que este aumento de resistência ocorre de forma não linear (SHEWBRIDGE e SITAR, 1989).

Para diversos autores os solos ou materiais como resíduos sólidos urbanos compactados reforçados com fibras apresentam bilinearidade na envoltória de resistência, tendo em vista que as rupturas das fibras são interpretadas como pontos de descontinuidade no ponto de tensão de tração máxima, gerando uma coesão fictícia conforme ilustrado na Figura 10 (KÖLSCH, 1995, CORREA, JUCÁ e MOTTA, 2015). Na Figura 10 é apresentado um esquema da influência de mobilização da resistência de tração da fibra na envoltória de resistência ao cisalhamento de solos reforçados.

Figura 10 - Coesão fictícia de um solo reforçado



Fonte: CORREA, JUCÁ e MOTTA, (2015)

Quanto aos parâmetros de resistência ao cisalhamento, diversos autores relatam aumentos no ângulo de atrito e no intercepto de coesão devido ao aumento da quantidade de fibras, até uma certa quantidade onde começa a haver diminuição nos valores dos parâmetros (GRAY e OHASHI, 1983; CAI *et al.*, 2006; CONSOLI *et al.*, 2007; MALIAKAL e THIYYAKKANDI, 2013). Santiago *et al.* (2012) relatam que dentre os parâmetros de resistência ao cisalhamento a adição de fibras ao solo apresenta pouca influência no ângulo de atrito, porém o valor de intercepto de coesão é significativamente influenciado. Prabakar e Sridhar (2002) observaram aumentos nos valores de intercepto de coesão para até 0,75% de fibras de sisal adicionadas a um solo argiloso, já o valor de ângulo de atrito praticamente não apresentou alteração. Tang *et al.* (2007) relatou um aumento de 27,5 kPa no intercepto de coesão e de 2,2° no ângulo de atrito para o solo argiloso reforçado com 0,25% de fibras de polipropileno. Para Anagnostopoulos, Tzetzis e Berketis (2013) utilizando fibras de polipropileno como reforço de uma matriz de solo argiloso observaram acréscimos de até 11,5 kPa no intercepto de coesão e 7° no ângulo de atrito para o reforço da matriz com teor de 0,9% de fibras.

2.6.3 Influência na compressibilidade

Segundo Shewbridge e Sitar (1989), de modo geral, a adição de fibras proporciona aumento da compressibilidade de solos argilosos. Morandini e Schneider (2017), avaliando a influência de fibras de polipropileno em uma matriz a base de solo laterítico e argila bentonita, observaram que a adição de fibras aumento a inclinação da reta de compressão por acréscimo de tensão. No que se refere aos parâmetros de compressibilidade, Shewbridge e Sitar (1989) relatam que os mesmos crescem com o aumento do teor de fibras, sendo este crescimento de forma não linear. Nataraj *et al.*, (1996) relatam comportamento semelhante de crescimento não linear dos parâmetros de compressibilidade mediante acréscimos na quantidade de fibras. Morandini e Schneider (2017) relatam aumentos de 10% no índice de compressão em relação a matriz sem adição de fibras.

2.6.4 Influência na condutividade hidráulica e na curva característica sucção-umidade

Diversos autores relatam que a adição de fibras tanto em solos argilosos quanto solos arenosos também proporciona aumento da condutividade hidráulica (MAHER e HO, 1994; AL WAHAB e EL-KEDRAH, 1995; MILLER e RIFAI, 2004). Maher e Ho (1994) avaliando uma argila caulinita reforçada com fibras de polipropileno e vidro relataram aumentos na condutividade hidráulica para teores de fibras a partir de 1%. Al Wahab e El-Kedrah (1995) avaliando um solo argiloso reforçado com fibras de polipropileno relataram aumentos em mais de duas ordens de grandezas na condutividade hidráulica para o teor de 2% de fibras. Já Miller e Rifai (2004) analisando a inclusão de fibras de polipropileno em uma matriz de solo argiloso, não observaram alterações significativas na condutividade hidráulica para o teor de até 1%. No entanto, a partir de 1% de fibras os autores verificaram aumentos de até uma ordem de grandeza para a mistura com 1,5% de fibras e de quatro ordens de grandeza para a mistura com 2% de fibras.

Quanto a curva de retenção de água existe poucos trabalhos que analisaram o comportamento da sucção *versus* a umidade em misturas de solo-fibras. No entanto, de acordo com Rosário *et al.* (2011), as fibras vegetais apresentam energia superficial predominantemente polar o que as tornam materiais de elevada capacidade de retenção de água, sendo por esta razão utilizadas como substratos agrícolas. Nesse sentido, Sales (2011) avaliando um solo argiloso reforçado com até 0,5% de fibras naturais verificou que quanto maior o teor de fibra adicionados ao solo, maiores foram os valores de sucção observados na secagem do material.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizado um solo, com predominância da fração argila, de uma jazida proveniente da Formação Barreiras situada na Região Metropolitana do Recife estado de Pernambuco, Brasil. A jazida localiza-se mais precisamente nas proximidades do aterro de resíduos sólidos urbanos da Muribeca em Jaboatão dos Guararapes. Esta jazida foi explorada para obtenção do material constituinte da camada de cobertura do referido aterro. O solo foi coletado a partir de amostras deformadas do horizonte B da jazida.

Em laboratório, o solo foi preparado a partir da secagem ao ar (Figura 11) e posteriormente foi destorroado.

Figura 11 - Preparação do solo: Secagem ao ar

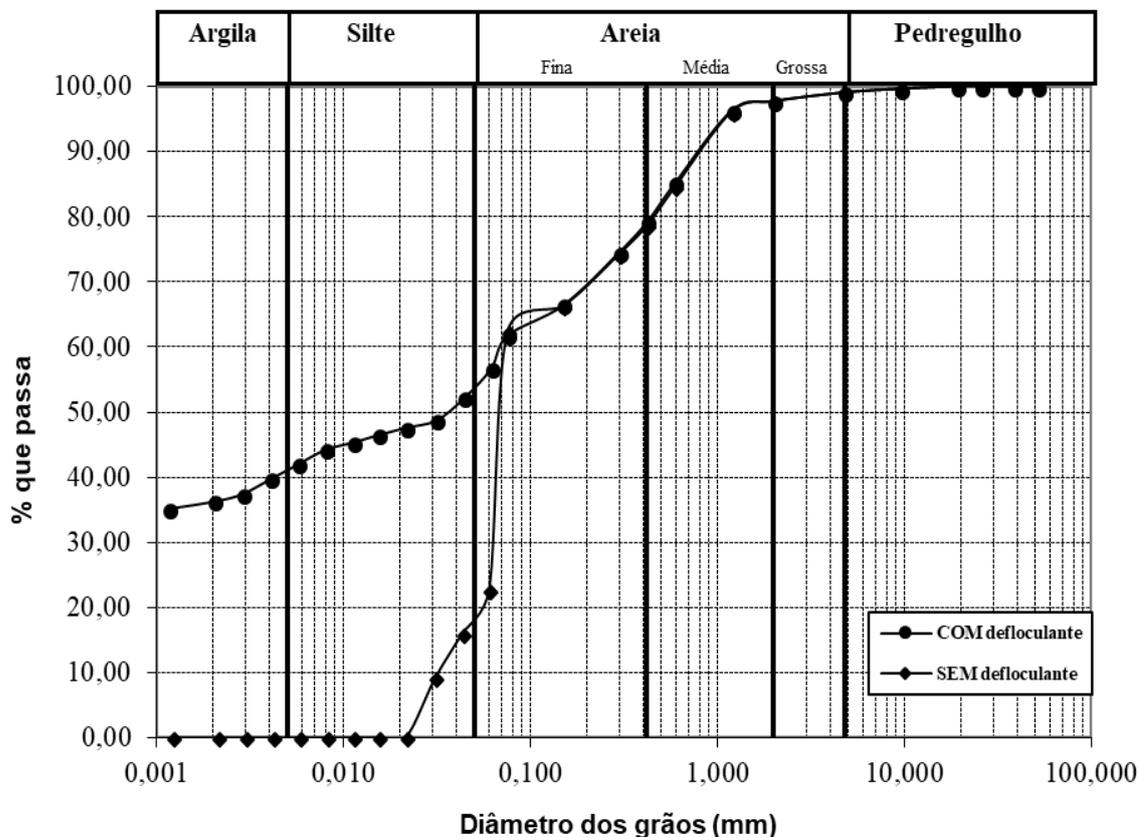


Fonte: O autor

Em seguida foi realizada a caracterização geotécnica que permitiu observar que o material possui textura fina e plasticidade média (LL= 49,34% e IP= 17,92%), com aproximadamente 62% das partículas passando na peneira 200 (<0,074 mm), densidade real dos grãos de 2,621 g/cm³ e atividade equivalente a 0,45, sendo considerado como uma argila inativa. Pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) o material foi classificado como CL, isto é, como uma argila inorgânica de baixa a média plasticidade.

As propriedades físicas do solo são listadas na Tabela 4 e na Figura 12 é apresentado a curva de distribuição granulométrica do material com e sem defloculante. Já na Tabela 5 é apresentado a composição química do solo. As análises químicas foram realizadas no departamento de química fundamental da Universidade Federal de Pernambuco.

Figura 12 - Curvas de distribuição granulométrica do solo com e sem defloculante



Fonte: O autor

Tabela 4 – Propriedades Físicas do Solo

Propriedades do Solo	Valor
Massa Específica dos Grãos (g/cm ³)	2,618
Limite de Liquidez (%)	49,34
Limite de Plasticidade (%)	31,42
Índice de Plasticidade (%)	17,92
Classificação SUCS	CL
Pedregulho (%)	1
Areia (%)	37
Silte (%)	22
Argila (%)	40
Índice de atividade	0,45

Fonte: O autor

Tabela 5 - Composição Química do Solo

Componente	Valor
pH	5,7
Ca (cmol _c /dm ³)	0,7
Mg (cmol _c /dm ³)	0,4
Al (cmol _c /dm ³)	0,9
K (cmol _c /dm ³)	0,2
Na (cmol _c /dm ³)	0,5
P (mg/dm ³)	1
C.O. (g/kg)	2,62
M.O. (g/kg)	4,09
N (g/kg)	0,2
Relação C/N	13,1
Fe (mg/kg)	41,98

Fonte: O autor

As fibras de coco obtidas a partir dos resíduos da casca do fruto foram adquiridas já beneficiadas de um grupo produtivo situado no estado do Ceará que recebe apoio e orientação da Embrapa Agroindústria Tropical de Fortaleza – CE. Na Figura 13 é apresentada uma imagem da fibra utilizada no desenvolvimento da pesquisa. Para caracterização dos resíduos fibrosos da casca do coco foi realizada a caracterização da composição gravimétrica. Utilizou-se três amostras selecionadas de forma aleatória de um fardo de fibra de aproximadamente 450 g. Cada amostra selecionada do fardo possuía peso de 15 g, totalizando 45 g caracterizada. Com auxílio de um escalímetro, as fibras foram classificadas em diferentes tamanhos da seguinte forma: pó, $1 \leq L < 5$ cm, $5 \leq L < 10$ cm e $L \geq 10$ cm, sendo L equivalente ao comprimento da fibra. Após a classificação foi utilizada uma balança com precisão de 0,0001 g para pesar cada fração e em seguida

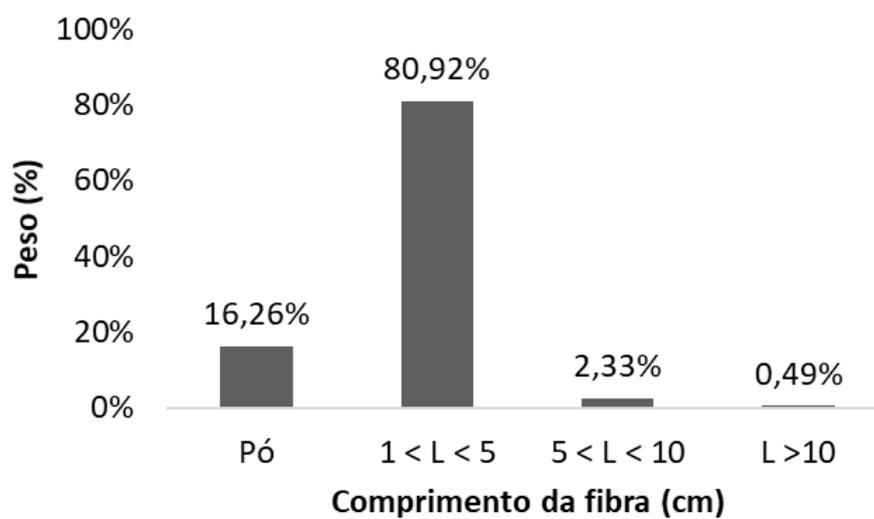
calculou-se o percentual de cada classe, sendo que aproximadamente 97% do material correspondeu as frações pó mais fibras de tamanhos entre 1 e 5 cm (Figura 14).

Figura 13 - Resíduos fibrosos da casca do coco utilizados na pesquisa



Fonte: O autor

Figura 14 - Composição gravimétrica do resíduo fibroso utilizado na pesquisa



Fonte: O autor

3.2 PREPARAÇÃO DAS MISTURAS DO COMPÓSITO

Foram estudadas misturas com teores de 0, 0,5, 1 e 2% de fibra de coco em relação ao peso seco de solo. Os teores foram selecionados visando avaliar o efeito de percentuais dobrados de massa de fibra nas misturas. Além disto, estes teores foram definidos baseado em experiências de diversos trabalhos em relação ao reforço de solos com fibras (PRABAKAR e SRIDHAR, 2002; MOHAMED, 2013; BOLAÑOS, 2013).

As misturas foram realizadas em uma bandeja metálica, sendo as fibras adicionadas randomicamente ao solo em pequenas parcelas (Figura 15). Em seguida as misturas foram revolvidas utilizando uma espátula com o intuito de homogeneizar o material. Estes processos foram repetidos até que todo o conteúdo de fibra fosse incorporado à matriz.

Em seguida, foram moldados corpos de prova cilíndricos com área de 78,54 cm² e altura de 12,7 cm. Todos os corpos de prova foram moldados a partir da compactação em suas respectivas densidades secas e teores de umidade ótima, correspondente aos valores obtidos no ensaio Proctor Normal (Figura 16).

Figura 15 - Preparação das misturas



Fonte: O autor

Figura 16 - Corpo de prova compactado de acordo com parâmetros obtidos no ensaio de compactação



Fonte: O autor

3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.3.1 Ensaio de compactação

Para análise dos parâmetros de compactação do solo natural e das misturas foram utilizados um total de 3,0 kg de massa para cada teor ensaiado. O ensaio de compactação foi realizado utilizando como energia de compactação Proctor normal, conforme metodologia descrita na norma NBR 7182 (ABNT, 1988), adotando-se o reuso do material. O ensaio teve o intuito de determinar a influência do incremento de fibra de coco na curva e nos parâmetros de compactação, umidade ótima (w_{ot}) e peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}), em comparação ao solo natural.

3.3.2 Ensaio de cisalhamento direto

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento para os diferentes teores de fibras analisados foram obtidos através do ensaio de cisalhamento direto, conforme descrito na norma ASTM D3080 (ASTM, 2004). O ensaio teve o intuito de determinar a influência da adição de fibra de coco nas curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal, deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal e nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, intercepto de coesão (c) e no ângulo de atrito (ϕ), em relação ao solo natural. Na Figura 17 são apresentadas imagens ilustrando estes procedimentos.

Figura 17 - Moldagem das amostras e transferência das mesmas para a caixa de cisalhamento direto



Fonte: O autor

O equipamento utilizado para o cisalhamento das amostras consistiu em uma prensa de cisalhamento direto com sistema de aplicação de tensão normal constituído de pesos em pendural. As leituras dos deslocamentos verticais e horizontais foram realizadas utilizando extensômetros com sensibilidade de 0,01 mm e a força horizontal foi lida através de um anel dinamométrico de constante de $0,16 \text{ kgf div}^{-1}$ e capacidade de 500 kgf.

Os ensaios foram conduzidos em condições não inundadas (Figura 18a) e inundadas (Figura 18b). Este procedimento teve o intuito de avaliar o comportamento da resistência ao cisalhamento das misturas não só no teor de umidade ótima, mas também em relação a condição mais elevada do teor de umidade das mesmas (simulando, por exemplo, a infiltração de águas pluviais). Na condição não inundada as etapas de confecção dos corpos de provas, moldagens e cisalhamento direto das amostras foram realizadas ambas no mesmo dia, tendo em vista que com o passar do tempo as amostras perdem umidade para o meio. Na condição inundada, as amostras ao serem inseridas no equipamento de cisalhamento direto foi adicionado água de modo a preencher completamente o suporte da caixa de cisalhamento e somente após 24 horas foram cisalhadas.

Figura 18 - Amostras na condição não inundada (a) e na condição inundada (b) para realização do ensaio de cisalhamento direto



Fonte: O autor

Em ambas as condições foram aplicadas tensões normais de 50, 100 e 200 kPa. As mesmas foram mantidas até a estabilização dos deslocamentos verticais. Com o intuito de padronizar os ensaios a compressão foi mantida até ser verificado uma leitura constante do valor de deslocamento vertical. O cisalhamento dos corpos de prova para cada tensão normal aplicada foi realizado com velocidade constante de 0,483 mm/min. Os deslocamentos máximos adotados nos ensaios foram de 10 mm. Devido a curva tensão-deslocamento horizontal não ter indicado valores de pico bem definidos nos materiais reforçados não teve como adotar um critério de ruptura bem definido. Neste sentido os resultados dos parâmetros de resistência foram apresentados em função do percentual de deslocamento.

3.3.3 Ensaio de compressibilidade

Os parâmetros de compressibilidade para as diferentes misturas foram obtidos utilizando uma célula edométrica do tipo anel fixo, com drenagem no topo e na base das amostras, seguindo os critérios e procedimentos da norma NBR 12007 (ABNT, 1990). O ensaio foi realizado utilizando prensas de compressão unidimensional. Este ensaio teve a finalidade de analisar os efeitos da inclusão da fibra de coco nas curvas índice de vazios *versus* log da tensão, na tensão de sobre adensamento (σ'_a) e nos parâmetros de

compressibilidade: índice de compressão (C_c) e índice de descompressão (C_d).

As amostras ensaiadas foram moldadas utilizando anéis metálicos de 40 cm² de área e altura de 2 cm, a partir dos corpos de prova compactados na densidade seca e teor de umidade ótima de cada mistura. Na Figura 19 são apresentadas imagens ilustrando estes procedimentos.

Figura 19 - Moldagem dos corpos de prova para realização do ensaio na célula edométrica



Fonte: O autor

As células edométricas foram montadas obedecendo a seguinte sequência: base da célula edométrica, pedra porosa, papel filtro (para evitar perda de material), amostra confinada no anel metálico, pedra porosa, papel filtro e por fim foi inserido a parte superior da célula edométrica (Figura 20). Após o fechamento das células, as mesmas foram inseridas na prensa com sistema de aplicação de tensão constituído de pesos e um braço de alavanca. As leituras das deformações verticais foram realizadas utilizando extensômetros com sensibilidade de 0,01 mm.

Figura 20 - Montagem da célula edométrica

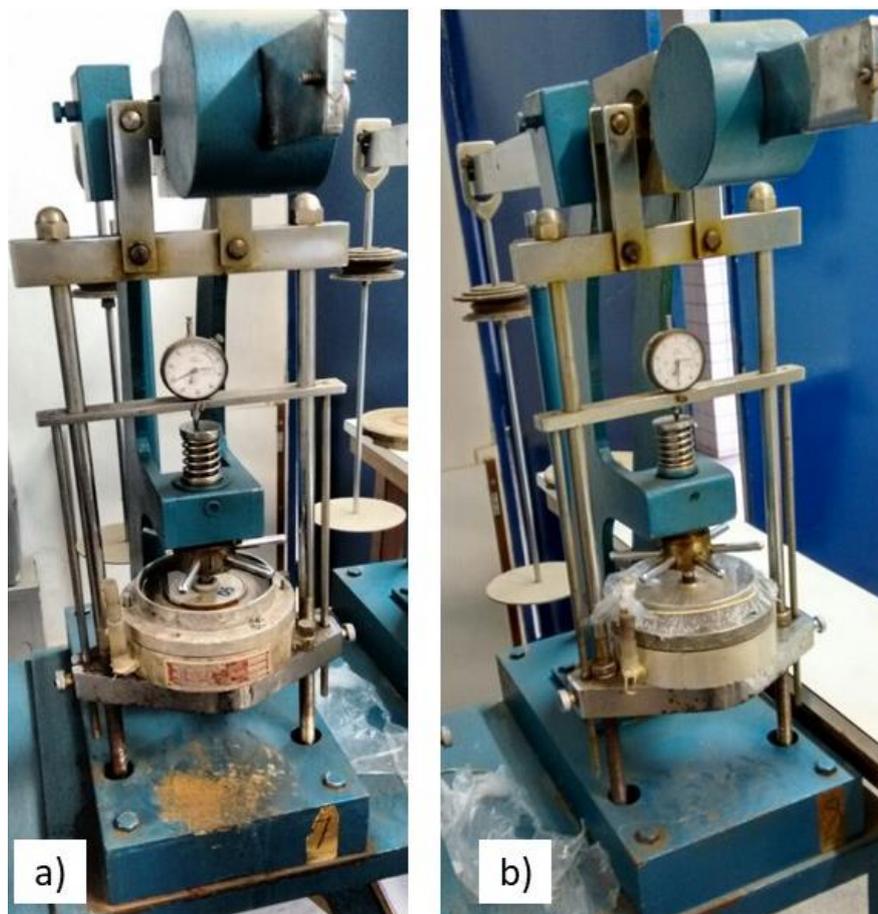


Fonte: O autor

Os ensaios foram realizados com inundação (Figura 21a) e sem inundação (Figura 21b) da célula edométrica com a finalidade de avaliar o comportamento da compressibilidade em relação ao aumento do teor de umidade para o solo natural e as diferentes misturas analisadas. O ensaio consistiu em aplicar estágios de carregamento dobrando a tensão aplicada e realizar leituras das deformações verticais em intervalos de tempos dobrados. Ao final dessa etapa foram realizados estágios de descarregamentos e realizadas leituras das deformações verticais. Cada estágio de carregamento e descarregamento foram mantidos durante um período de 24 horas. Na condição inundada, o ensaio foi realizado inserindo água pela base da célula edométrica, após 15 segundos de aplicação do primeiro carregamento.

Foram traçadas curvas índices de vazios *versus* tensão aplicada cujo os parâmetros utilizados para analisar a compressibilidade das amostras foram obtidos a partir das mesmas. O índice de compressão foi determinado através da inclinação da reta de compressão virgem correspondente a etapa de carregamento das amostras. Já o índice de descompressão foi definido a partir da inclinação da reta formada na etapa de descarregamento das amostras. Para determinar a tensão de sobre adensamento foi utilizado o método de Pacheco e Silva.

Figura 21 - Célula edométrica na condição inundada (a) e na condição não inundada (b)



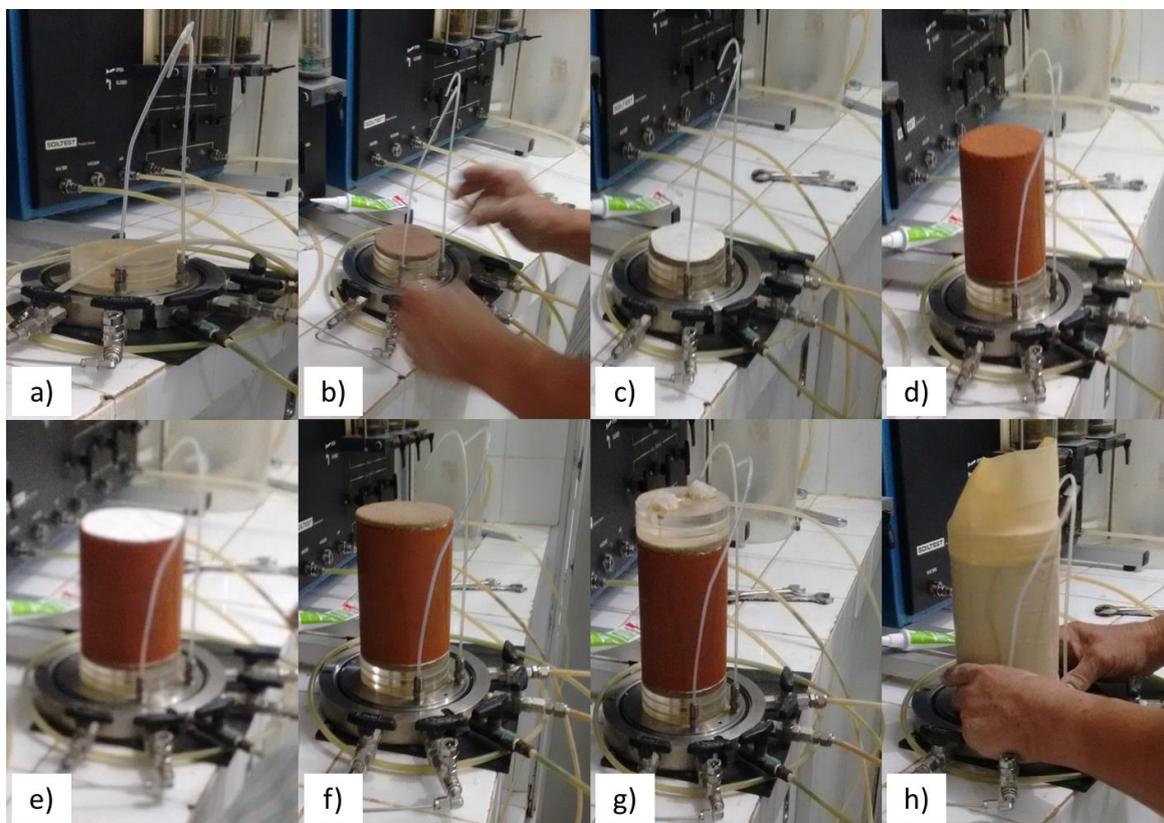
Fonte: O autor

3.3.4 Ensaio de condutividade hidráulica

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados para as diferentes misturas de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma NBR 14545 (ABNT, 2000). A condutividade hidráulica foi medida utilizando um permeâmetro de parede flexível modelo Tri-flex 2 da Soil Test – ELE e amostras com dimensões de 12,5 cm de altura e 10 cm de diâmetro, compactadas no teor de umidade ótima e densidade seca, correspondente a cada mistura.

As amostras foram montadas nas células do equipamento na sequência da base até o topo descrita a seguir: base de acrílico da célula por onde a água entrada, pedra porosa, papel filtro, corpo de prova compactado, papel filtro, pedra porosa, tampa de acrílico no topo da amostra denominada “top cap” onde são conectadas as mangueiras de drenagem e, por fim, a membrana flexível que envolve todos estes elementos. Na Figura 22 são mostradas imagens em sequência deste procedimento.

Figura 22 - Montagem da amostra para realização do ensaio de condutividade hidráulica no equipamento Tri-flex da Soil Test – ELE



Fonte: O autor

Em seguida, foram utilizadas ligas de borracha para fixar a membrana ao conjunto e posteriormente as mangueiras de drenagem foram fixadas no “top cap” sendo utilizado silicone para ajudar na fixação e vedação das mesmas. Dando prosseguimento, a célula do equipamento foi fechada e o ambiente externo a amostra foi preenchida com água até preencher a célula (Figura 23), sendo verificado no final se não existiam bolhas de ar na superfície. Depois foi realizada a remoção de ar das pedras porosas e das tubulações utilizando água destilada até que todas as bolhas de ar fossem removidas. Logo após, foi iniciado o processo de saturação do corpo de prova. O critério utilizado para verificação da saturação do corpo de prova é quando o volume de água que entra pela base da amostra é igual ao volume que sai pelo topo, na aplicação de um gradiente de pressão constante de 30 kPa. Quando se constata a saturação do corpo de prova, é então realizado o ensaio de condutividade hidráulica propriamente dito.

Figura 23 - Célula montada para realização do ensaio de condutividade hidráulica



Fonte: O autor

Para determinação do coeficiente de condutividade hidráulica das amostras foi aplicado uma tensão confinante de 220 kPa na parede da membrana flexível, 200 kPa na base da amostra e 100 kPa no topo da amostra gerando um gradiente hidráulico de 100 kPa para percolação da água no sentido vertical e ascendente das amostras. Em seguida foram realizadas as medições do fluxo. Os ensaios foram repetidos até que fossem obtidos três valores com $\pm 10\%$ um do outro (mínimo de três e máximo de cinco réplicas para cada amostra). Para o coeficiente de condutividade hidráulica saturado das amostras foi considerado a média das medições de fluxo.

3.3.5 Ensaio para determinação da curva de retenção de água e estimativa da condutividade hidráulica não saturada

As curvas de retenção de água das misturas com os diferentes teores de fibras foram obtidas através do ensaio de papel filtro, seguindo as diretrizes estabelecidas na norma ASTM D5298 (ASTM, 2010). Este ensaio teve o intuito de avaliar a influência da adição de diferentes percentuais de fibras de coco no comportamento da curva característica de retenção de água, bem como auxiliar na determinação de parâmetros como a condutividade hidráulica não saturada, capacidade de campo, capacidade de

sucção ou capacidade diferencial de umidade, ponto de entrada de ar e teor de umidade residual das misturas.

As amostras foram moldadas a partir dos corpos de provas saturados após o ensaio de determinação da condutividade hidráulica. Foram utilizados anéis metálicos de 40 cm² de área e altura de 2 cm semelhante ao ensaio de compressibilidade para moldar as amostras. A curva de retenção de água foi construída através da secagem das amostras e o papel filtro utilizado foi o modelo Whatman n° 42. Partindo da condição saturada as amostras foram secadas, sendo que a cada secagem de 2% de umidade gravimétrica foram colocados papéis filtros em contato direto com amostras para determinação da sucção matricial correspondente ao conteúdo de água na amostra.

Após esta etapa, as amostras com os papéis filtros foram envolvidos em camadas de papel filme plástico (PVC) e papel alumínio. Foi adotado um período de equalização de umidade do conjunto amostra-papel de 7 dias. Durante este período as amostras foram conservadas em uma caixa de isopor. Após o tempo de equalização, os papéis filtros de cada amostra foram retirados com auxílio de uma pinça metálica, e imediatamente colocou-se em uma balança de precisão de 0,0001g para determinação do peso úmido do papel. Em seguida, os papéis filtros foram colocados em cápsulas e levados a secagem em estufa à 100°C por 24 horas. Posteriormente, o conjunto amostra e anel foram pesados para determinação do teor de umidade das misturas no equilíbrio. Após às 24 horas, as cápsulas com os papéis filtros secos foram colocados em um dessecador com sílica e em seguida foram pesados os papéis filtros novamente em balança de precisão, para determinação do peso seco do papel filtro.

Estes procedimentos foram repetidos até as amostras atingirem o teor de umidade constante, isto é, quando não apresentavam mais perda de umidade. A sucção matricial correspondente aos diferentes teores de umidade das amostras foi calculada utilizando o teor de umidade dos papéis filtros a partir das equações 1 e 2, proposta por Chandler *et al.* (1992).

$$\psi = 10^{6,05-2,48.\log(wp)}, wp > 47\% \quad \text{Equação (1)}$$

$$\psi = 10^{4,84-0,0622.wp}, wp \leq 47\% \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

wp : é a umidade do papel filtro em percentagem;

ψ : é a sucção em kPa.

As curvas de retenção de água das diferentes misturas foram plotadas a partir da relação entre a sucção matricial *versus* umidade volumétrica das amostras. Para melhor visualização da curva de retenção de água do solo natural e das misturas foram realizados ajustes utilizando a equação 3, proposta por van Genuchten (1980).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (a\psi^n)^m]} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

θ : é a quantidade de água expressa em umidade volumétrica em %;

θ_r : é teor de umidade volumétrica residual em % obtido experimentalmente;

θ_s : é o teor de umidade volumétrica de saturação em % obtido experimentalmente;

ψ : Sucção em kPa;

a e n: são parâmetros de ajuste da curva.

$$m: 1 - \frac{1}{n}$$

A restrição para $m = 1 - 1/n$ foi adotada seguindo as sugestões de van Genuchten e Nielson (1985). Os ajustes das curvas de retenção de água foram realizados utilizando o *software* Excel a partir de uma estimativa inicial dos parâmetros a e n do modelo. Em seguida, foram calculados os desvios entre os valores de umidade volumétrica medidos em laboratório e os valores de umidade volumétrica obtidos pelo modelo de van Genuchten (1980) para a estimativa de inicial de a e n. Estes valores foram somados, obtendo-se a soma dos quadrados dos desvios, e utilizando a equação 4 foram calculados os coeficientes de determinação (R^2) dos ajustes para os valores correspondentes as estimativas iniciais dos parâmetros a e n.

$$R^2 = \frac{(1 - SQD)}{(n - s^2)} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

R^2 : é o coeficiente de determinação;

SQD: Soma dos quadrados dos desvios;

n: número de medições de θ ;

s^2 : variância das medições θ obtidos experimentalmente;

Os valores estimados inicialmente de a e n dos parâmetros do modelo foram otimizados a partir de métodos iterativos utilizando a ferramenta SOLVER do *software* Excel. Foram obtidas as combinações dos valores de a e n de cada mistura que proporcionassem valores estimados de θ pelo modelo adotado correspondente a menor soma dos quadrados dos desvios e, conseqüentemente, o maior coeficiente de determinação (R^2).

A partir das curvas de retenção foram obtidos os valores referentes ao ponto de entrada de ar e teor de umidade residual de cada mistura graficamente. Em seguida, foi determinado o teor de umidade referente a capacidade de campo, que é umidade correspondente a sucção de 33 kPa. Por este método, pode-se estimar os valores da umidade volumétrica da capacidade campo (θ_{cc}) e em seguida foram calculadas a máxima capacidade de armazenamento de água das misturas ($WS_{m\acute{a}x.}$) utilizando a equação 5. Os cálculos foram realizados de acordo com uma altura de raiz (H_{raiz}) de 40 cm conforme descrito por Koerner e Daniel (1997).

$$WS_{m\acute{a}x.} = \theta_{cc} * H_{raiz} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

$WS_{m\acute{a}x.}$: é a máxima capacidade de armazenamento de água das misturas em cm;

θ_{cc} : é o teor de umidade volumétrica da capacidade campo em percentagem;

H_{raiz} : é a altura de raiz em cm;

Já o parâmetro de capacidade de sucção ou capacidade diferencial de umidade (C) das misturas foi determinado de através do cálculo da inclinação da reta de secagem, do trecho de tendência linear das curvas de retenção de água, sendo o cálculo realizado de acordo com a equação 6.

$$C = \frac{\Delta\theta}{\Delta\log(\psi)} \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

C: é a capacidade de sucção;

$\Delta\theta$: é variação de umidade;

$\Delta\log(\psi)$: variação do logaritmo da sucção.

A condutividade hidráulica não saturada foi determinada de acordo com o modelo de van Genuchten (1980) tendo em vista que o mesmo tem sido muito utilizado e os resultados obtidos vem apresentando estimativas satisfatórias para modelagem do fluxo de água. A representação matemática deste modelo é apresentada nas equações 7 e 8.

$$k(Se) = k_{sat} Se^{0,5} \left[1 - \left(1 - Se^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad \text{Equação (7)}$$

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad \text{Equação (8)}$$

Onde:

θ_r : é o teor de umidade volumétrica residual;

θ_s : é o teor de umidade volumétrica saturada;

θ : é o teor de umidade volumétrica para qual se deseja determinar a condutividade hidráulica não saturada;

Se: é o grau de saturação corresponde a θ ;

k_{sat} : é a condutividade hidráulica saturada;

m: é um parâmetro de ajuste.

3.3.6 Análises da interface solo-fibra

Foram realizadas análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas superfícies das fibras contidas no plano de ruptura cisalhado das amostras após ensaio de cisalhamento direto para as misturas reforçadas com os diferentes teores de fibra de coco. Esta análise teve o intuito de avaliar a interação microestrutural entre a matriz e o reforço, buscando compreender melhor a interface entre as diferentes fases da mistura e verificar como a mesma influenciou no desempenho geotécnico do solo reforçado.

As amostras utilizadas foram moldadas de acordo com a metodologia descrita por Tang *et al.* (2007). Após moldados as amostras foram submetidas a vácuo de metalização

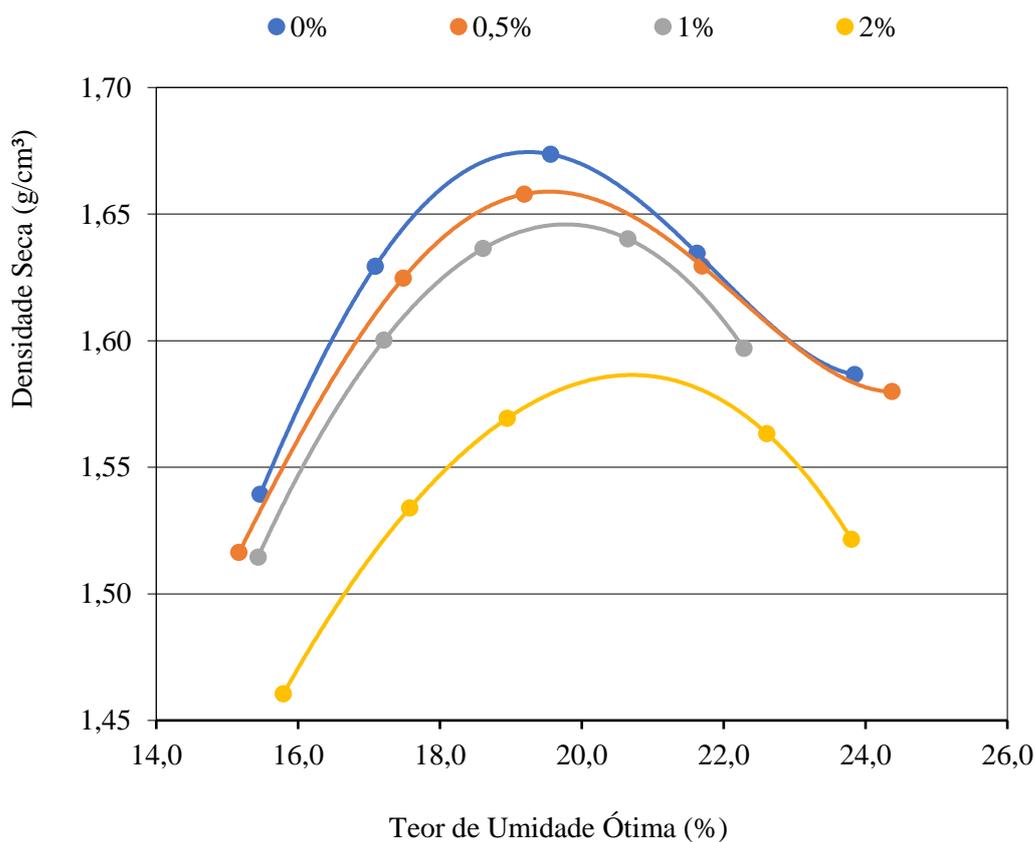
de 10^{-5} bar. Este procedimento foi realizado no departamento de Química Fundamental da Universidade Federal de Pernambuco e posteriormente foram analisadas em um microscópio eletrônico de varredura pertencente ao Laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica da mesma instituição. Adicional ao processo de análises microscópicas foram realizadas, no mesmo equipamento, microanálises elementares, a partir da técnica de espectrometria por dispersão de energia de raios-x (EDS), na zona de contato solo-fibra das amostras. Esta análise teve o intuito de caracterizar a composição química interfacial das diferentes misturas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 COMPACTAÇÃO

As curvas de compactação do solo natural e das misturas são apresentadas na Figura 24. Nota-se que a adição das fibras reduziu a densidade seca e aumentou o teor de umidade ótima, à medida que o teor de fibra foi aumentado. Isto sugere que o aumento no conteúdo de fibra resultou em misturas com maior porosidade.

Figura 24 - Curvas de compactação do Solo Natural e das misturas Solo-Fibra de Coco



Fonte: O autor

Na Tabela 6 são apresentados os parâmetros de compactação, densidade seca máxima e teor de umidade ótima para o solo natural e as diferentes misturas. O teor de

umidade ótima do solo natural foi de 19,2%. Já os teores de umidade ótima das misturas solo – fibra variaram entre 19,4% (mistura com 0,5% de fibra) e 20,5% (mistura com 2% de fibra), isto é, 0,2 e 1,3% a mais que o valor de conteúdo de água obtido para o solo natural. O valor de densidade seca máxima para o solo natural foi de 1,680 g/cm³. Para as diferentes misturas observou-se uma variação entre 1,660 g/cm³ (mistura com 0,5% de fibra) e 1,584 g/cm³ (mistura com 2% de fibra), ou seja, respectivamente 0,02 e 0,1 g/cm³ a menos em relação ao valor obtido para o solo natural. Prabakar e Sridhar (2002) avaliando a adição de até 1% de fibras curtas de sisal, distribuídas randomicamente, em um solo argiloso, classificado como CL pelo SUCS, oriundo de Bhopal na Índia, observaram este mesmo comportamento de redução da densidade seca máxima e aumento do teor de umidade ótima, em relação ao aumento do teor de fibra na mistura. Mohamed (2013) avaliando a inclusão aleatória de até 1,5% de fibras de feno em um solo argiloso, também verificou redução da densidade seca máxima à medida que se aumenta o teor de fibra, corroborando com os resultados obtidos neste trabalho. Por outro lado, de modo contrário ao observado neste estudo, o autor verificou redução do teor de umidade ótima para até 1% de adição na mistura e aumento do teor de umidade ótima para 1,5% de fibra na mistura.

Tabela 6 - Parâmetros de compactação do Solo Natural e das misturas Solo-Fibra de Coco

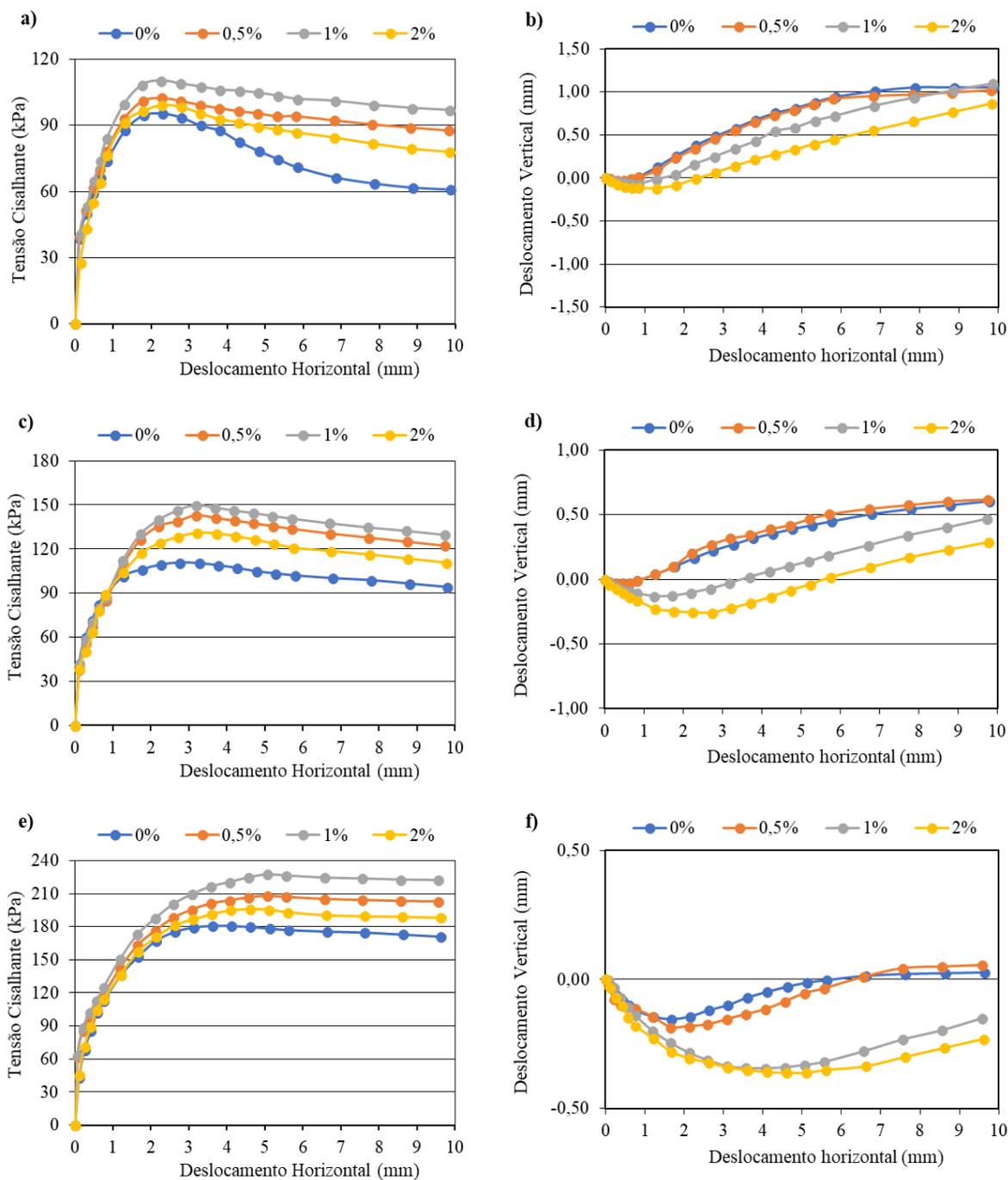
Teor de Fibra (%)	Teor de Umidade Ótima (%)	Varição em relação ao solo natural do teor de umidade ótima (%)	Densidade Seca Máxima (g/cm ³)	Varição em relação ao solo natural da densidade seca máxima (g/cm ³)
0	19,2		1,680	
0,5	19,4	+0,20	1,660	-0,02
1	19,6	+0,40	1,643	-0,04
2	20,5	+1,30	1,584	-0,10

Fonte: O autor

4.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

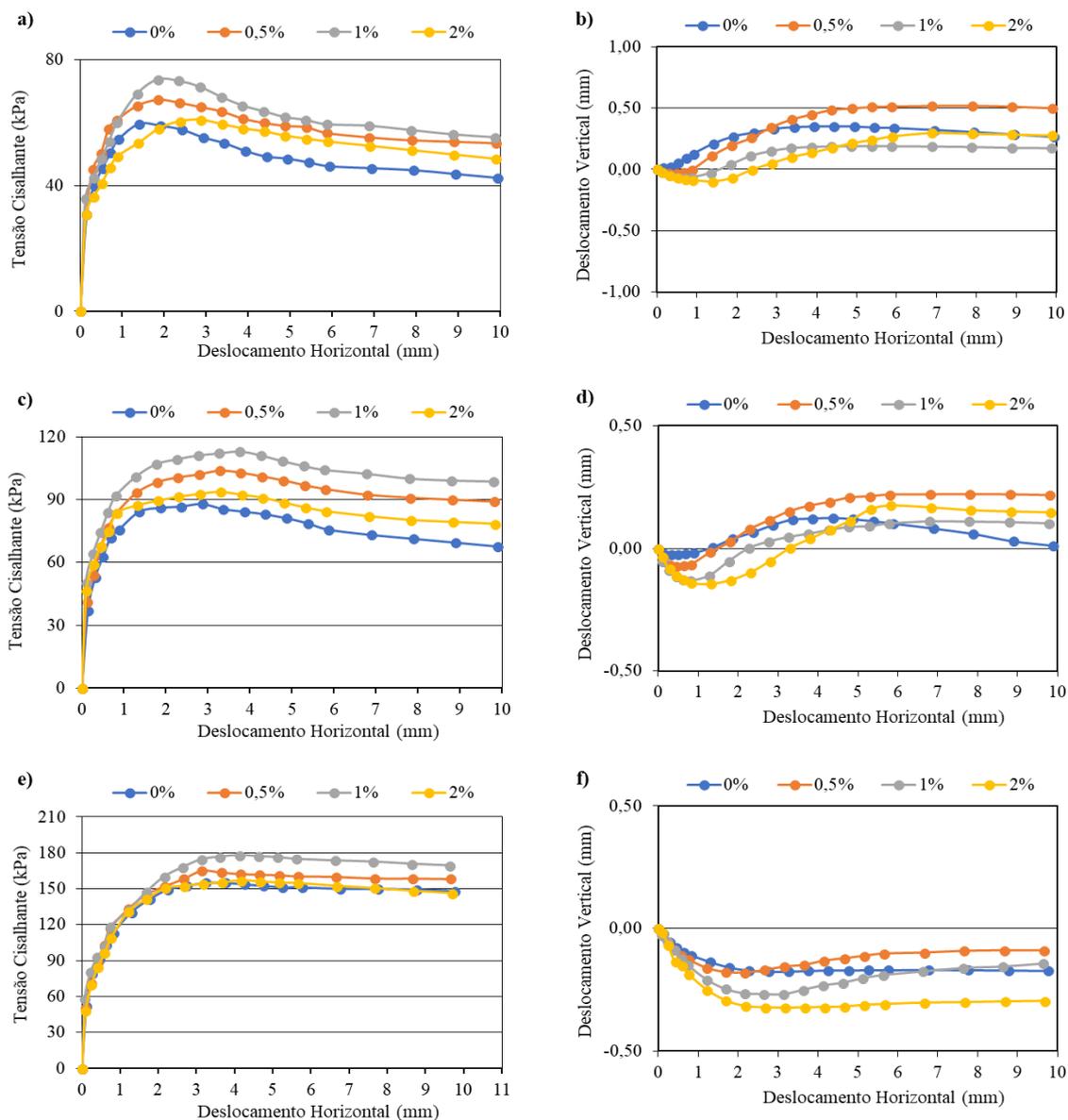
Nas Figuras 25 e 26 são apresentadas as curvas resultantes do ensaio de cisalhamento direto para as tensões normais de 50, 100 e 200 kPa na condição não inundada e inundada, respectivamente.

Figura 25 – Resultado do ensaio de cisalhamento na condição não inundada. Em a), c) e e) curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para a tensão normal de 50, 100 e 200 kPa, respectivamente; Em b), d) e f) curvas deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal para a tensão normal de 50, 100 e 200 kPa, respectivamente.



Fonte: O autor

Figura 26 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição inundada. Em a), c) e e) curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para a tensão normal de 50, 100 e 200 kPa, respectivamente; Em b), d) e f) curvas deslocamento vertical *versus* deslocamento.



Fonte: O autor

Analisando os gráficos correspondentes aos ensaios nas condições com e sem inundação, verifica-se que a inclusão da fibra de coco na matriz de solo argiloso compactado de modo geral aumentou a resistência de pico em todos os níveis de tensões normais adotados (Figuras 25a, 25c, 25e, 26a, 26c e 26e). Este aumento de resistência de pico foi mais pronunciado para as misturas com teores de 0,5 e 1% de fibra de coco e mais evidente a medida que a tensão normal aumenta. Já a mistura com 2% de fibras

também apresentou aumento na resistência de pico, de modo geral, porém na condição inundada esta mistura apresentou comportamento semelhante ao solo natural na tensão normal de 200 kPa (Figura 26e).

Nota-se ainda que além do aumento da resistência de pico, pode ser observado também que houve uma redução na queda de resistência pós-pico devido a adição das fibras de coco a matriz de solo argiloso, sobretudo com o aumento da tensão normal aplicada. É possível verificar que este comportamento também ocorre principalmente nas misturas reforçadas com 0,5 e 1 % de fibras de coco. Estes resultados indicam que para a quantidade de 2% de fibras de coco o compósito pode apresentar redução de desempenho mecânico em relação aos compósitos reforçados com menores teores de fibras. O aumento de resistência de pico e a diminuição de queda da resistência pós pico em solos reforçados com fibras também foi observado em outros trabalhos (CONSOLI *et al.*, 2007; MALIAKAL & THIYYAKKANDI, 2013; MOHAMED, 2013).

Em ambas as condições de inundação do ensaio, o solo natural apresentou comportamento frágil na ruptura para níveis de tensão normal baixos (Figuras 25a e 26a), sendo este comportamento reduzido à medida que se aumenta os níveis de tensão normal aplicada (Figuras 25c, 25e, 26c e 26e). As amostras reforçadas apresentaram comportamento menos frágil na ruptura, isso porque a inclusão da fibra aumentou a ductilidade e a tenacidade do material, sobretudo, para os percentuais de 0,5 e 1% onde se observa que a área abaixo da curva tensão cisalhante *versus* deformação horizontal é maior em relação ao o material reforçado com 2% de material fibroso e o solo sem reforço.

Ao comparar o solo natural e reforçado com diferentes percentuais de fibras, verifica-se ainda que para níveis de deformação horizontal de até 1 mm, tanto na condição inundada quanto na condição não inundada, o comportamento da tensão cisalhante *versus* deformação horizontal é semelhante para todos os níveis de tensão normal. Isto sugere que independente da condição de inundação do ensaio a fibra necessita que a matriz atinja certos níveis de deformação para que o solo possa transmitir o carregamento até o reforço, fazendo com que ambos os elementos do compósito contribuam simultaneamente para a resistência ao cisalhamento.

Os gráficos de deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical indicam um comportamento típico de um material argiloso sobre adensado, o que era de se esperar tendo em vista que se trata de um material de textura fina compactado. Para os níveis de tensão normal de 50 e 100kPa, no ensaio com e sem inundação, verifica-se que o solo

natural e as misturas após uma etapa de compressão inicial ocorre uma expansão onde a máxima taxa de dilatação acontece a um deslocamento horizontal em torno de 3,5mm, próximo ao pico de resistência, e em seguida a taxa de dilatação diminui convergindo para um valor final quase que constante (Figuras 25b, 25d, 26b e 26d). No entanto, à medida que se aumenta o teor de fibra esta taxa de dilatação que converge para um valor quase constante apresenta redução menos significativa em comparação ao solo natural. Por esta razão na mistura com 2% de material fibroso praticamente não há redução da taxa de dilatação, embora no final da curva a expansão se aproxime do valor constante de deslocamento vertical observado no solo natural e nas demais misturas. Este comportamento deve estar associado a tensão de sobre adensamento da matriz de solo argiloso compactado. É provável que a inclusão da fibra de coco reduza a tensão de sobre adensamento do compósito.

Para a tensão normal de 200 kPa, na condição não inundada, observa-se que o solo natural e a mistura com 0,5% de fibra apresentaram uma etapa de compressão inicial e em seguida houve expansão até convergir para um valor nulo de deslocamento vertical na condição não inundada (Figura 25f). Isto pode indicar que a tensão de sobre adensamento destes materiais nesta condição de inundação seja próxima de 200 kPa. Já as misturas com 1 e 2% de material fibroso apresentaram uma etapa de compressão e apenas no final da curva houve uma expansão com uma taxa de dilatação pequena. Este comportamento possivelmente também indica que o aumento do teor de fibra reduz a tensão de sobre adensamento do compósito.

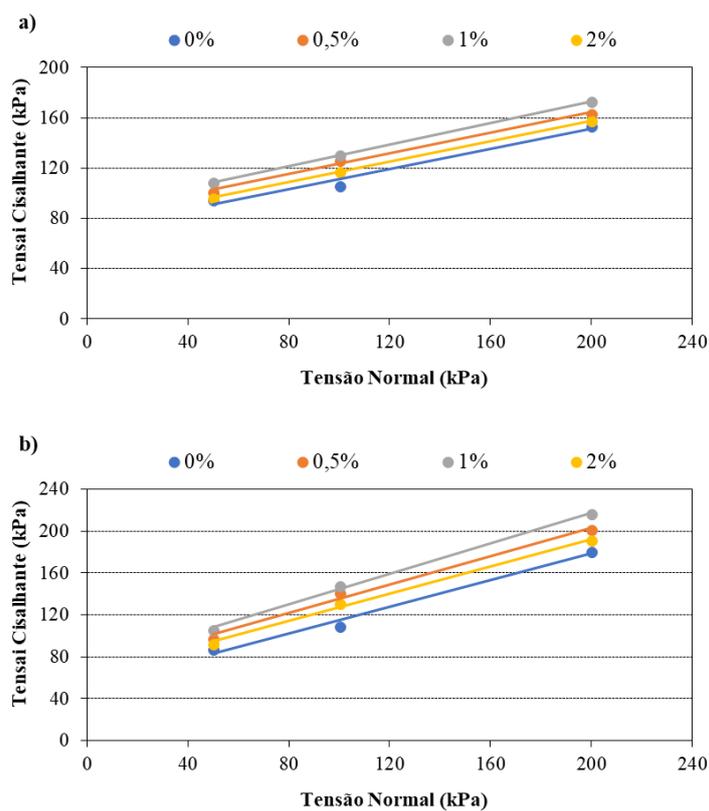
Na condição inundada observa-se que na tensão normal de 200 kPa todas as misturas também apresentaram uma etapa de compressão inicial, porém em seguida houve expansão até convergir para um valor de deslocamento vertical abaixo de zero (Figura 26f). Isso pode indicar que a tensão de sobre adensamento do solo natural e das misturas é menor que 200 kPa. Nesse sentido, nota-se que tanto a inundação, quanto o aumento do incremento de fibras proporcionaram redução da tensão de sobre adensamento, quando se compara com os resultados obtidos na condição não inundada para esta mesma tensão normal.

Os comportamentos verificados nas curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal e deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal das misturas reforçadas com fibras de coco corroboram com Bolaños (2013) que avaliou a influência da inclusão de até 1,5% de fibra de coco em um solo argiloso compactado, classificado como CL pelo sistema unificado, oriundo do Rio de Janeiro. Já Leocádio (2005) relatou

comportamentos semelhantes avaliando a adição de 0,5% de fibras de sisal em um solo argiloso compactado, também classificado como CL pelo sistema unificado, proveniente de Minas Gerais.

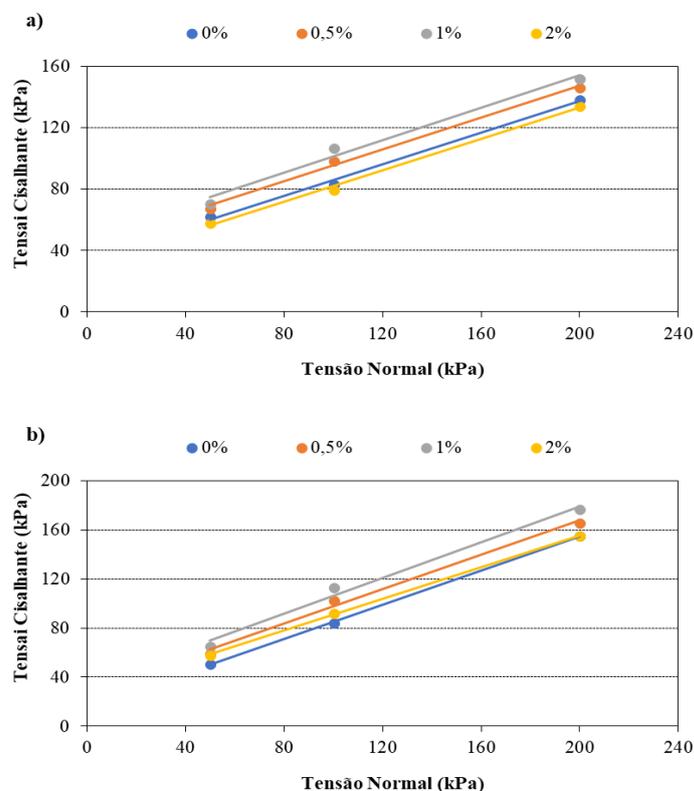
A partir dos resultados e curvas obtidas, conforme apresentadas anteriormente, foi possível realizar uma análise da influência da adição da fibra de coco nos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo. Utilizando o critério linear de Mohr-Coulomb como critério de ruptura foram obtidas as envoltórias de resistência para deslocamentos horizontais relativos de 1, 2, 3, 4 e 5 mm para a condição não inundada (Figura 27) e para a condição inundada (Figura 28).

Figura 27 - Envoltórias de resistência do solo natural e das misturas solo-fibra na condição não inundada referente ao deslocamento horizontal relativo de 2 mm em a) e de 4 mm em b).



Fonte: O autor

Figura 28 - Envoltórias de resistência do solo natural e das misturas solo-fibra na condição inundada referente ao deslocamento horizontal relativo de 2 mm em a) e de 4 mm em b).



Fonte: O autor

De modo geral, percebe-se que em ambas as condições de inundação do ensaio, as envoltórias de resistência indicam que a inclusão do material fibroso proporcionou aumento nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, sendo verificado maior efeito no valor do intercepto de coesão do que no ângulo de atrito. Este mesmo comportamento também foi verificado em diversos trabalhos analisando diferentes solos e fibras (CONSOLI *et al.*, 2007; TANG *et al.* 2007; ANAGNOSTOPOULOS, TZETZIS e BERKETIS, 2013; MALIAKAL e THIYYAKKANDI, 2013; MOHAMED, 2013).

Quando se compara o solo natural e o solo reforçado com os diferentes percentuais de fibra de coco na condição não inundada verifica-se que o ângulo de atrito apresentou pequena alteração, mas o intercepto de coesão apresentou aumentos mais significativos sendo que estes ganhos foram maiores nas misturas com 0,5 e 1% de material fibroso (Figura 27).

Na condição inundada é ainda mais evidente que o ângulo de atrito com a adição da fibra de coco permaneceu praticamente inalterado. Além disso, verificou-se também

que houveram aumentos nos valores de intercepto de coesão mais significativos para as misturas com 0,5 e 1% de material fibroso. No entanto para a mistura com teor de 2% de reforço praticamente não houve aumento no intercepto de coesão em relação ao solo natural (Figura 28). Este comportamento indica que apesar da inundação, a fibra ainda influenciou positivamente nos parâmetros de resistência ao cisalhamento do compósito em relação ao solo natural, a depender da proporção de reforço utilizado.

Na Tabela 7 são sistematizados os parâmetros de resistência ao cisalhamento, intercepto de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ), obtidas nas envoltórias para os deslocamentos horizontais relativos de 1, 2, 3, 4 e 5 mm das diferentes misturas e em ambas as condições de realização do ensaio. Já na Tabela 8 são apresentadas as variações em percentagem dos valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento das misturas em relação aos parâmetros obtidos com o solo natural.

Tabela 7 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos das envoltórias do solo natural e das misturas Solo-Fibra em condição não inundada e inundada

Condição do Ensaio	Parâmetro	Deslocamento Horizontal Relativo (mm)	Teor de Fibra (%)			
			0,0	0,5	1,0	2,0
Não inundado	c (kPa)	1	62,1	62,1	65,3	64,1
		2	71,1	82,6	87,0	76,1
		3	61,4	76,4	81,7	71,7
		4	51,7	67,8	72,0	62,3
		5	40,8	60,9	65,5	54,7
	ϕ (°)	1	14,3	15,2	15,9	14,0
		2	21,9	22,2	23,3	22,2
		3	29,2	29,6	31,1	28,8
		4	32,4	34,1	36,0	33,1
		5	34,5	36,3	38,6	35,3
Inundado	c (kPa)	1	36,0	37,1	38,8	35,7
		2	34,4	40,8	43,2	30,8
		3	28,6	36,9	39,1	31,6
		4	15,7	20,9	22,7	17,8
		5	12,9	19,7	20,5	17,1
	ϕ (°)	1	21,2	23,3	23,8	20,6
		2	27,3	27,5	27,9	27,1
		3	31,1	31,5	32,3	31,0
		4	34,8	34,9	36,0	32,8
		5	34,8	35,0	36,0	33,8

Fonte: O autor

Tabela 8 - Variação dos valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento das diferentes misturas em relação aos parâmetros do solo natural

Condição do Ensaio	Parâmetro	Deslocamento Horizontal Relativo (mm)	Teor de Fibra (%)			
			0,0	0,5	1,0	2,0
Não inundado	c (kPa)	1	-	0,0%	5,2%	3,3%
		2	-	16,2%	22,4%	7,1%
		3	-	24,4%	33,1%	16,9%
		4	-	31,3%	39,3%	20,5%
		5	-	49,2%	60,5%	33,9%
	ϕ (°)	1	-	5,9%	11,3%	-2,3%
		2	-	1,5%	6,3%	1,5%
		3	-	1,5%	6,4%	-1,3%
		4	-	5,0%	11,1%	2,0%
		5	-	5,2%	11,8%	2,4%
Inundado	c (kPa)	1	-	3,0%	7,9%	-0,9%
		2	-	18,8%	25,8%	-10,4%
		3	-	29,2%	37,0%	10,8%
		4	-	33,3%	44,6%	13,2%
		5	-	52,4%	58,3%	32,7%
	ϕ (°)	1	-	9,8%	12,4%	-2,6%
		2	-	0,7%	2,2%	-0,5%
		3	-	1,3%	3,8%	-0,5%
		4	-	0,3%	3,4%	-5,9%
		5	-	0,5%	3,3%	-3,1%

Fonte: O autor

Na condição não inundada, o solo natural apresentou coesão que variou de 71,1 a 40,8 kPa, respectivamente para a deformação horizontal relativa de 2 e 5 mm. Já o ângulo de atrito que variou de 14,3 a 34,5°, respectivamente para a deformação relativa horizontal de 1 e 5 mm. Para a condição inundada estes valores variaram na ordem de 36 a 12,9 kPa para a coesão e de 21,2 a 34,8 ° para o ângulo de atrito, ambos respectivamente para a deformação relativa horizontal de 1 e 5 mm.

Dentre as misturas, o teor de 1% de fibras de coco foi a que proporcionou os maiores parâmetros de resistência ao cisalhamento. Observa-se que na condição não inundada a coesão variou de 65,3 a 87 kPa e o ângulo, respectivamente para as deformações horizontais relativas de 1 e 2 mm. Já o ângulo de atrito a variação observada foi de 15,9 a 38,6°, respectivamente para a deformação horizontal relativa de 1 e 5 mm. Na condição inundada a coesão apresentou valores de coesão de 43,2kPa (deformação horizontal relativa = 2 mm) a 20,5 kPa (deformação horizontal relativa = 5 mm) e valores de ângulo de atrito de 23,8° (deformação horizontal relativa = 4 e 5mm) a 36° (deformação

horizontal relativa = 4 e 5mm). Ao analisar a Tabela 8, é possível observar que para a mistura com 1% em relação ao solo natural houveram ganhos nos parâmetros de resistência ao cisalhamento na condição não inundada da ordem de 60,5% (deformação horizontal relativa = 5 mm) a 5,2% (deformação horizontal relativa = 1 mm) na coesão e de 11,8 % (deformação horizontal relativa = 5 mm) a 6,3% (deformação horizontal relativa = 1 mm) no ângulo de atrito. Já na condição inundada estes ganhos foram cerca de 58,3% (deformação horizontal relativa = 5 mm) a 7,9% (deformação horizontal relativa = 1 mm) na coesão e de 12,4 % (deformação horizontal relativa = 1 mm) a 2,2% (deformação horizontal relativa = 2 mm) no ângulo de atrito.

O teor de 0,5% de fibras de coco foi a mistura que apresentou os valores intermediário dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, na condição não inundada estes valores foram cerca de 82,6 a 60,9 kPa de coesão, respectivamente para as deformações horizontais de 2 e 5 mm, e 15,2 a 36,3° de ângulo de atrito, respectivamente para as deformações horizontais de 1 e 5 mm. Já na condição inundada estes valores foram da ordem de 40,8 a 19,7 kPa de coesão, respectivamente para as deformações horizontais de 2 e 5 mm, e 23,3 a 35° de ângulo de atrito, respectivamente para as deformações horizontais de 1 e 5 mm. Em termos percentuais (Tabela 8), na condição não inundada, houveram ganhos na coesão de 0,0% (deformação horizontal relativa = 2 mm) a 49,2% (deformação horizontal relativa = 5 mm) e no ângulo de atrito de 5,9% (deformação horizontal relativa = 1 mm) a 1,5% (deformação horizontal relativa = 2 e 3 mm). Já na condição inundada os ganhos foram em torno de 3% (deformação horizontal relativa = 1mm) a 52,4% (deformação horizontal relativa = 5 mm) na coesão e de 0,3% (deformação horizontal relativa = 4 mm) a 9,8 % (deformação horizontal relativa = 1 mm) no ângulo de atrito.

A mistura com teor de 2% de fibras de coco foi a que apresentou os menores valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento com variação na condição não inundada de aproximadamente 76,1 kPa (deformação horizontal relativa = 2 mm) a 54,7 kPa (deformação horizontal relativa = 5 mm) na coesão e de 14° (deformação horizontal relativa = 1 mm) a 35,3° (deformação horizontal relativa = 5 mm) no ângulo de atrito. Para a condição inundada estes valores de coesão variaram de 35,7 kPa (deformação horizontal relativa = 1 mm) a 17,1 kPa (deformação horizontal relativa = 5 mm) e de ângulo de atrito variaram de 20,6° (deformação horizontal relativa = 1 mm) a 33,8° (deformação horizontal relativa = 5 mm). Em termos percentuais, para a condição não inundada os valores de coesão apresentaram ganhos que variaram de 3,3% (deformação

horizontal relativa = 1 mm) a 33,9% (deformação horizontal relativa = 5 mm). Por outro lado, na condição não inundada o ângulo de atrito apresentou ganhos em relação ao solo natural de 1,5, 2 e 2,4% para os deslocamentos horizontais relativos de 2, 4 e 5 mm e reduções em relação ao solo natural de 2,3 e 1,3% para os deslocamentos horizontais relativos de 1 e 3 mm. Na condição inundada a mistura com os valores de coesão apresentaram ganhos em relação ao solo natural da ordem de 10,8, 13,2 e 32,7%, respectivamente para os deslocamentos horizontais relativos de 3, 4 e 5 mm, e reduções com cerca de 0,9 e 10,4%, respectivamente para os deslocamentos horizontais relativos de 1 e 2 mm. Já o ângulo de atrito na condição inundada apresentou apenas reduções em relação ao solo natural que variaram de 0,5% (deformação horizontal relativa = 2 e 3 mm) a 5,9% (deformação horizontal relativa = 4 mm).

Portanto, de modo geral, pode ser observado que para o quesito resistência ao cisalhamento a proporção ótima entre solo argiloso e as fibras curtas de coco, distribuídas aleatoriamente, foi de 1% de material de reforço. É provável que as misturas com teores de até 1% de fibra de coco possam ser utilizadas como material geotécnico de sistemas construtivos, constituídos comumente por solos argilosos compactados como, por exemplo, as camadas de base e cobertura de aterros sanitários e barreiras de contaminantes. No entanto, ressalta-se que embora a fibra de coco seja um elemento de difícil degradação é importante verificar a variabilidade dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e do desempenho mecânico ao longo do tempo, isto é, a durabilidade do compósito.

De acordo com Donato *et al.* (2004), o aumento da resistência ao cisalhamento em solos reforçados é mais significativo em materiais argilosos, pois há maior probabilidade de adesão matriz-reforço devido a maior quantidade de pontos de contato entre a fibra e as partículas do solo. Nesse sentido, provavelmente nas misturas com 0,5 e 1% de fibras de coco houveram maiores contatos fibra-partículas de argila. Por outro lado, na mistura com 2% de material fibroso pode ter ocorrido maiores contatos fibra-fibra, isto compromete a adesão matriz-fibra e gera uma maior probabilidade de deslizamento do material. Isto explicaria o motivo pelo qual as misturas com 0,5 e 1% de material fibroso apresentaram melhores desempenhos mecânicos e melhores parâmetros de coesão e ângulo de atrito do que a mistura com 2% de fibras de coco.

Ao comparar estes resultados com outros trabalhos que utilizaram fibras para reforçar matrizes de solos argilosos compactados, classificados como CL pelo SUCS, percebe-se que o reforço com fibras de coco apresentou maior proporção de mistura

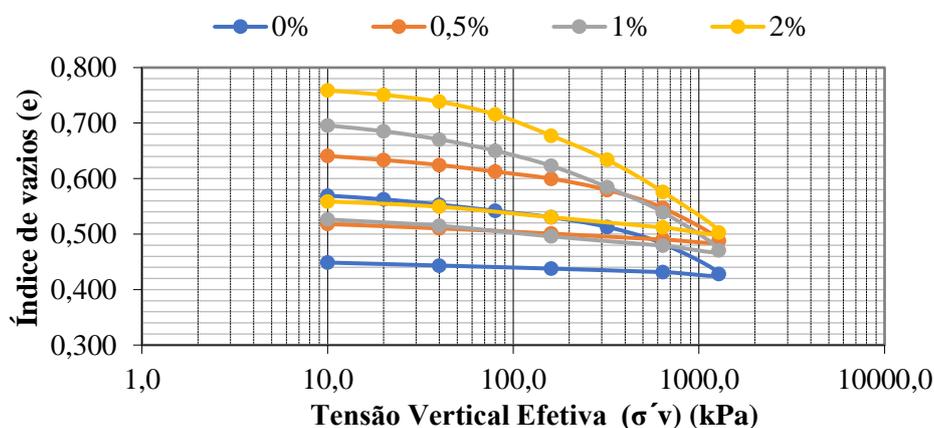
ótima. Por exemplo, trabalhos como o de Prabakar e Sridhar (2002) analisando misturas de argila e fibras de sisal obtiveram melhores parâmetros de resistência ao cisalhamento utilizando 0,75% de material fibroso. Já o teor de 1% apresentou desempenho inferior aos demais teores analisados pelos autores. A fibra de coco apresenta maiores teores de lignina do que a fibra de sisal (SATYANARAYANA, GUIMARÃES e WYPYCH, 2007) e por esta razão a fibra de coco apresenta maior flexibilidade. É provável que devido a esta característica a fibra de coco acomode mais elementos na matriz sem que haja comprometimento da adesão matriz-reforço.

Já no estudo de Tang *et al.* (2007), avaliando misturas de solo argiloso e fibras de polipropileno, o melhor desempenho mecânico e os melhores parâmetros de resistência ao cisalhamento foram obtidos com o teor de 0,25% de fibras. As fibras vegetais possuem maior porosidade do que as fibras sintéticas, o que favorece maior adesão mecânica devido a penetração da matriz nos poros das fibras. Além disso, diferente das fibras sintéticas, as fibras vegetais apresentam natureza polar, o que favorece adesão por atração eletrostática entre a matriz e o elemento de reforço. Isto pode ter contribuído para maior conteúdo ótimo de fibra de coco em comparação a fibra sintética como reforço de matrizes de solo argiloso.

4.3 COMPRESSIBILIDADE

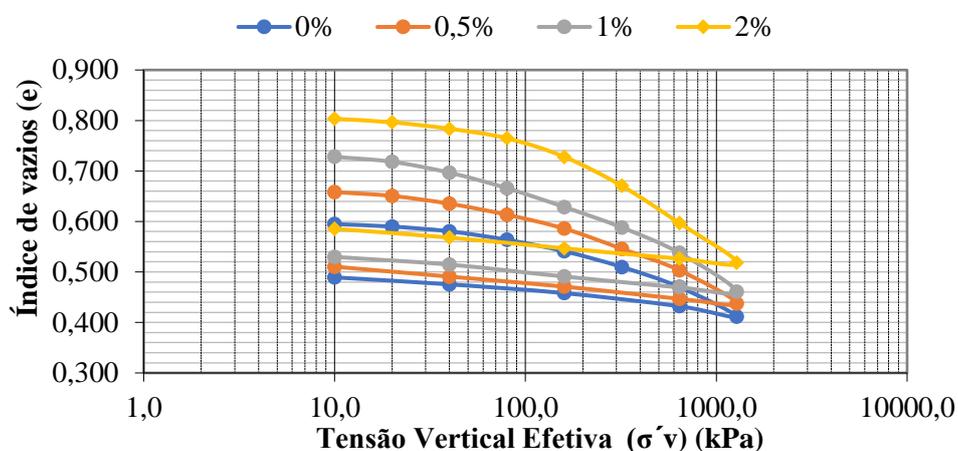
Nas Figuras 29 e 30 são apresentadas as curvas tensão vertical *versus* índice de vazios obtidas para o solo sem fibra e com os diferentes percentuais de fibras para a condição não inundada e inundada, respectivamente.

Figura 29 - Curva tensão vertical versus índice de vazios do solo natural e das misturas solo-fibra para a condição não inundada



Fonte: O autor

Figura 30 - Curva tensão vertical versus índice de vazios do solo natural e das misturas solo-fibra para a condição inundada



Fonte: O autor

Verifica-se que a adição da fibra na matriz de solo argiloso, em ambas condições de inundação, aumentou a inclinação da reta de compressão virgem, sendo a maior inclinação observada para a mistura com teor de 2% de material fibroso em relação ao solo natural. Isto significa que a adição da fibra aumentou a compressibilidade das misturas, observando-se uma relação diretamente proporcional, isto é, quanto maior o teor de fibra maior a inclinação da reta de compressão virgem. Morandini e Schneider (2017), avaliando a influência de fibras de polipropileno em matrizes a base de solo laterítico e argila bentonita, observaram o mesmo comportamento. Estes resultados podem estar relacionados ao fato de que a adição da fibra reduz a densidade do material, conforme verificado nos parâmetros de compactação, proporcionando aumento no índice de vazios inicial do solo e consequentemente aumentando a compressibilidade do compósito.

As curvas tensão vertical *versus* índice de vazios do solo natural e da mistura com teor de 0,5% de fibras de coco apresentam formatos parecidos com queda de rigidez mais evidente a partir da tensão vertical de 300 e 200 kPa, respectivamente, na condição não inundada (Figura 29). Já as curvas das misturas com 1 e 2% de fibras de coco apresentam formatos diferentes das demais, com queda de rigidez mais evidente a partir da tensão de 80 kPa (Figura 29). Isso sugere que adição da fibra aumenta o trecho de compressão virgem e reduziu a tensão de sobre adensamento em relação ao solo natural. É possível verificar ainda que o aumento da variação volumétrica com adição da fibra, quando se

compara os índices de vazios iniciais e finais das amostras, foi mais significativo na condição inundada.

As curvas tensão vertical *versus* índice de vazios do solo natural na condição inundada apresentou queda de rigidez mais evidente a partir da tensão vertical de 100 kPa (Figura 30). Já as misturas com teores de 0,5, 1 e 2% de fibra de coco a partir da tensão vertical de 20 kPa já notam-se quedas de rigidez mais evidentes (Figura 30). Isso sugere que além da adição da fibra, a inundação também contribui para aumentar o trecho de compressão virgem e redução da tensão de sobre adensamento em relação ao solo natural. Corroborando com os resultados observados na curvas de deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical do ensaio de cilhamento direto.

Na Tabela 9 são apresentados os dados de índice de índices de vazios iniciais (e_0) e finais (e_f) das amostras, bem como diferença entre estes os valores e variação percentual em relação ao solo natural. Observa-se que adição da fibra também aumentou a variação volumétrica, quando se compara a diferença entre os e_0 e e_f das amostras. Para o solo natural esta diferença foi de 0,131 e 0,114, respectivamente na condição não inundada e inundada. Na mistura com 0,5, 1 e 2% de fibra esta diferença aumenta respectivamente para 0,135 (não inundado) e 0,157 (inundado), 0,192 (não inundado) e 0,220 (inundado) e 0,226 (não inundado) e 0,229 (inundado). Em termos percentuais, isto representam que a mistura com 0,5% apresentou aumento de variação volumétrica em relação ao solo natural da ordem de 2,7 e 37,7%, respectivamente para condição não inundada e inundada, a mistura com 1% aumentos de 45,9 e 93,6%, respectivamente respectivamente para condição não inundada e inundada, e a mistura com 2% aumentos de 72,2 e 100,9%, respectivamente para condição não inundada e inundada.

Tabela 9 - Variação do índice de vazios inicial e final do solo natural e das misturas solo-fibra

Teor de Fibra (%)	Condição não inundado				Condição inundado			
	e_0	e_f	Δe	Δ em relação ao teor de 0% (%)	e_0	e_f	Δe	Δ em relação ao solo natural (%)
0	0,580	0,449	0,131	-	0,603	0,489	0,114	-
0,5	0,653	0,518	0,135	2,7%	0,667	0,510	0,157	37,7%
1	0,718	0,526	0,192	45,9%	0,750	0,530	0,220	93,6%
2	0,785	0,559	0,226	72,2%	0,814	0,585	0,229	100,9%

Fonte: O autor

Na Tabela 10 são apresentados os parâmetros de compressibilidade, índice de

compressão (Cc) e o índice de descompressão (Cd) obtidos através das curvas das Figuras 32 e 33. Verifica-se que a inclusão das fibras de coco aumentou o índice de compressão e o índice de descompressão da matriz argilosa, sendo que estes aumentos foram mais significativos para o índice de descompressão em ambas as condições de inundação.

Tabela 10 - Parâmetros de compressibilidade do solo natural e das misturas solo-fibra na condição não inundada e inundada

Teor de Fibra (%)	Condição Não Inundada						Condição Inundada					
	Cc	Δ de Cc	Cd	Δ de Cd	σ'_a (kPa)	Δ de σ'_a (kPa)	Cc	Δ de Cc	Cd	Δ de Cd	σ'_a (kPa)	Δ de σ'_a (kPa)
0	0,182	-	0,009	-	280	-	0,195	-	0,029	-	220	-
0,5	0,196	8%	0,016	78%	250	-30	0,218	12%	0,033	14%	180	-40
1	0,228	25%	0,032	256%	180	-100	0,256	31%	0,039	34%	150	-70
2	0,241	32%	0,031	244%	130	-150	0,261	34%	0,035	21%	120	-100

Fonte: O autor

No que se refere ao índice de compressão (Cc) observa-se que houve aumentos à medida que o teor de fibra das misturas foi aumentado, sendo obtidos os seguintes valores: 0,182, 0,196, 0,228 e 0,241, respectivamente, para os teores de 0, 0,5, 1 e 2% de fibra de coco para condição não inundada. Já na condição inundada os valores de Cc obtidos foram de 0,195, 0,218, 0,256 e 0,261, respectivamente, para os teores de 0, 0,5, 1 e 2%.

Em termo percentuais, verifica-se que a mistura com 0,5% de fibras de coco proporcionou aumentos no índice de compressão de 8% e 12%, respectivamente, para condição não inundada e inundada. Já a mistura com 1% de fibras de coco, estes aumentos representaram cerca de 25% na condição não inundada e 31% na condição inundada. Na mistura com 2% de fibras de coco os aumentos observados no índice de compressão foram de 32% na condição não inundada e 34% na condição inundada. Isto indica que a dependendo do nível de tensão aplicada, da proporção entre os materiais e da condição de inundação, a adição de fibras de coco no solo argiloso pode proporcionar cerca de 30% a mais de deformações por compressão primária.

Quanto ao índice de descompressão (Cd), os valores obtidos na condição não inundada foram de 0,009 para o solo natural, 0,016 para a mistura com 0.5% de fibra, 0,032 para mistura com 1% de fibra e 0,030 para mistura com 2% de fibra. Na condição

inundada estes valores foram de 0,029, 0,033, 0,039 e 0,035 respectivamente para os teores de 0, 0,5, 1 e 2 % de fibra de coco. Isso indica que a fibra aumenta o potencial de expansão do solo devido ao alívio de tensão. Estes aumentos na condição não inundada representam cerca de 78%, 256% e 244%, respectivamente, para misturas com 0.5%, 1% e 2% em relação ao solo natural. Já na condição inundada os aumentos corresponderam a 14%, 34% e 21%, respectivamente, para as misturas com 0,5%, 1% e 2% de fibras de coco. É possível observar que o teor de 1% de fibras de coco foi o que mais influenciou em relação ao potencial de deformação por alívio de tensão, sobretudo, em condições não inundadas.

Portanto, para o quesito compressibilidade não se verificou a existência de uma proporção ótima entre solo argiloso e as fibras curtas de coco, distribuídos aleatoriamente. Sendo este quesito um provável limitador da aplicação destas misturas como material geotécnico.

Vale ressaltar que durante a etapa de carregamento do ensaio de compressibilidade o acréscimo de carga provoca a drenagem da água e do ar presente nos vazios. No entanto, durante a etapa de descarregamento há uma tendência que as amostras absorvam parte da água que foi drenada.

Deste modo, após a etapa de carregamento, as amostras apresentam umidade inferior a umidade inicial do ensaio, isto é, as amostras encontram-se em uma condição não saturada onde a sucção atua de forma mais expressiva. A presença da fibra de coco contribui neste contexto, tendo em vista que a mesma se trata de um material que apresenta forte atração pelas moléculas de água, fato este que a torna um material de elevada capacidade de retenção. Portanto, após a etapa de carregamento, o teor de umidade na condição não inundada é muito inferior ao teor de umidade na condição inundada, conforme apresentado na Tabela 11. Nesse sentido a sucção é maior nas amostras da condição não inundada e nas misturas com teores de fibras mais elevados.

Tabela 11 - Valores de umidade antes e depois do ensaio de compressibilidade

Teor de Fibra (%)	Condição Não Inundado			Condição Inundado		
	wo (%)	wf (%)	Δw (%)	wo (%)	wf (%)	Δw (%)
0	19,16	15,82	-3,340	19,18	19,440	0,260
0,5	19,22	16,80	-2,420	19,31	20,01	0,700
1	19,57	17,78	-1,790	19,52	21,91	2,390
2	20,90	17,95	-2,950	20,21	20,66	0,450

Fonte: O autor

Em virtude disto, é provável que na etapa de descarregamento a parcela de água que é absorvida seja maior nas amostras da condição não inundada e para as misturas com maiores teores de fibras. Está maior parcela de água absorvida hidrata os argilominerais que tendem a expandir contribuindo para o aumento do índice de vazios na descompressão. Isto explica porque os percentuais de aumento do índice de descompressão foram tão elevados na condição não inundada quando comparado com os percentuais de aumento observados na condição inundada.

Verifica-se ainda que tanto o índice de compressão, quanto o índice de descompressão apresentaram uma tendência de crescimento com o aumento do teor de fibra, de modo, não linear. O aumento dos parâmetros de compressibilidade do solo mediante adição de fibras também foi verificado por Bueno *et al.* (1996). A tendência de não linearidade de crescimento dos parâmetros de compressibilidade com adição de fibras de coco estão de acordo com Shewbridge e Sitar (1989) e Nataraj *et al.* (1996).

No que se refere a tensão de sobre adensamento, verifica-se que pelo método de Pacheco e Silva a mesma foi reduzida à medida que o teor de fibra foi aumentado. Portanto, a mistura com teor de 2% de fibra de coco foi a que apresentou menor tensão de sobre adensamento em ambas as condições do ensaio. Para a condição não inundada observou-se os respectivos valores de tensão de sobre adensamento 280, 250, 180 e 130 kPa para as misturas com 0, 0,5, 1 e 2% de fibra de coco. Já na condição inundada as misturas com 0, 0,5, 1 e 2% de fibra de coco apresentaram, respectivamente, os seguintes valores de tensão de sobre adensamento 220, 180, 150 e 120 kPa. Nesse sentido, nota-se que a adição de 2% de fibra de coco ocasionou uma redução de 150 kPa na tensão de sobre adensamento em relação ao solo natural para a condição não inundada e 100 kPa na tensão de sobre adensamento em relação ao solo natural para a condição inundada.

4.4 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

Na Tabela 12 são apresentados os resultados da condutividade hidráulica saturada do solo natural e das misturas com os diferentes teores de fibras de coco. O solo natural apresentou coeficiente de condutividade hidráulica de $1,01 \times 10^{-9}$ m/s, nota-se que as misturas com 0,5 e 1% de fibras de coco apresentaram coeficiente de condutividade hidráulica semelhante ao coeficiente do solo natural com cerca de $1,20 \times 10^{-9}$ m/s e 1,43

$\times 10^{-9}$ m/s, respectivamente. Estes resultados corroboram com Miller e Rifai (2004) que avaliaram misturas de solo argiloso (classificado como CL) com fibras de polipropileno e não observaram mudanças na ordem de grandeza da condutividade hidráulica para o teor de até 1% de fibras nas misturas.

Por outro lado, a mistura com teor de 2% de fibras de coco apresentou aumento no coeficiente de condutividade hidráulica em uma ordem de grandeza em relação ao coeficiente de condutividade hidráulica do solo natural, sendo observado um valor de $2,87 \times 10^{-8}$ m/s. Este resultado está de acordo com os relatos de Maher e Ho (1994) que relataram aumentos na condutividade hidráulica para teores de fibras a partir de 1% ao avaliar uma argila caulinita reforçada com fibras de polipropileno e vidro. Diferente do observado neste trabalho, Al Wahab e El-Kedrah (1995) relataram acréscimos em mais de duas ordens de grandezas na condutividade hidráulica para o teor de 2% de fibras avaliando um solo argiloso reforçado com fibras de polipropileno. A natureza polar da fibra vegetal, diferente da fibra plomérica que é apolar, deve ter contribuído para o menor aumento observado da condutividade hidráulica na mistura com 2% de reforço.

Tabela 12 - Condutividade hidráulica saturada do solo natural e das misturas solo-fibra

Teor de Fibra (%)	$K_{\text{água}}$ (m/s)
0	$1,01 \times 10^{-9}$
0,5	$1,20 \times 10^{-9}$
1	$1,43 \times 10^{-9}$
2	$2,87 \times 10^{-8}$

Fonte: O autor

É possível que para a mistura com teor de 2% de fibras de coco, um dos fatores que tenham proporcionado aumentos na condutividade hidráulica seja pelo mesmo fator que a mistura apresentou o pior desempenho mecânico, isto é, a perda de adesão solo-fibra. A quantidade de fibras presentes nesta mistura aumenta os contatos fibra-fibra de modo a criar mais vazios e conseqüentemente aumento na condutividade hidráulica. Vale ressaltar que o número de vazios é apenas um dos fatores que influenciam na condutividade, porém a mesma também é influenciada pelo forma e distribuição dos grãos, o tipo de fluídos permeante, o nível do gradiente hidráulico, dentre outros (HEINECK, 2002).

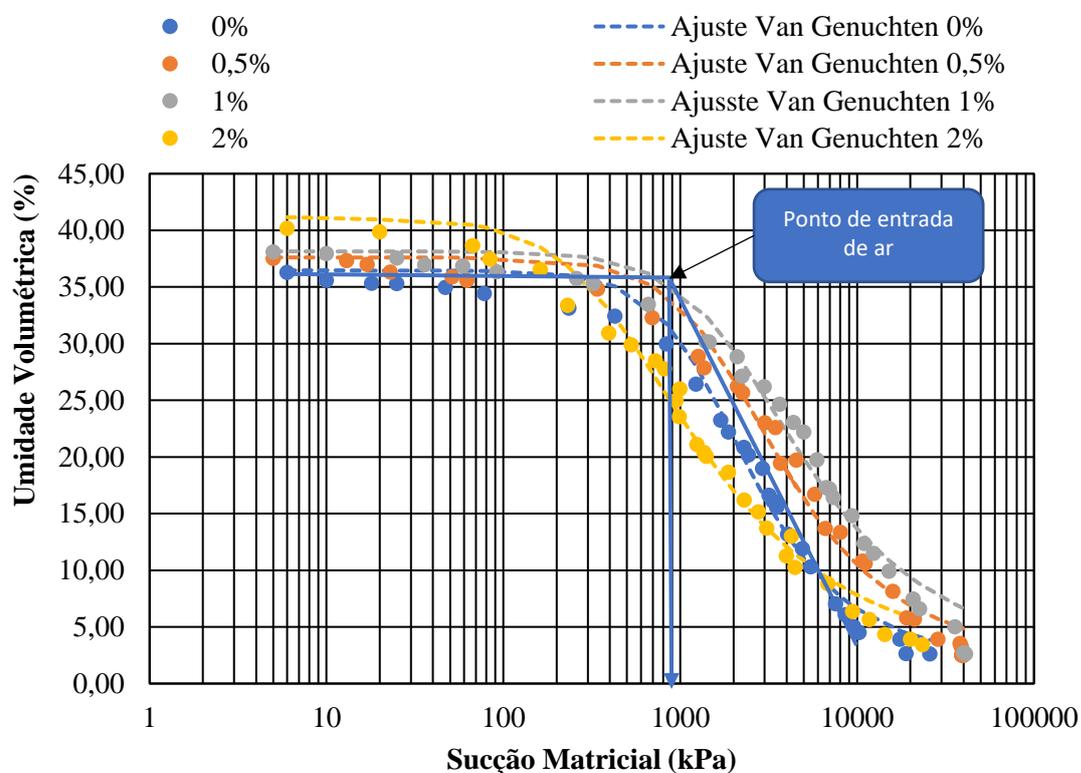
Para o quesito condutividade hidráulica é provável que as misturas com teores de

até 1% de fibra de coco possam ser utilizadas como material geotécnico de sistemas construtivos, tendo em vista que a fibra de coco nestas proporções não influenciou significativamente esta propriedade em relação ao solo natural. Segundo a USEPA (2007), a camada de cobertura final de aterros sanitários deve ter uma condutividade hidráulica menor que condutividade de fundo do aterro ou ser menor que 10^{-7} m/s. De acordo com este critério, por exemplo, até a mistura com 2% de fibras pode ser considerada como adequada para camadas de cobertura final de aterros sanitários.

No entanto, assim como relatado anteriormente no quesito de resistência ao cisalhamento, é importante salientar que mesmo a fibra de coco sendo um material de difícil biodegradação devem ser realizados ensaios para verificar o comportamento da condutividade hidráulica ao longo do tempo, para aferir sua adequada aplicação em misturas como material geotécnico.

Na Figura 31 são apresentados os dados experimentais das curvas de retenção de água em termos da sucção matricial e umidade volumétrica, bem como suas respectivas curvas de ajuste.

Figura 31 - Curvas de retenção de água do solo natural e das misturas solo-fibra



Fonte: O autor

Os conjuntos de parâmetros de ajuste das curvas seguindo o modelo de van Genuchten (1980) que apresentaram maior coeficientes de determinação (R^2) são apresentados na Tabela 13. Ao analisar as curvas da Figura 31, observa-se que tanto o solo natural quanto as misturas apresentaram formato de curva unimodal. Embora adição de fibras a matriz do solo argiloso aumente a porosidade da mistura, a compactação promove homogeneização dos poros e redução dos macroporos, sendo a retenção de água comandada pelos microporos (FARIAS *et al.*, 2011). Isto explicaria, a razão pelo qual o solo natural e as misturas apresentaram este comportamento. Além disto, a fibra de coco por se tratar de um material flexível e as forças de adesão solo-fibra podem ter contribuído neste comportamento.

Os parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten (1980) apresentados na Tabela 13 proporcionaram coeficientes de determinação elevados (R^2) indicando que o modelo numérico adotado apresentou ajuste adequado com capacidade de explicar mais de 98% dos dados experimentais.

Tabela 13 - Parâmetros da equação de van Genuchten (1980) e coeficientes de determinação (R^2) obtidos nos ajustes das curvas de retenção de água do solo natural e das misturas

Teor de Fibra (%)	a	n	m	R^2
0	$7,00 \times 10^{-4}$	2,050	0,512	0,9847
0,5	$5,55 \times 10^{-4}$	1,839	0,456	0,9833
1	$4,88 \times 10^{-4}$	1,708	0,414	0,9866
2	$2,30 \times 10^{-3}$	1,610	0,379	0,9844

Fonte: O autor

Ao comparar a curva do solo natural com as curvas das diferentes misturas solo-fibra na Figura 31 é possível observar que as curvas das misturas com 0,5 e 1% de fibras permaneceram do lado direito do gráfico em relação a curva do solo natural. Isto indica que a presença destes conteúdos de fibras de coco na matriz de solo argiloso aumentou a retenção de água para os mesmos níveis de sucção. Já a mistura com 2% apresentou um trecho da curva, entre 200 e 5000 kPa de sucção, do lado esquerdo do gráfico em relação a curva do solo natural, indicando que neste trecho a retenção de água da mistura é menor do que o solo natural.

As curvas das misturas com 0,5 e 1% de fibras de coco apresentaram comportamento muito semelhante entre si e em relação ao solo natural, porém é possível verificar em ambas as misturas aumentos nas umidades volumétricas de saturação e residual em comparação ao solo natural. As duas misturas apresentaram também pequenos aumentos no trecho de saturação das curvas, isto é, no trecho antes do ponto de entrada de ar quando comparada ao solo natural, indicando com isto que a adição de 0,5 e 1% de fibras de coco ao solo argiloso aumentou a sucção de entrada de ar.

Já a mistura com 2% de fibra de coco apresentou comportamento diferente das demais curvas das misturas e do solo natural. Observa-se que para este conteúdo de fibras também há aumento nas umidades volumétricas de saturação e residual, porém o trecho antes do ponto de entrada é menor do que o trecho das demais misturas e do solo natural, indicando que houve redução do nível de sucção de entrada de ar desta mistura em relação as demais misturas e o solo natural.

A adição das fibras de coco aumenta os vazios das misturas o que induz a uma maior capacidade de armazenamento de água em relação ao solo natural, isto explica o motivo pelo qual a umidade volumétrica de saturação apresentou relação diretamente proporcional ao conteúdo de fibra. Para Vanapalli, Fredlund e Pufahl (1999) a estrutura dos solos compactados é um dos principais fatores que influenciam na curva de retenção de água. Neste sentido, o aumento de vazios e a falta de adesão solo-fibra provavelmente foram os principais responsáveis pela redução do ponto de entrada de ar observado na mistura de 2% em relação as demais misturas e o solo natural. Embora as misturas com 0,5 e 1% de fibras de coco tenham maiores índices de vazios do que o solo natural, o que poderia justificar o aumento do ponto de entrada de ar nestas misturas são as maiores forças de adesão solo-fibra presentes nestas misturas. Provavelmente a microestrutura destas misturas proporcionaram um arranjo estrutural mais consolidado que dificultou a entrada de ar.

Os parâmetros obtidos através das curvas de retenção de água do solo natural e das misturas são apresentados na Tabela 14. Observa-se que o ponto de entrada do solo natural foi da ordem de 900 kPa e das misturas com 0,5, 1 e 2% foram de 1000, 1125 e 400 kPa, respectivamente. Em termos percentuais, estes valores representaram aumentos com cerca de 11% para a mistura com 0,5% de fibras, 25% para a mistura com 1% de fibras e uma redução de 56% para a mistura com 2% de fibras, ambos em relação ao solo natural. Estes resultados indicam que as misturas com 0,5 e 1% de fibras por apresentar melhor adesão solo-fibra refletiu em um maior nível de sucção para entrada de ar, em

diferentemente da mistura com 2% que apresentou maior porosidade e perda de adesão solo-fibra refletindo em um menor nível de sucção para entrada de ar.

Tabela 14 - Parâmetros obtidos através das curvas de retenção do solo natural e das misturas solo-fibra

Teor de Fibra (%)	ψ entrada de ar (kPa)	Δ de ψ entrada de ar (%)	θ residual (%)	Δ de θ residual (%)	C (%)	Δ de C (%)	θ_{cc} (%)	Δ de θ_{cc} (%)	WS_{max} (cm)	Δ de WS_{max} (%)
0	900	-	2,21	-	2,7	-	36,46	-	1458	-
0,5	1000	11%	2,28	3%	3,62	34%	37,59	3%	1504	3%
1	1125	25%	2,31	5%	3,79	40%	38,14	5%	1526	5%
2	400	-56%	2,23	1%	3,24	20%	40,95	12%	1638	12%

Fonte: O autor

No que se refere ao teor de umidade volumétrica residual, para o solo natural este parâmetro foi um valor de 2,21%, para a mistura com 0,5% de fibras foi de 2,28% representando um aumento de 3 % em relação ao solo natural, na mistura com 1% de fibras foi de 2,31% equivalente a 5% de aumento em relação ao solo natural e na mistura com 2% de fibras foi de 2,23% o correspondendo a 1% de aumento em relação ao solo natural. O teor de umidade volumétrica residual apresentou relação diretamente proporcional até 1% de fibras das misturas. Este comportamento pode estar relacionado com a energia superficial predominantemente polar das fibras vegetais relatado por Rosário *et al.* (2011). Já o menor teor de umidade volumétrica residual observado na mistura com 2% de fibra é provável que esteja relacionado ao aumento da porosidade que facilita a remoção de água dos vazios.

A capacidade sucção ou capacidade diferencial de umidade foi calculado para o trecho inicial da curva umidade volumétrica *versus* sucção matricial que apresenta tendência linear (sucção até 100 kPa). O solo natural apresentou valor de C da ordem de 2,70%, na mistura com 0,5% de fibras este valor foi de 3,62%, na mistura com 1% foi de 3,79% e na mistura com 2% foi de 3,24%. De acordo com Jucá (1990), a capacidade de sucção ou capacidade diferencial de umidade descreve a relação entre a quantidade de água que o material ganha ou perde devido à variação da sucção. Ou seja, a mistura com 0,5 e 1% de fibras possuem maior capacidade de perder ou ganhar umidade para a mesma faixa de variação de sucção do que o solo natural e a mistura com 2% de fibras. Alguns autores também observaram aumentos na capacidade de sucção nestes trechos devido a

adição de materiais de origem orgânica a matrizes de solos finos (LOPES, 2011; COSTA, 2015).

Quanto à capacidade de campo (θ_{cc}) foram observados valores da ordem de 36,46, 37,59, 38,14 e 40,95%, respectivamente, para o solo natural e as misturas com 0,5, 1 e 2%. Já quanto à capacidade de armazenamento de água máxima ($WS_{max.}$) foram observados os valores de 1458, 1504, 1526 e 1638cm, respectivamente, para o solo natural e as misturas com 0,5, 1 e 2%.

Os resultados observados de capacidade de campo do solo natural e das diferentes misturas sugerem que a adição de fibras de coco ao solo argiloso aumentou o conteúdo de água, depois que o material saturado drena e atinge o equilíbrio por ação da gravidade, tendo em vista que o conteúdo de fibras de coco apresentou relação diretamente proporcional com a capacidade de campo. Isto comprova que a inclusão da fibra de coco ao solo argiloso favoreceu para maior retenção de água. Já os resultados obtidos de capacidade de armazenamento de água máxima ressaltam o aumento dos vazios devido a adição de fibras de coco ao solo argiloso proporcionando conseqüentemente maior volume para armazenamento de água, tendo em vista que a capacidade de armazenamento de água máxima aumentou a medida que o conteúdo de fibra foi aumentado.

Visando aplicações geotécnicas estes resultados indicam melhoramento de características importantes para locais e aplicações onde os solos são sujeitos as variações de ciclos de umedecimento e secagem tais como, camadas de coberturas de aterros sanitários e barreiras de contaminantes. Estas características apresentadas principalmente pelas misturas com 0,5 e 1% de fibras de coco podem contribuir, por exemplo, para a redução da produção de percolados e emissão de gases através da camada de cobertura dos aterros sanitários ou barreiras de contaminantes. No entanto, vale ressaltar que é fundamental compreender o comportamento da retenção de água mediante a degradação da fibra de coco ao longo do tempo para analisar a adequação deste material em aplicações deste tipo.

A condutividade hidráulica não saturada estimada a partir do modelo de van Genuchten (1980) foi ajustada utilizando os valores da condutividade hidráulica saturada e os parâmetros apresentados na Tabela 13, obtendo-se as equações 9, 10, 11 e 12, respectivamente para o solo natural, mistura com 0,5%, mistura com 1% e mistura com 2% de fibras de coco.

$$K(Se) = 1,01 \times 10^{-7} \times Se^{0,5} \left[1 - \left(1 - Se^{\frac{1}{0,512}} \right)^{0,512} \right]^2 \quad \text{Equação (9)}$$

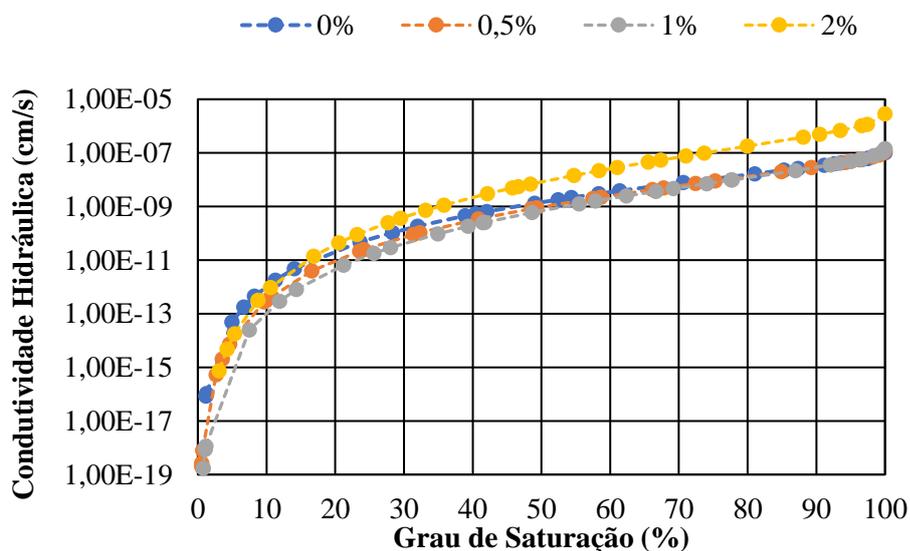
$$K(Se) = 1,20 \times 10^{-7} \times Se^{0,5} \left[1 - \left(1 - Se^{\frac{1}{0,456}} \right)^{0,456} \right]^2 \quad \text{Equação (10)}$$

$$K(Se) = 1,43 \times 10^{-7} \times Se^{0,5} \left[1 - \left(1 - Se^{\frac{1}{0,414}} \right)^{0,414} \right]^2 \quad \text{Equação (11)}$$

$$K(Se) = 2,87 \times 10^{-6} \times Se^{0,5} \left[1 - \left(1 - Se^{\frac{1}{0,379}} \right)^{0,379} \right]^2 \quad \text{Equação (12)}$$

Na Figura 32 são apresentadas as curvas ajustadas da condutividade hidráulica não saturada em função do grau de saturação do solo natural e das misturas solo-fibra a partir das equações apresentadas a cima.

Figura 32 - Curvas grau saturação versus condutividade hidráulica não saturadas ajustadas a partir do modelo de van Genuchten (1980) do solo natural e das misturas solo-fibras



Fonte: O autor

Nota-se que as curvas apresentaram formatos semelhantes, porém a curva da mistura com 2% de prevaleceu acima da curva do solo natural e das demais misturas que

apresentaram curvas bastante próximas, porém alguns trechos se encontram abaixo da curva do solo natural (a partir do grau de saturação de 10% para a mistura com 2% e a partir do grau de saturação de 40% para as misturas com 0,5 e 1% de fibras). Isto indica que de modo geral a condutividade hidráulica não saturada da mistura com 2% é maior em relação ao solo natural, já condutividade hidráulica não saturada das misturas com 0,5 e 1% de fibras a depender do grau de saturação pode ser bastante semelhante ou ligeiramente menor do que o solo natural. É provável que este comportamento esteja mais associado com a condutividade hidráulica saturada mais elevada apresentada pela mistura com 2% de fibras.

Verifica-se ainda pela Figura 32 que a solo natural apresentou uma variação de condutividade hidráulica em função do grau de saturação da ordem de 10^{-7} até 10^{-16} cm/s, já a mistura com 0,5% apresentou variação da ordem de 10^{-7} até 10^{-19} cm/s, a mistura com 1% apresentou variação de 10^{-7} até 10^{-19} cm/s e a mistura com 2% apresentou variação de 10^{-6} até 10^{-15} cm/s. Estes resultados sugerem que a misturas, principalmente as misturas com 0,5 e 1%, podem apresentar desempenho adequado em aplicações onde baixos coeficientes de condutividade hidráulica em condições não saturadas sejam pré-requisitos como, por exemplo, camadas de base e cobertura de aterros sanitários e barreiras para contenção de contaminantes.

Na Tabela 15 são apresentados os valores referentes a sucção matricial e condutividade hidráulica não saturada nas condições de umidade ótima de compactação do ensaio Proctor normal do solo natural e das misturas solo-fibras.

Tabela 15 - Grau de saturação, umidade volumétrica, sucção matricial e condutividade hidráulica na condição de umidade ótima de compactação do solo natural e das misturas solo-fibras

Teor de Fibra (%)	$W_{ótima}$ (%)	Grau de Saturação (%)	θ (%)	$\Psi_{Umidade\ Ótima}$ (kPa)	Δ de $\psi_{Umidade\ Ótima}$ (%)	$K_{Umidade\ ótima}$ (cm/s)
0	19,2	88,2	32,38	769	-	$2,78 \times 10^{-8}$
0,5	19,4	83,6	31,67	1231	60%	$1,76 \times 10^{-8}$
1	19,6	80,2	31,3	1617	110%	$1,20 \times 10^{-8}$
2	20,5	78,2	32,72	407,5	-47%	$1,52 \times 10^{-7}$

Fonte: O autor

É possível observar pela Tabela 15 que embora o teor de umidade ótima tenha aumentado com a adição das fibras de coco, o grau de saturação reduziu em relação ao solo natural devido ao aumento do índice de vazios ocasionado pela inclusão das fibras. Corroborando com a redução do grau de saturação, a sucção matricial na condição de umidade ótima aumentou em relação ao valor apresentado pelo natural que foi de 769 kPa, sobretudo, para a mistura com 0,5 (1231 kPa \cong 60% de aumento) e a mistura com 1% de fibras (1617 kPa \cong 110% de aumento). Já a mistura com 2% mesmo apresentando o menor grau de saturação apresentou apenas 407,5 kPa de sucção matricial, representando uma redução de 47%. Estes resultados confirmam que o comprometimento da adesão solo-fibra na mistura com 2% de fibras proporcionou aumento dos poros comprometendo a retenção de água desta mistura em relação as demais. Isto explica o valor mais baixo de sucção matricial na umidade ótima desta mistura.

No que se refere a condutividade hidráulica na condição de umidade ótima o solo natural e as misturas com 0,5 e 1% de fibras apresentaram coeficiente da ordem de 10^{-8} cm/s. Já a mistura com 2% de fibra apresentou coeficiente da ordem de 10^{-7} cm/s. Nota-se que da condição saturada para a condição de umidade ótima tanto o solo natural, quanto as misturas apresentaram uma redução de uma ordem de grandeza.

Para Richard *et al.* (2001) em solos compactados a sucção e a condutividade hidráulica não saturada dependem da distribuição e geometria dos poros, isto é, da sua estrutura. Os dados obtidos para estes parâmetros refletem este conceito, tendo em vista que o conteúdo de até 1% de fibras de coco adicionados ao solo argiloso não apresentou aumentos significativos no teor de umidade ótima e densidade seca. Além disto, os resultados de resistência ao cisalhamento e condutividade hidráulica saturada indicaram que houve comprometimento da adesão solo-fibra na mistura com 2% de fibras, fator diretamente relacionado a estrutura.

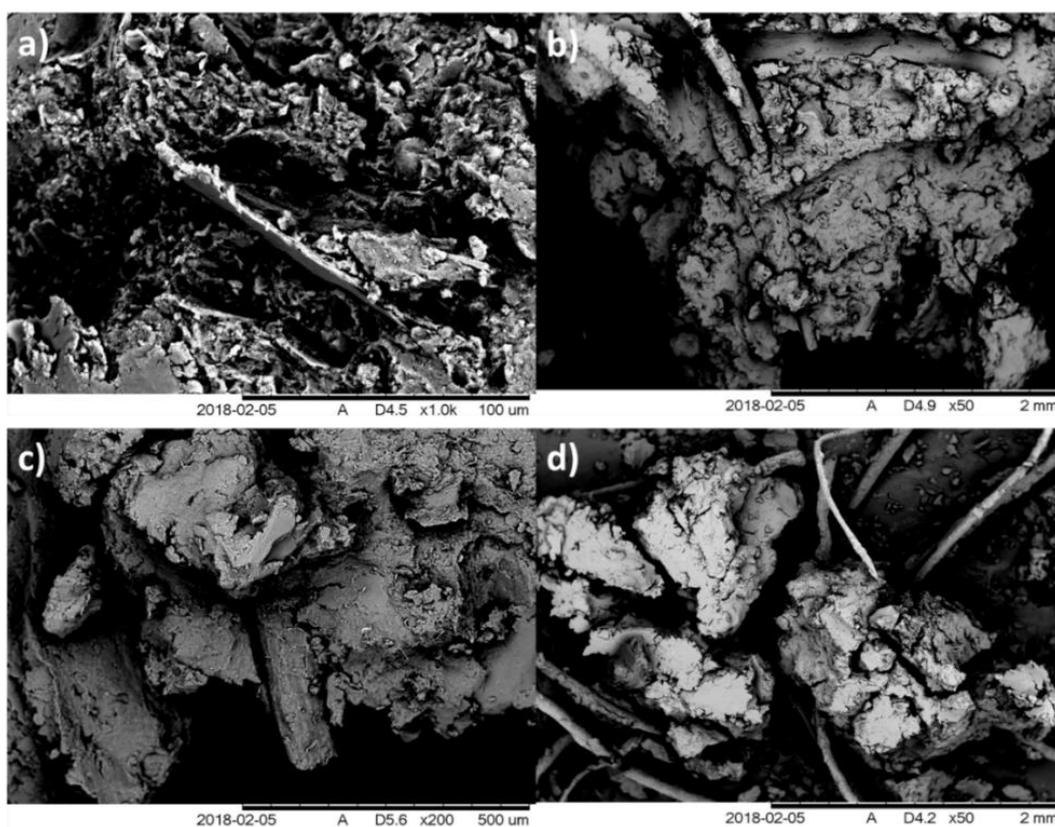
4.5 ANÁLISES DA INTERFACE SOLO-FIBRA

As micrografias realizadas para as misturas com diferentes teores de fibras de coco são apresentadas na Figura 33. Em todas as misturas nota-se que não houve rompimento das fibras de coco no ensaio de cisalhamento direto. Isto indica que os elementos no interior da matriz apresentam capacidade de suportar adequadamente os níveis de tensões adotados. Este comportamento também foi verificado por Anagnostopoulos, Tzetzis e Berketis (2013) analisando micrografias de misturas de solo argiloso (CL) e fibras de

polipropileno. Estes resultados revelam que para esta finalidade de reforço de solos, a fibra de coco que é de origem vegetal apresentou desempenho semelhante a uma fibra sintética como a de polipropileno.

É possível verificar ainda que a nível de escala microscópica as partículas de argila se aglomeraram ao redor da fibra proporcionam um embutimento da mesma na matriz. No entanto, este embutimento é mais perceptível para as misturas com 0,5 e 1% de fibras (Figuras 33a, 33b e 33c). É provável que este comportamento tenha favorecido na transmissão das solicitações mecânicas da matriz para a fibra, resultando no melhor desempenho da resistência ao cisalhamento do conjunto solo-fibra apresentados por estas misturas. Além disto, este comportamento proporcionou uma estrutura que resultou em menores índices de compressão primária, menor condutividade hidráulica saturada e não saturada e maior capacidade retenção de água em comparação a mistura com 2% de fibras.

Figura 33 - Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das blendas com as diferentes porcentagens de fibra de coco: Em a) ampliação de 1000x da mistura com 0,5% de fibras; Em b) aumento de 50x da mistura com 1% de fibras; Em c) aumento de 200x da mistura com 1% de fibras; e em d) aumento de 50x da mistura com 2% de fibras

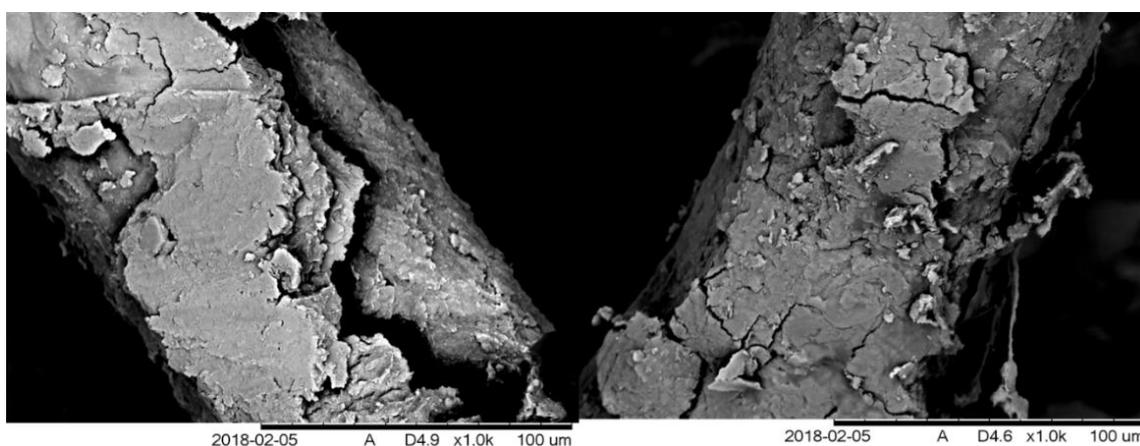


Fonte: O autor

Apesar da distribuição das fibras de coco ter sido de modo aleatório, na Figura 33d nota-se que existe uma tendência de aglomeração das fibras na mistura com 2%. Isto contribui para que haja pouca interação entre o solo e a fibra. Esta aglomeração dos elementos de reforço nesta mistura aumentou os contatos fibras-fibra, comprometendo a adesão da matriz ao reforço. A falta de adesão da matriz ao reforço proporciona fragilidades pontuais, onde possivelmente pode haver maior compressibilidade, o que poderia gerar recalques diferenciais em camadas compactadas com estas proporções, além de gerar caminhos preferenciais para percolação da água e macroporos de menor retenção de água.

Através das imagens apresentadas na Figura 34, verifica-se que as partículas de argila permaneceram aderidas a superfície do material fibroso, após cisalhamento da amostra. Isto indica que existe elevada ligação interfacial devido à forte compatibilidade entre a matriz e o reforço.

Figura 34 - Imagens do solo argiloso aderido na superfície das fibras ampliadas em 1000x das misturas com 0,5 (imagem à esquerda) e 1% (imagem à direita)



Fonte: O autor

Existem alguns possíveis mecanismos para explicar a adesão das partículas de argila a superfície da fibra. Os principais mecanismos possíveis são a adesão mecânica e adesão por atração eletrostática entre matriz e a fibra. No caso de adesão mecânica, ocorre na etapa de consolidação do ensaio de cisalhamento, que devido a tensão normal aplicado ocorre deformações plásticas locais na fibra, criando cavidades que são preenchidas pela matriz que proporcionam uma ancoragem da mesma a superfície da fibra (TANG *et al.*,

2007; TANG *et al.*, 2010). Além disso, durante o processo de compactação das misturas, as partículas menores são pressionadas a penetrar nos poros da fibra fazendo com que ocorra também uma adesão mecânica (ANAGNOSTOPOULOS, TZETZIS e BERKETIS, 2013).

No caso de adesão por atração eletrostática existem nas fibras naturais grupos hidrofílicos presentes em sua estrutura química, sendo que esses grupos conferem às fibras naturais uma característica polar (ALBINANTE, PACHECO e VISCONTE, 2013). Neste sentido, caso a matriz da mistura possua característica apolar haverá pouca adesão a superfície da fibra devido à falta de afinidade eletrostática entre a matriz e a fibra (IOZZI *et al.*, 2010). Por outro lado, caso a matriz do compósito possua característica polar, haverá adesão devido atração eletrostática entre os materiais.

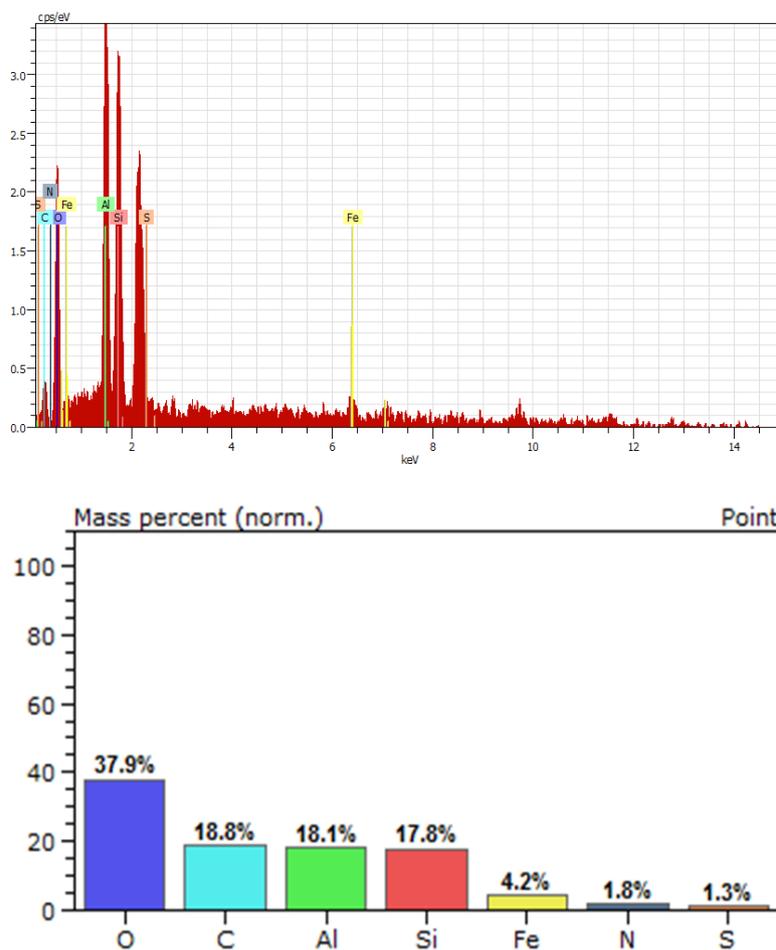
Os solos argilosos são formados por diversos minerais cujo tipo e quantidade influenciam na natureza eletrostática do material. As partículas de argilas são constituídas por lamelas delgadas que, geralmente, são carregadas negativamente na superfície e positivamente nas bordas favorecendo a ocorrência de interações eletrostáticas (MARIANI, VILLALBA e ANAISSI, 2013). Nesse sentido, a distribuição de cargas nas partículas de argila e a energia superficial polar da fibra devem ter favorecido a adesão eletrostática entre a matriz de solo argiloso e a superfície das fibras de coco.

Nas Figuras 35, 36 e 37 são apresentadas as análises elementares realizadas na zona interfacial solo-fibra para a mistura com 0,5, 1 e 2%, respectivamente.

Nas misturas que apresentaram melhor adesão solo-fibra, isto é, conteúdo de 0,5 e 1% de fibra, verificou-se teores próximos de oxigênio, carbono, alumínio, silício, ferro, nitrogênio e enxofre. A interface solo-fibra da mistura com 0,5% de fibras apresentou teores de 37,9% de oxigênio, 18,8% de carbono, 18,1% de alumínio, 17,8% de silício, 4,2% de ferro, 1,8% de nitrogênio e 1,3% de enxofre (Figura 35). Já a interface solo-fibra da mistura com 1% de fibras apresentou teores de 38,6% de oxigênio, 18,3% de carbono, 18,9% de alumínio, 17,7% de silício, 3,9% de ferro, 1,5% de nitrogênio e 1,2% de enxofre (Figura 36).

Por outro lado, a análise elementar da zona interfacial da mistura com 2% de fibras onde foi verificada redução da adesão solo-fibra estes teores foram de 32,9% de oxigênio, 49,7% de carbono, 7,1% de alumínio, 7,8% de silício, 1,6% de ferro e 0,8% de enxofre (Figura 37).

Figura 35 - Análise elemental da interface da mistura com 0,5% pela espectroscopia de energia dispersiva (EDS)



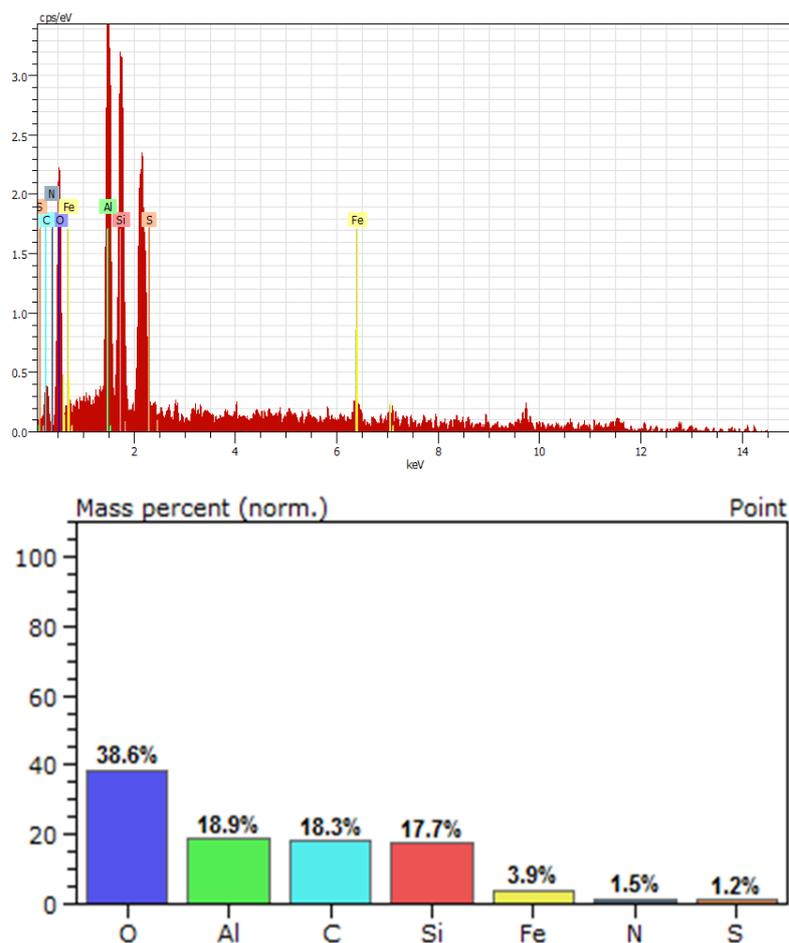
Fonte: O autor

Os argilominerais presentes na fração argiloso do solo são constituídos por silicatos de Al, Fe e Mg hidratados com estrutura cristalina em camadas (COELHO, SANTOS e SANTOS, 2007). Além disto, Macedo *et al.* (2008) acrescenta que solos argilosos de coloração vermelha como o solo utilizado nas misturas estudadas apresentam comumente em sua composição predominância de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Portanto, os maiores teores de oxigênio, alumínio, silício e ferro observados nas misturas com 0,5 e 1% de fibras estão associados a maior quantidade de argilominerais presentes na interface solo-fibra destas misturas após o cisalhamento direto do conjunto, confirmando que há maior interação solo-fibra para as misturas com até 1% de conteúdo de fibras.

Por outro lado, Corradini *et al.* (2009) descrevem que as cadeias de celulose das fibras vegetais, como as fibras oriundas da casca do coco, consistem em um polissacarídeo elementalmente formado de carbono, oxigênio e hidrogênio. Neste sentido, o maior teor de carbono e os menores teores de alumínio, silício e ferro

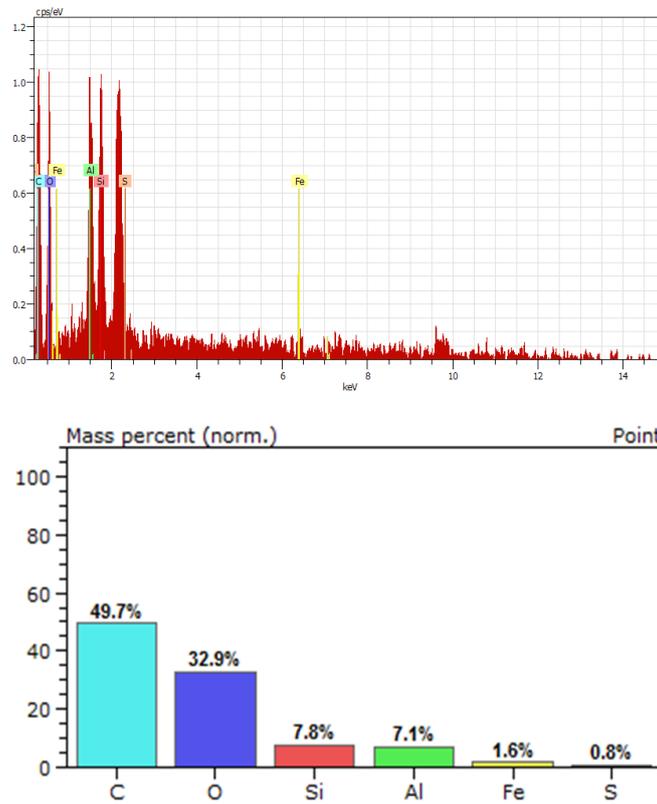
observados na mistura com 2% de fibras estão relacionados com a maior presença de tecidos vegetais e menor presença de argilominerais na interface solo-fibra desta mistura. Este resultado confirma que para o conteúdo de 2% de fibras na mistura o que prevalecem são os contatos fibras-fibras que comprometem a adesão matriz-reforço do compósito.

Figura 36 - Análise elementar da interface da mistura com 1% pela espectroscopia de energia dispersiva (EDS)



Fonte: O autor

Figura 37 - Análise elementar da interface da mistura com 2% pela espectroscopia de energia dispersiva (EDS)



Fonte: O autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se compreender que a adição de diferentes percentuais de fibras curtas de coco, distribuídas aleatoriamente em uma matriz de solo argiloso, tem influências significativas na compactação, resistência ao cisalhamento, compressibilidade, condutividade hidráulica, curva de retenção de água e na microestrutura do compósito que provavelmente podem favorecer determinadas aplicações geotécnicas, tais como barreiras de contenção de contaminantes e camadas de bases e coberturas de aterros sanitários.

De modo particular, pode-se concluir que o ensaio de compactação das misturas revelou que a inclusão das fibras de coco elevou o teor de umidade ótima e reduziu a densidade seca máxima à medida que o teor de fibra foi aumentado, proporcionando ao compósito maiores índices de vazios.

A resistência ao cisalhamento máxima das misturas foi obtida com o conteúdo de 1% de fibras de coco, evidenciando que para o quesito desempenho mecânico este conteúdo foi a proporção ótima de mistura. Foram observadas quedas de desempenho mecânico do compósito após o teor de 1% de fibras nas misturas devido à redução da adesão matriz-reforço. A inclusão da fibra de coco ao solo argiloso proporcionou, principalmente, aumento da resistência de pico, redução da queda pós pico e o aumento dos parâmetros coesão e ângulo de atrito, em condições não inundadas e inundadas.

A compressibilidade das misturas aumentou a medida que o teor de fibras de coco foi aumentado, não sendo observado nenhum teor de mistura ótima. Os principais efeitos observados da adição de fibras de coco foi o aumento da inclinação das curvas de compressibilidade, o aumento do trecho de compressão primária, a redução da tensão de sobre adensamento e o aumento do índice de compressão e descompressão em relação ao aumento do teor de fibras no compósito, independente da condição de inundações.

A condutividade hidráulica saturada das misturas não foi alterada para até 1% de fibra de coco devido à maior adesão solo-fibra para esta proporção de mistura. Verificou-se um potencial para aplicação do compósito em finalidades que requerem baixo coeficiente de condutividade hidráulica. No entanto, para a mistura com o teor de 2% de fibras a condutividade hidráulica do compósito foi aumentada em cerca de uma ordem de

grandeza.

As curvas características sucção-umidade demonstraram que a adição de fibras de coco ao solo argiloso aumentou a capacidade de retenção de água do compósito, para as misturas com teores de fibras de 0,5 e 1% devido ao menor volume de vazios e a maior interação solo-fibra destas misturas. As principais implicações observadas devido a adição de fibras de coco ao solo argiloso foi o aumento do ponto de entrada de ar, do teor de umidade volumétrica residual, da capacidade de campo e da capacidade de armazenamento de água máxima. Já a capacidade de sucção ou diferencial de umidade verificou-se aumentos em ambas as misturas, porém a mistura com 1% de fibras foi a que apresentou o maior valor.

A condutividade hidráulica não saturada referente a condição de umidade ótima de compactação apresentou uma redução de uma ordem de grandeza em relação ao coeficiente de condutividade hidráulica na condição saturada.

As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) indicaram que houve adesão das partículas de argila a superfície das fibras de coco, provavelmente dos tipos adesão mecânica e atração eletrostática, sendo este aspecto o principal responsável pelos comportamentos observados nas propriedades geotécnicas das misturas estudadas. Os principais efeitos da adição de fibras de coco em escala microscópica foi a perda de adesão verificada na mistura com 2% devido a tendência de aglomeração da fibra em locais pontuais da mistura prejudicando a interação solo-fibra.

As microanálises elementares via espectroscopia de energia dispersiva (EDS) realizadas na zona interfacial das misturas com 0,5 e 1% sugeriram que houve maior quantidade de óxidos de alumínio e ferro oriundos dos argilominerais do solo argiloso no contato solo-fibra, confirmando que há maior interação matriz-reforço nestas proporções de mistura. Já a análise realizada na mistura com 2% de fibras indica redução da quantidade de argilominerais e maior quantidade de tecidos vegetais devido a predominância de contatos fibras-fibras, confirmando que há comprometimento da adesão matriz-reforço nesta proporção.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados deste trabalho, sugerem-se os quesitos abaixo como possíveis trabalhos futuros:

- Realizar ensaios complementares ao programa experimental utilizado para verificar o efeito da adição da fibra de coco na resistência à compressão diametral, na histerese da curva característica sucção-umidade em trajetórias de umedecimento e secagem e na condutividade de diferentes líquidos contaminantes (lixiviados de aterros sanitários, derivados do petróleo, efluentes industriais ácidos e básicos, etc).
- Utilizar o mesmo programa experimental em misturas com fibras de coco e diferentes matrizes, tais como: solos arenosos, siltosos, solo-cimento, solo-cal, solo-bentonita, solo-resíduos da construção civil, etc. e misturas com o solo argiloso e diferentes fibras, tais como: sisal, bananeira, piaçava, jutá, polipropileno, etc.
- Analisar em laboratório, ensaios de aceleração da degradação da fibra de coco isoladamente e do compósito solo-fibra utilizando soluções ácidas e básicas para avaliar a durabilidade das misturas;
- Avaliar experimentalmente a variação dos mesmos comportamentos e parâmetros geotécnicos, investigado nesta pesquisa, ao longo do tempo, mediante a ciclos de secagem e umedecimento das misturas;
- Utilizar ensaios de coluna para avaliar a capacidade de infiltração, percolação e de reatividade das misturas solo argiloso-fibra de coco visando aplicações como camadas de base e cobertura de aterros sanitários e barreiras reativas para contenção de contaminantes.

REFERÊNCIAS

- ALBINANTE, S. R.; PACHECO, E. B. A. V.; VISCONTE, L. L. Y. Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas. **Química nova**, v.36, n.1, p.114-122, 2013.
- AL WAHAB, R. M.; EL-KEDRAH, M. A. **Using fibers to reduce tension cracks and shrink/swell in a compacted clay**. Geoenvironment 2000 – Characterization, Containment, Remediation And Performance In Environmental Geotechnics, 1995, New Orleans. Proceedings ASTM STP n. 46, ASTM, v.1, 2v, p.791-805, 1995.
- AL WAHAB, R.M.; AL-QURNA, H.H. **Fiber Reinforced cohesive soils for application in compacted earth structures**. Geosynthetics'95 Conference. 1995, Nashville. Proceedings v.2, p.433-466, 1995.
- ANAGNOSTOPOULOS, C. A.; TZETZIS, D.; BERKETIS, K. Shear strength behaviour of polypropylene fibre reinforced cohesive soils. **Geomechanics and Geoengineering**, v. 9, n. 3, p. 241-251, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182/88. **Solo – Ensaio de Compactação utilizando energia de compactação normal**. Rio de Janeiro – RJ. 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12007/90. **Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional**. Rio de Janeiro – RJ. 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14545. **Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável**. Rio de Janeiro -RJ. 2000.
- ASTM D3080-04. **Standart test method for direct shear testo f soils under consolidated drained conditions**. West Conshohocken, USA: American Society of Testing and Materials (ASTM) International; 2004.
- ASTM D5298-10. **Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper**. West Conshohocken, USA: American Society of Testing and Materials (ASTM) International; 2010.
- BOLAÑOS, R. E. Z. **Comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com fibras de coco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2013.
- BUENO, B.S.; LIMA, D.C.; TEIXEIRA, S.H.C.; RIBEIRO N.J. **Soil fiber reinforcement: basic understanding**. International Symposium on Environmental Geotechnology, 1996, San Diego. Anais. v.1, p. 878-884, 1996.
- CHANDLER, R. J. CRILLY, M. S. MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. **Proceedings of the Institute of Civil Engineering**, v.92, n. 2, p. 82-89, 1992.

- CAI, Y.; SHI, B. NG, C. W. W.; TANG, C. Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. **Engineering Geology**, v.87, p.230-240, 2006.
- CALLISTER JR., W. D.; **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 8. ed. LTC. Rio de Janeiro, 2012.
- CASAGRANDE, M.D.T; CONSOLI, N. C.; THOME, A.; PRIETTO, P.D.M. Comportamento em campo e laboratório de um solo reforçado com fibras. **Solos e Rochas**, v. 25, n.3, p. 247-255, 2002.
- CASAGRANDE, M.D.T; CONSOLI, N. C. Estudo do comportamento de um solo residual areno-siltoso reforçado com fibras de polipropileno. **Solos e Rochas**, v.25, n.3, p.223-230, 2002.
- CASAGRANDE, M. D.T; COOP, M. R.; CONSOLI, N. C. Behavior of a Fiber-Reinforced betonite at large shear displacements. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.132, n.11, p.1505-1508, 2006.
- CASTRO, A. L.; TIBA, P. R. T.; PANDOLFELLI, V. C. Fibras de polipropileno e sua influência no comportamento de concretos expostos a altas temperaturas. Revisão. **Cerâmica**, v.57, n.341, p.22-31, 2011.
- CAVALCANTE, L. V. A nova geografia da produção de coco no Brasil. **XI - Encontro Nacional da ANPEGE**, 2015. 2709-2720.
- COELHO, A. C. V.; SANTOS, P. de S.; SANTOS, H. de S. Argilas especiais: o que são, caracterização e propriedades. **Química nova**, v.30, n.1, p.146-152, 2007.
- CONSOLI, N. C.; COOP, M. R.; CASAGRANDE, M.D.T. Performance of a fiber-reinforced sand al large shear strains. **Geotechnique**, v.57, n.9, p.751-756, 2007.
- CONSOLI, N. C.; HEINECK, K. S.; CASAGRANDE, M. D. T.; COOP, M. R. Shear strength behavior of fiber-reinforced sand considering triaxial tests under distinct stress paths. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.133, n.11, p.1466-1469, 2007.
- CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; ULBRICH, L. A. Influence of fiber and cemente addition on behavior of Sandy soil. **Journal of Geotecnical and Geoenvironmental Engineering**, v.124, n.12, p.1211-1214, 1998.
- CONSOLI, N. C.; MORAES, R. R. de; FESTUGATO, L. Split tensile strength of monofilament polypropylene fiber-reinforced cemented sandy soils. **Geosynthetics International**, v.18, n.2, p.57-62, 2011.
- CONSOLI, N. C.; ROCHA, C. G. da; SILVANI, C. Effect of curing temperature on the strength of sand, coal fly ash, and lime blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.26, n.8, 2014.
- CORRADINI, E.; ROSA, M. de F.; MACEDO, B. P. de; PALADIN, P. D.; MATTOSO, L. H. C. Composição química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de coco verde. **Rev. Bras. Fruticultura**, v. 31, n. 3, p.837-846, 2009.

CORREA, C.; JUCÁ, J. F.; MOTTA, E. Análise da influência do plástico mole na resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.20, n.3, p.427-436.

COSTA, M. D. **Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solo**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

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

DONATO, M.; FOPPA, D.; CERATTI, J. A. P.; CONSOLI, N. C. Fibras de polipropileno como reforço para materiais geotécnicos. **Solos e Rochas**, v.27, n.2, p.161-176, 2006.

FARIAS, W.M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SILVA, G.F.; CAMPOS, I.C.O.; SANTOS NETO, P.M. **Influência da Compactação nos Micro e Mesoporos Nanoestruturados e na Área Superficial Específica de um solo Laterítico**. VII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, v. 1, Pirenópolis –Go, Kelps, p. 169-175, 2011.

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

FERREIRA NETO, M.; GHEYI, H. R.; HOLANDA, J. S. de; MEDEIROS, J. F. de e FERNANDES, P. D. Qualidade do fruto verde de coqueiro em função da irrigação com água salina. **Rev. bras. eng. agrícola e ambiental**, v. 6, n. 1, p. 69-75, 2002.

FESTUGATO, L.; MENDER, E.; BENEZRA, F. KIPPER, E. A.; CONSOLI, N. C. Fibre-reinforced cemented soils compressive and tensile strength assessment as a function of filament length. **Geotextiles and Geomembranes**, v.45, n.1, p.77-82.

FESTUGATO, L. **Comportamento de hidratação e resposta cisalhante cíclica de resíduo de mineração cimentado reforçado com fibras**. Tese (Doutorado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FIGUEIREDO, A. D. de. **Concreto reforçado com fibras**. Tese (Livre Docência) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

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

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

GOMES, L. G. N. **A bioengenharia como ferramenta para restauração ambiental das margens do Rio São Francisco**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, 2005.

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

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**, v.30, p.100-116, 2012.

HOLANDA, F.S. R.; ROCHA, I. P. da; OLIVEIRA, V. S. Estabilização de taludes marginais com técnicas de bioengenharia de solos no Baixo São Francisco. **Rev. Bras. eng. agrícola e ambiental**, v. 12, n. 6, p. 570-575, 2008.

IOZZI, M. A.; MARTINS, G. S.; MARTINS, M. A.; FERREIRA, F. C.; JOB, A. E.; MATTOSO, L. H. C. Estudo da influência de tratamentos químicos da fibra de sisal nas propriedades de compósitos com borracha nitrílica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 20, n. 1, 2010.

JUCÁ, J.F.T. **Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada**. Tese (Doutoramento em Engenharia Civil) Universidad Politécnica de Madrid, 1990.

KOERNER, R. M.; DANIEL, D. E. **Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps**, 1 ed. New York, ASCE PRESS, 1997.

KOLSCH, F. **Material values for some mechanical properties of domestic wastw**. In: Proceedings of the 5th International Landfil Symposium, Cagliari (Italy), v.2, p.711-729. 1995.

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

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C.; **Ciência e tecnologia: Compósitos estruturais**. Edgard Blücher, São Paulo, 2006.

LOPES, R.L. **Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco, 2011.

MACEDO, R.S.; MENEZES, R.R.; NEVES, G.A.; FERREIRA, H.C. Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v.54, p.411-417, 2008.

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

MALIAKAL, T.; THIYYAKKANDI, S. Influence of randomly distributed coir fibers on shear strength of clay. **Geotechnical and Geological Engineering**, v.31, n.2, p.425-433, 2013.

MARIANI, F. Q.; VILLALBA, J.C.; ANAISSI, F. J. Caracterização estrutural de argilas utilizando DRX com luz síncroton, MEV, FTIR e TG-DTG-DTA. **Orbital: The Electronic Journal of Chemistry**, v.5, n.4, p.249-256, 2013.

MARTINS, A. P.; WATANABE, T.; SILVA, P. L. R.; BORELLI, C.; MARCIANO, J. P. P.; SANCHES, R. A. Aproveitamento de fibra de coco verde para aplicabilidade têxtil. **Redige**, v. 4, n. 2, p. 111-16, 2013.

MATTHEWS, F.L., RAWLINGS, R.D. **Composite Materials: Engineering and Science**, 2ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2000.

MATTOS, A. L. A.; ROSA, M. de F.; CRISÓSTOMO, L. A.; BEZERRA, F. C.; CORREIA, D.; VERAS, L. de G. C. Beneficiamento da casca de coco verde. **Embrapa**

Agroindústria Tropical. 2014. Disponível em: <http://www.ceinfo.cnpat.embrapa.br/arquivos/artigo_3830.pdf/>. Acesso em: 04/02/2018. 2014.

MIGLIORINI, A. V.; GUIMARÃES, A. T. C.; OZÓRIO, B. P. M. Fibras de aço em blocos de concreto: estudo para utilização em ambiente marítimo. **Revista Matéria**, v. 17, p. 997-1008, 2012.

MILLER, C. J.; RIFAI, S. Fiber reinforcement for waste containment soil liners. **Journal of Environmental Engineering**, v. 130, n. 8, p. 891-895, 2004.

MOHAMED, A. E. M. K. Improvement of swelling clay properties using hay fibers. **Construction and Building Materials**, v.38, p.242-247, 2013.

MORANDINI, T. L. C.; SCHNEIDER, V. C. Compressibilidade em misturas de solo laterítico, bentonita e fibras para uso em barreiras de fluxo. **Holos Environment**, v.17, n.1, p.66-78, 2017.

NATARAJ, M.S.; ADDULA, H.R.; MCMANIS, K.L. **Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils.** International symposium on Environment al geotechnology , 3., San Diego, 1996. Proceedings. Pennsylvania: Technomic Publishing Co., Inc, v.1, p.826-835, 1996.

NOSSA, T. de S. **Estudo comparativo das tensões na interface de compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de carbono, aramida e vidro.** Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) Universidade Federal de São Carlos, 2011.

PALACIOS, M. A. P.; CASAGRANDE, M. D. T.; FOLLE, D.; ANVERSA, J. Estudo do comportamento de um compósito areia-fibra em extensão axial. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 2, n. 1, p. 33-39, 2015.

PANNIRSELVAM, P. V.; LIMA, F. A. M.; DANTAS, B. S.; SANTIAGO, B. H. S.; LADCHUMANANADASIVAM; FERNANDES, M. R. P. Desenvolvimento de projeto para produção de fibra de coco com inovação de tecnologia limpa e geração de energia. **Revista Analytica**, v. 15, p. 56-62, 2005.

PERET, C. M.; PANDOLFELLI, V. C. Fibras metálicas e sua influência no comportamento mecânico de concretos refratários durante a secagem. **Cerâmica**, v. 51, n. 317, p. 1-7, 2005.

PINO, G. A. H. **Biossorção de metais pedados utilizando pó de casca de coco verde (Cocos nucifera).** Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de materiais) Pontífca Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005.

PRABAKAR, J.; SRIDHAR, R. S. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. **Construction and Building Materials**, v.16, n.2, p.123-131, 2002.

RESENDE, F. M. **Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de concretos de resistência normal e de alto desempenho.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

RICHARD, G.; COUSIN, I.; SILLON, J.F.; BRUAND, A.; GUÉRIF, J. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal of Soil Science**, v.52, p.49-58, 2001.

ROSÁRIO, F.; PACHEKOSKI, W. M.; SILVEIRA, A. P. J.; SANTOS, S. F. dos; SAVASTANO JÚNIOR, H.; CASARIN, S. A. Resíduos de sisal como reforço em compósitos de polipropileno virgem e reciclado. **Polímeros**, v.21, p.90-97, 2011.

ROSA, M. F.; MATTOS, A. L. A.; CRISÓSTOMO, L. A.; FIGUEIREDO, M. C. B. de; BEZERRA, F. C.; VERAS, L. G.; CORREIA, D. **Aproveitamento da casca de coco verde**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2009, p. 164-190.

ROSA, M. de F.; SANTOS, F. J. de S.; MONTENEGRO, A. A. T.; ABREU, F. A. P. de; CORREIA, D.; ARAÚJO, F. B. S. de; NORÕES, E. R. de V. Caracterização do pó da casca de coco verde usado como substrato agrícola. **Embrapa Agroindústria Tropical. Comunicado Técnico 54**, Fortaleza - CE, 2001.

SALES, K. C. dos S. **Melhoramento de solos por inclusão de fibras naturais**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Universidade de Brasília, 2011.

SANTIAGO, G. A.; BOTARO, V. R.; CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L. Mechanical behavior of curauá treated fiber-reinforced sand. **Materials Science Forum**, v. 730-732, p. 319-324, 2012.

SATYANARAYANA, K. G.; GUIMARÃES, J. L.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 7, p. 1694-1709, 2007.

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

SILVA, A. C. D. Reaproveitamento da casca de coco verde. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v. 13, n. 5, p. 4077-4086, 2014.

SILVA, E.; MARQUES, M.; FORNARI JUNIOR, C. Aplicação de fibra de coco em matrizes cimentícias. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 8, p. 1555-1561, 2012.

SILVA, G. O.; JERONIMO, C. E. M. Estudo de alternativas para o aproveitamento de resíduos sólidos da industrialização do coco. **Revista Monografias Ambientais**, v. 10, n. 10, p. 2193-2208, 2012.

SILVEIRA, V.; ARAGÃO, T. R. de P. Viabilidade financeira de instalação de uma unidade de beneficiamento de cascas de coco verde. **Revista iPecege**, v. 2, n. 3, p. 72-85, 2016.

TANG, C.S.; SHI, B.; GAO, W.; CHEN, F.; CAI, Y. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v.25, n.3, p.194-202, 2007.

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

USEPA. **Inventory of U.S. Greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2005**. USEPA #420-R-07-002. Disponível em: <<http://epa.gov/climatechange/emissions/usinventoryreport.html>>. Acessado em: 11/ 12/2017.

VALE, A. C. D.; SOARES, J. B.; CASAGRANDE, M. D. T. Aplicabilidade de fibras de coco em misturas asfálticas tipo SMA. **In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS**, Campinas, 2007.

VANAPALLI, S.K. FREDLUND, D.G. PUFHAL, D.E. The Influence of Soil Structure and Stress History on the Soil-Water Characteristics of a Compacted Till. **Géotechnique**, v.49, n.2, p.143-159, 1999.

van GENUCHTEN. M. Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Proc. Soil. Soc. Am.**, v.44, v.5, p.892-898, 1980.

van GENUCHTEN, M.Th.; NIELSEN, D.R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. **Ann. Geoph.**, v.3, p.615-628, 1985.

VENTURA, A. M. F. M. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 21, n. 3-4, p. 10-19, 2009.