



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

LUCIANA REGINA CAJASEIRAS DE GUSMÃO

**INFLUÊNCIA DE CICLOS SECAGEM-MOLHAGEM NO COMPORTAMENTO
HIDRÁULICO-MECÂNICO DE MISTURAS COMPACTADAS DE SOLO
ARGILOSO COM FIBRAS DE COCO VERDE**

Recife

2020

LUCIANA REGINA CAJASEIRAS DE GUSMÃO

**INFLUÊNCIA DE CICLOS SECAGEM-MOLHAGEM NO COMPORTAMENTO
HIDRÁULICO-MECÂNICO DE MISTURAS COMPACTADAS DE SOLO
ARGILOSO COM FIBRAS DE COCO VERDE**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá

Recife

2020

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

G982i Gusmão, Luciana Regina Cajaseiras de.
 Influência de ciclos secagem-molhagem no comportamento hidráulico-
 mecânico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras de coco verde
 / Luciana Regina Cajaseiras de Gusmão – Recife, 2020.
 160 f.: figs., tabs., abrev. e siglas, símbolos.

 Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.
 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.
 Inclui referências.

 1. Engenharia Civil. 2. Ciclos secagem-molhagem. 3. Fibras de coco
 verde. 4. Solo argiloso compactado. 5. Comportamento hidráulico-mecânico.
 I. Jucá, José Fernando Thomé (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2020-194

LUCIANA REGINA CAJASEIRAS DE GUSMÃO

**INFLUÊNCIA DE CICLOS SECAGEM-MOLHAGEM NO COMPORTAMENTO
HIDRÁULICO-MECÂNICO DE MISTURAS COMPACTADAS DE SOLO
ARGILOSO COM FIBRAS DE COCO VERDE**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em: 21/01/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá (orientador)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof. Dr. Fernando Antônio Medeiros Marinho (examinador externo)
Universidade de São Paulo - USP

Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

AGRADECIMENTOS

Sozinha, jamais teria conseguido. Deixo aqui meus agradecimentos a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram com essa conquista, em especial:

Ao professor Dr. José Fernando Thomé Jucá pela orientação e, principalmente, confiança em momentos em que nem eu mesma acreditava que conseguiria; por oferecer condições de realização dessa pesquisa mesmo após minha necessidade de mudança para Porto Alegre/RS, com todas as dificuldades que a distância impôs.

Ao corpo técnico dos Laboratórios de Geotecnia da UFPE, em especial a Berg e Brito pela amizade e todo auxílio e dedicação na condução dos meus ensaios: sem vocês, sei que não conseguiria realizar toda a parte experimental no prazo, meus profundos agradecimentos! Agradeço também à Chico, pela disponibilidade e assistências teóricas.

À minha querida companheira de vida, Marina, por não ter me deixado desistir nas diversas vezes que eu não encontrava mais forças para continuar. Obrigada por sempre acreditar em mim, por compreender as ausências que esse processo impunha e por todo o suporte dado ao longo desse período. Essa vitória é nossa, meu amor!

Ao colega de pós-graduação e amigo Antônio Italcy, que além de inspirar esse trabalho, disponibilizar o solo e possibilitar a obtenção das fibras, ainda auxiliou tanto nas diversas dúvidas que foram surgindo, sempre com muita disponibilidade, comprometimento, paciência e competência. Não tenho palavras para agradecer tamanha ajuda, só tenho certeza do brilhante futuro acadêmico que te aguarda e me sinto sortuda de ter cruzado o seu caminho nesse momento de crescimento.

Aos colegas e amigos de trabalho da Seção de Engenharia do Tribunal Regional Eleitoral do Rio Grande do Sul (SENTE - TRE-RS) que possibilitaram alguns períodos de afastamento para que eu pudesse me dedicar exclusivamente à dissertação. Muito obrigada por compreenderem que minhas ausências no trabalho seriam essenciais para que eu tivesse tempo suficiente para escrever. Em especial, agradeço demais à amiga Natália por sacrificar seu tempo livre para “segurar as pontas” do setor nesse período, e também por toda a amizade construída ao longo da minha jornada no Rio Grande do Sul, sempre regada a muitas risadas e “fiascos” (hahaha).

Às amigas mestras, Comp, Nanda, Lud e Alanna, que além amizade desde a época da minha primeira graduação, sempre me lembravam as dificuldades inerentes da conclusão de qualquer dissertação (hahaha).

À Mário, Felipe, Guilbert, Arthur, Miguel, Bruno, Ilton, Thalita, Rafaela, Klayde e demais colegas da pós-graduação pelos conhecimentos compartilhados e momentos de descontração e incentivo proporcionados.

A todos do Grupo de Resíduos Sólidos da UFPE pela receptividade e exemplo de comprometimento.

À professora Dra. Karla Salvagni Heineck, da UFRGS, pela disponibilidade e auxílio na definição do tema do trabalho.

“Quem quer fazer algo, encontra um meio. Quem
não quer fazer nada, encontra uma desculpa.”
(Provérbio árabe)

RESUMO

Recursos produtivos potencialmente aproveitáveis mas tratados como resíduos são uma nítida indicação de desperdício. O coco verde chama a atenção pois sua casca é considerada resíduo enquanto representa a maior parte de seu volume e peso. A incorporação de materiais de bom desempenho e baixo custo para formação de compósitos surge como uma possibilidade de aproveitamento do resíduo de coco, a ser analisada quanto à viabilidade técnica para aplicações na geotecnia. Solos argilosos expostos a intempéries sofrem bastante influência de fatores ambientais como precipitação e estiagem: a repetição de ciclos secagem-molhagem (S-M) é compreendida como um dos principais fatores que impactam em aspectos como textura, arranjo, estrutura, cimentação de partículas, umidade, índice de vazios e resistência do solo. Objetivou-se analisar a influência de 5 e 10 ciclos S-M no comportamento hidráulico-mecânico de misturas compactadas de solo argiloso com 1% (em peso) de fibras oriundas dos resíduos do coco verde (*Cocos nucifera*) distribuídas aleatoriamente na matriz de solo. Os resultados obtidos demonstraram que a adição de fibras possibilitou maior integridade física das amostras submetidas aos ciclos em situação não confinada (saturação por capilaridade), com menor formação de fissuras aparentes. Já as amostras saturadas em situação confinada (permeâmetro) não apresentaram fissuras aparentes em sua superfície, independente da presença de fibras. As curvas características indicaram que a adição de fibras aumentou a retenção de água do solo para um mesmo nível de sucção, em especial na trajetória de secagem. Os modelos de condutividade hidráulica não saturada e permeabilidade relativa ao ar e à água em função do grau de saturação revelaram que a adição de fibras proporcionou maior percolação de água na trajetória de secagem, e maior fluxo de ar durante o umedecimento - a maior capacidade de retenção proporcionada pelas fibras promove mudança mais gradativa do grau de saturação. A adição de fibras proporcionou valores de permeabilidade vertical máxima ao ar maiores em até uma ordem de grandeza. O ‘solo puro’ sofreu pequena influência da passagem pelos ciclos secagem-molhagem, com gradativo aumento da permeabilidade ao ar até certo ponto de relativa estabilidade (3 a 5 ciclos). Com a adição de fibras essa relação não foi percebida, sugerindo que a fibra proporcionou maior estabilidade da percolação do ar ao longo do tempo. A sequência de sucessivos ciclos também não revelou tendência de modificação da condutividade vertical saturada à água para nenhuma das amostras. Por outro lado, o primeiro processo de secagem se mostrou responsável pelo aumento da permeabilidade à água em aproximadamente uma ordem de grandeza, tanto para o ‘solo puro’ quanto para o compósito. As microfissuras criadas já na primeira secagem parecem ter comprometido de forma definitiva e irreversível a

permeabilidade à água, criando caminhos preferenciais de fluxo que se mantiveram ao longo dos ciclos. Quanto à resistência ao cisalhamento, a passagem por 10 ciclos S-M gera uma tendência de redução da tensão cisalhante máxima, mas a presença das fibras minimizou um pouco esse efeito, sugerindo que o melhor comportamento mecânico promovido pelo acréscimo das fibras se mantém ao longo do tempo.

Palavras-chave: Ciclos secagem-molhagem. Fibras de coco verde. Solo argiloso compactado. Comportamento hidráulico-mecânico.

ABSTRACT

Productive resources potentially usable but treated as residue are a clear indication of waste. The green coconut draws attention because its shell is considered to be waste while it represents most of its volume and weight. The incorporation of materials of good performance and low cost for the formation of composites appears as a possibility of using coconut residue, to be analyzed in terms of technical feasibility for geotechnical applications. Clay soils exposed to weather conditions are greatly influenced by environmental factors such as precipitation and drought: the repetition of drying-wetting cycles (D-W) is understood as one of the main factors that impact on aspects such as texture, arrangement, structure, particles' cementation, humidity, void index and soil resistance. The objective was to analyze the influence of 5 and 10 D-W cycles on the hydraulic-mechanical behavior of compacted mixtures of clayey soil with 1% (by weight) of fibers from green coconut's (*Cocos nucifera*) residues randomly distributed in the soil matrix. The obtained results demonstrated that the addition of fibers allowed greater physical integrity of the samples submitted to the cycles in a non-confined situation (capillarity saturation), with less formation of apparent cracks. The samples saturated in a confined situation (permeameter) did not show any apparent cracks on their surface, regardless of the presence of fibers. The characteristic curves indicated that the addition of fibers increased the water retention of the soil for the same level of suction, especially in the drying path. The models of unsaturated hydraulic conductivity and relative permeability to air and water as functions of the degree of saturation revealed that the addition of fibers provided greater water percolation in the drying path, and greater air flow during wetting – the greater retention capacity provided by the fibers promotes a more gradual change in the degree of saturation. The addition of fibers provided maximum vertical air permeability values up to an order of magnitude. The 'pure soil' was slightly influenced by the passage through drying-wetting cycles, with a gradual increase in air permeability to a certain point of relative stability (3 to 5 cycles). With the addition of fibers, this relation was not perceived, suggesting that the fiber provided greater stability of air percolation over time. The sequence of successive cycles also did not reveal any tendency to modify the saturated vertical water conductivity for any of the samples. On the other hand, the first drying process proved to be responsible for increasing the water permeability by approximately an order of magnitude, both for the 'pure soil' and for the composite. The microcracks created already in the first drying seem to have permanently and irreversibly compromised water permeability, creating preferential flow paths that were maintained throughout the cycles. As for the shear strength, the passage through 10 D-W cycles

generates a tendency to reduce the maximum shear stress, but the presence of the fibers minimized this effect a bit, suggesting that the best mechanical behavior promoted by the addition of the fibers is maintained throughout time.

Keywords: Drying-wetting cycles. Green coconut fibers. Compacted clayey soil. Hydraulic-mechanical behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição geográfica da produção (mil frutos) de coco, 2007	25
Figura 2 – Distribuição geográfica da produção (mil frutos) de coco, 2017	26
Figura 3 – Histórico da produção de coco no Brasil (mil frutos) e área plantada ou destinada à colheita (ha), de 2000 a 2017	26
Figura 4 – Partes constituintes do coco	27
Figura 5 – Processamento do coco verde	30
Figura 6 – Fluxograma operacional do beneficiamento da casca de coco verde	32
Figura 7 – Classificação dos compósitos segundo o reforço	39
Figura 8 – Mecanismos de adesão na interface fibra-matriz	40
Figura 9 – Principais parâmetros da curva de retenção - exemplo	56
Figura 10 – Indicação de histerese em curvas	56
Figura 11 – Histerese quase inexistente	57
Figura 12 – Correlação entre curvas de um solo arenoso e um silte argiloso	60
Figura 13 – Condutividade hidráulica para diferentes valores de sucção média	62
Figura 14 – Curvas de distribuição granulométrica do solo com e sem defloculante	75
Figura 15 – Processo de separação gravimétrica do resíduo fibroso	76
Figura 16 – Distribuição gravimétrica do resíduo fibroso utilizado	76
Figura 17 – Preparação de CP ‘solo-fibra’	77
Figura 18 – Curvas de compactação - solo natural e misturas com fibra	78
Figura 19 – Rebaixamento de CP e moldagem de anel para ensaio de sucção	79
Figura 20 – CPs de solo-fibra após redução de altura	79
Figura 21 – Processo de saturação por capilaridade	81
Figura 22 – Fluxograma de parte do programa experimental	82
Figura 23 – Anel de sucção moldado	83
Figura 24 – Montagem de CP para realização de ensaio de condutividade hidráulica no equipamento Tri-flex 2 da <i>Soil Test</i> – ELE	86
Figura 25 – Rotâmetros utilizados para aferição do fluxo de ar	88
Figura 26 – Moldagem de amostra para realização de ensaio de cisalhamento direto	92
Figura 27 – CPs saturados por capilaridade em diversos ciclos	94
Figura 28 – CPs após 7º ciclo de saturação no permeâmetro (invertidos em relação ao sentido de execução dos ensaios)	96
Figura 29 – Curvas de retenção - trajetória de secagem	98

Figura 30 – Curvas de retenção - trajetória de umedecimento	98
Figura 31 – Curvas de retenção - ajustes de van Genuchten	99
Figura 32 – Condutividade hidráulica não saturada - modelo de van Genuchten.....	103
Figura 33 – Coeficiente de permeabilidade relativa do solo ao ar (K_{rar}) e à água (K_{rw}) em função do grau de saturação - modelo de van Genuchten	105
Figura 34 – Velocidade aparente do fluxo em cada CP ensaiado	107
Figura 35 – Velocidade aparente do fluxo para uma mesma pressão confinante.....	109
Figura 36 – Permeabilidade ao ar em cada CP ensaiado	111
Figura 37 – Permeabilidade ao ar para uma mesma pressão confinante atuante	112
Figura 38 – Comparação dos ciclos secagem-molhagem nos CPs.....	116
Figura 39 – Influência dos ciclos S-M na permeabilidade ao ar: CP-01	118
Figura 40 – Influência dos ciclos S-M na permeabilidade ao ar: CP-02	121
Figura 41 – Influência dos ciclos S-M na permeabilidade ao ar: CP-03	124
Figura 42 – Influência dos ciclos S-M na permeabilidade ao ar: CP-04	127
Figura 43 – Influência dos ciclos secagem-molhagem na permeabilidade à água.....	131
Figura 44 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto após 5 ciclos S-M	133
Figura 45 – Envoltórias de resistência máxima - 5 ciclos S-M.....	137
Figura 46 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto após 10 ciclos S-M	139
Figura 47 – Envoltórias de resistência máxima - 10 ciclos S-M.....	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção e área colhida dos principais países produtores de coco (2008)	25
Tabela 2 - Principais propriedades da fibra de coco verde.....	45
Tabela 3 - Composição química de algumas fibras vegetais (%).....	45
Tabela 4 - Propriedades físicas de fibras utilizadas como reforço	46
Tabela 5 - Propriedades físicas do solo	74
Tabela 6 - Propriedades químicas do solo	75
Tabela 7 - Parâmetros considerados para moldagem dos CPs	78
Tabela 8 - Resumo do programa experimental.....	80
Tabela 9 - Parâmetros da equação de van Genuchten e coeficientes de determinação (R^2) obtidos nos ajustes das curvas de retenção de água.....	98
Tabela 10 - Parâmetros obtidos através das curvas de retenção de água	100
Tabela 11 - Valores da condutividade e da permeabilidade intrínseca ao ar	115
Tabela 12 - Condutividade hidráulica saturada sem realização de secagem prévia (mesmo solo)	131
Tabela 13 - Valores da condutividade e da permeabilidade intrínseca à água	132
Tabela 14 - Tensões cisalhantes máximas e dados dos CPs - 5 ciclos S-M.....	134
Tabela 15 - Parâmetros de resistência máxima - 5 ciclos S-M.....	138
Tabela 16 - Tensões cisalhantes máximas e dados dos CPs - 10 ciclos	140
Tabela 17 - Parâmetros de resistência máxima - 10 ciclos.....	141
Tabela 18 - Tensão cisalhante máxima sem passagem por ciclos S-M.....	142
Tabela 19 - Variação dos valores de tensão cisalhante máxima após passagem por 10 ciclos S-M, em relação à condição original (sem ciclos)	142

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CP	Corpo de prova
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
MO	Matéria orgânica
pH	Potencial hidrogeniônico
S-M	Secagem-molhagem
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
C/N	Carbono/nitrogênio
c	Intercepto de coesão
Ca	Cálcio
CL	Argila inorgânica de baixa a média plasticidade
CO	Carbono orgânico
d_g	Densidade dos grãos
e	Índice de vazios
Fe	Ferro
K'	Potássio
K	Permeabilidade intrínseca
K_a	Permeabilidade intrínseca para fluidos compressíveis
K_{ia}	Permeabilidade intrínseca para fluidos incompressíveis
K_{rar}	Coeficiente de permeabilidade relativa do solo ao ar
K_{rw}	Coeficiente de permeabilidade relativa do solo à água
k_{ar}	Coeficiente de condutividade ao ar (“permeabilidade ao ar”)
k_w	Coeficiente de condutividade à água (“permeabilidade à água”)
Mg	Magnésio
N	Nitrogênio
Na	Sódio
P	Fósforo
R^2	Coeficiente de determinação
w	Teor de umidade
w_{ot}	Teor de umidade ótima de compactação
$\gamma_{máx}$	Peso específico aparente seco máximo
θ_{sat}	Teor de umidade volumétrica de saturação
θ_{res}	Teor de umidade volumétrica residual
θ_{cc}	Teor de umidade volumétrica correspondente à capacidade de campo
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
ψ	Sucção
σ	Tensão normal

τ	Tensão de cisalhamento
ϕ	Ângulo de atrito
Δ	Variação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVA.....	20
1.2	OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	22
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	22
2	REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1	O COCO VERDE: CARACTERÍSTICAS, PRODUÇÃO E CONSUMO.....	24
2.2	PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO DE COCO VERDE	28
2.3	APLICAÇÕES DO RESÍDUO DE COCO VERDE	33
2.4	DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS	37
2.5	COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS	41
2.6	FIBRAS VEGETAIS UTILIZADAS COMO REFORÇO	43
2.7	SOLOS ARGILOSOS REFORÇADOS COM FIBRAS	47
2.8	FLUXO EM MEIO POROSO.....	50
2.8.1	Fluxo de líquidos.....	50
2.8.2	Fluxo de gases	52
2.9	SOLOS NÃO SATURADOS.....	54
2.10	DURABILIDADE DE MATERIAIS.....	63
2.10.1	Ciclos secagem-molhagem no contexto geotécnico.....	65
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	74
3.1	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS	74
3.2	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DO COMPÓSITO	76
3.3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	80
3.3.1	Ciclos secagem-molhagem	80
3.3.2	Ensaio para determinação da curva de retenção de água e estimativa da condutividade hidráulica não saturada	82
3.3.3	Ensaio de condutividade hidráulica	86
3.3.3.1	Condutividade vertical ao ar.....	87
3.3.3.2	Condutividade vertical à água	89
3.3.4	Ensaio de cisalhamento direto.....	90
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
4.1	CICLOS SECAGEM-MOLHAGEM.....	93
4.2	CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA	97

4.3	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NÃO SATURADA	102
4.4	CONDUTIVIDADE AO AR	107
4.4.1	Validação da Lei de Darcy.....	107
4.4.2	Permeabilidade em função da pressão de confinamento	110
4.4.3	Permeabilidade em função dos ciclos secagem-molhagem	115
4.4.3.1	Comparação entre os CPs ensaiados	116
4.4.3.2	CP-01 ‘solo puro’	118
4.4.3.3	CP-02 ‘solo puro’	120
4.4.3.4	CP-03 ‘solo-fibra’	123
4.4.3.5	CP-04 ‘solo-fibra’	126
4.4.3.6	Comparação dos resultados	129
4.5	CONDUTIVIDADE À ÁGUA	130
4.5.1	Permeabilidade em função dos ciclos secagem-molhagem	130
4.5.2	Comparação entre os CPs ensaiados	132
4.6	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	132
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	144
5.1	CONCLUSÕES.....	144
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	146
	REFERÊNCIAS	148

1 INTRODUÇÃO

A sobrevivência humana, ao longo da história, se baseia na transformação de paisagens naturais para seu melhor aproveitamento. O notável crescimento populacional e desenvolvimento econômico, aliados à falta de consciência ecológica, tiveram como consequência a utilização indiscriminada dos recursos naturais. Com o passar do tempo, no entanto, cresceu a percepção da finitude (dos recursos) e atualmente há na sociedade uma preocupação cada vez maior com os impactos negativos ao meio ambiente, especialmente quanto à geração e destinação correta de resíduos.

Recursos produtivos potencialmente aproveitáveis mas tratados como resíduos são uma nítida indicação de desperdício. A busca pela sustentabilidade exige propostas viáveis de aproveitamento de resíduos, transformando-os em matérias-primas de novos produtos, com geração de emprego e renda. Alguns países possuem política de taxaço sobre produtos de difícil degradabilidade, o que acaba por estimular produtos recicláveis e biodegradáveis, de origem renovável. O Brasil possui programa de incentivo à reciclagem, o qual reduz a tributação dos reciclados e cria linhas de crédito específicas, impulsionando as cooperativas de catadores (SENHORAS, 2003).

Nesse contexto, o coco verde chama a atenção pois sua casca é considerada resíduo de um produto alimentício enquanto representa a maior parte de seu volume e peso. Não é à toa que o coqueiro é tido como “árvore da vida” em muitos países: entende-se que há possibilidade de aproveitamento de todas as suas partes para obtenção de inúmeros produtos e subprodutos (SILVA; JERÔNIMO, 2012; van DAM, 1999).

Responsável por quase 5% da produção mundial de coco, o Brasil é o país com a 4ª maior produção desse insumo (SILVEIRA; ARAGÃO, 2016), onde o Nordeste responde por cerca de 75% da produção nacional e mais da metade do consumo do coco verde (FERREIRA NETO *et al.*, 2002). Apenas em 2017, a área plantada ou destinada a colheita de coco em território nacional foi quase 217 mil hectares (IBGE, 2019). Pino (2005) afirma que a maior parte da produção se destina às agroindústrias para obtenção de derivados do coco utilizados na produção de gêneros alimentícios (coco ralado, leite de coco, bebidas, óleos, doces, biscoitos, chocolates, etc.), o que, segundo Silveira e Aragão (2016) absorve aproximadamente 70% da produção, enquanto os 30% restantes são comercializados no Nordeste (sendo 2/3 como água de coco).

A alta produção e consumo de água de coco, deliciosa e nutritiva, motivou a investigação das possibilidades de aproveitamento de sua casca, já que normalmente

corresponde a mais de 80% do seu peso total (ROSA *et al.*, 2001a) e representa cerca de 70% de todo lixo gerado nas praias brasileiras (ROSA *et al.*, 2009). Silva e Jerônimo (2012) chamam a atenção que o não aproveitamento desses resíduos representa, na prática, a eliminação de matérias-primas infinitas e renováveis de grande valor, enquanto poderiam ser utilizados em substituição de outros produtos cuja extração traz inúmeras desvantagens ecológicas, como a turfa e a vermiculita, por exemplo. Matérias-primas não utilizadas constituem desperdício e ainda geram gastos de desova significativos para a sociedade (SENHORAS, 2003).

A partir do beneficiamento desse rejeito é possível obter fibras e pó que serão matérias-primas na fabricação de inúmeros outros produtos, criando uma cadeia produtiva orientada à sustentabilidade (MARTINS *et al.*, 2013). Martins e Jesus Jr. (2011) chamam à atenção que entre 1990 e 2009, o Brasil passou de 10º para 4º maior produtor mundial de fibra de coco, com perspectivas de crescimento de produtividade e abrangência no mercado. A produção brasileira ainda é primordialmente destinada ao consumo interno, mas desde 2003 já realiza exportações, especialmente de mantas geotêxteis (ROSA *et al.*, 2009).

Tamanha produção carece de mercado consumidor compatível. Faz-se necessário, então, potencializar as aplicabilidades dessa nova matéria-prima para estimular o consumo sustentável. Rosa *et al.* (2009) afirmam que as características da fibra de coco a tornam adequada para reforçar materiais, especialmente na elaboração de compósitos, onde tende a reduzir a densidade do conjunto com bom potencial de alongamento e média capacidade de reforço. É importante observar que a capacidade aglutinante da lignina, presente em grande quantidade, traz possibilidade de melhoria do desempenho da interação fibra-matriz, assim como a ação do calor na formação do compósito.

Obras geotécnicas exigem características específicas, e por vezes os solos disponíveis em jazidas próximas aos locais ou não possuem propriedades adequadas para a finalidade desejada, ou não possuem volume suficiente para suprir as demandas locais, ou representam grande montante para a aquisição dos materiais. A incorporação de materiais de bom desempenho e baixo custo para formação de compósitos surge como uma possibilidade de aproveitamento do resíduo de coco, a ser analisada quanto à viabilidade técnica.

Solos coesivos são muito suscetíveis à fissuração devido a contrações que ocorrem com a redução significativa de sua umidade (MITCHELL, 1993). A ocorrência cíclica desse processo pode vir a comprometer o desempenho e eficiência de obras geotécnicas, tendo em vista que fissuras modificam as propriedades do solo, possibilitando mudanças na taxa de evaporação, redução da resistência e estabilidade, além de aumento da compressibilidade e

condutividade hidráulica (ALBRECHT; BENSON, 2001; CHERTKOV, 2000; DECARLO; SHOKRI, 2014; TANG *et al.*, 2010a).

Savastano Jr. e Pimentel (2000) apontam que fibras vegetais estão sujeitas a variações dimensionais devido à alta capacidade de absorção de água na variação de umidade. Esses autores, assim como Toledo Filho *et al.* (2003), acreditam que os materiais vegetais inseridos em compósitos tenham alterações de desempenho mecânico ao longo do tempo, a depender das condições de exposição. É essencial, então, investigar o comportamento do compósito solo-fibra nessa situação de exposição.

1.1 JUSTIFICATIVA

As condições climáticas resumidas em ciclos de secagem e umedecimento são consideradas os fatores ambientais que mais induzem danos a infraestruturas como rodovias e pavimentos em geral (ALLAM; SRIDHARAN, 1981). A repetição desse ciclo é compreendida como um dos principais fatores que impactam na textura, arranjo, cimentação de partículas, umidade e índice de vazios do solo (PAGLIAI; LA MARCA; LUCAMANTE, 1987; PIRES *et al.*, 2008); além da estrutura, resistência e estabilidade dos agregados do solo, aspectos que têm importante papel em suas propriedades físicas (PIRES; BACCHI; REICHARDT, 2007).

As investigações feitas sobre os efeitos de múltiplos ciclos S-M têm se concentrado muito mais nos casos dos solos expansivos ou estabilizados/melhorados, com o intuito de verificar estabilidade de taludes ou potencial de solidificação/estabilização das misturas. Os efeitos em solos naturais não expansivos, por outro lado, ainda não são muito bem conhecidos (HOSSAIN; LING-WEI; SONG, 2015).

O fenômeno do “aquecimento global” e as mudanças climáticas das últimas décadas, muito associadas às ações humanas, demonstram ainda mais a relevância de estudar os efeitos de ciclos secagem-molhagem (S-M) extremos com o intuito de melhor prever o comportamento geotécnico ao longo do tempo. Essa exposição, típica de camadas de coberturas finais de aterro sanitários ou barreiras verticais de contenção de contaminantes, ocorre em situações não saturadas do solo, de forma que é importante estabelecer parâmetros de controle tanto para infiltração de chuva quanto para emissão de gases baseados nas características dos solos a longo prazo.

A camada de cobertura final de um aterro sanitário deve minimizar ao máximo a infiltração de água e escoamento de biogás/gases de efeito estufa (GEE), sendo a permeabilidade um dos principais parâmetros utilizados para verificar seu comportamento ao

longo do tempo. O sistema deve, ainda, demandar pouca manutenção, ser resistente à erosão e aos recalques sem grandes deformações (LOPES, 2011). No Brasil, a maioria dos aterros utiliza camada homogênea de solo argiloso compactado em razão de seu baixo custo e baixa permeabilidade à água (MARIANO, 2008), especialmente porque ainda não há nenhuma exigência legal quanto ao tipo de material de sua constituição (LOPES, 2011).

A superfície final normalmente não é submetida a carregamentos externos ou processos de deformação do solo, mantendo sua estrutura de compactação ao longo do tempo. Fatores ambientais, como precipitação e estiagem, são os principais aspectos que afetam o comportamento desse solo e podem vir a comprometer o desempenho da camada de cobertura, em especial sua eficiência quanto à retenção de infiltração de líquidos e emissão de gases (LOPES, 2011; MARIANO, 2008), razão pela qual se torna interessante investigar o efeito de ciclos de secagem-molhagem na permeabilidade ao ar e à água.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento normalmente investigados não consideram a influência dos ciclos S-M, avaliação importante de ser feita para verificar o comportamento do compósito quando submetido a situações de maior exposição, em especial no caso de reforço com fibras vegetais, sujeitas a variações dimensionais que podem, com o tempo, comprometer a eficiência do composto. Ademais, misturas compactadas de solo com fibras fazem parte do contexto geotécnico não saturado, sendo importante compreender também a implicação da inclusão da fibra de coco na curva de retenção (ou curva característica) e na condutividade hidráulica não saturada do solo.

Diante desse contexto, alguns questionamentos científicos surgem:

- Quais modificações a adição de fibra de coco promove na curva de retenção e na condutividade hidráulica não saturada de solo argiloso compactado?
- A passagem por ciclos secagem-molhagem ocasiona fissuras em solo argiloso compactado? A presença de elemento de reforço minimiza o risco de fissuração?
- Como se dá a influência de ciclos secagem-molhagem em solo argiloso compactado na permeabilidade à água e ao ar? A adição de fibra de coco favorece a formação de caminhos preferenciais de fluxo?
- A melhoria de parâmetros de resistência ao cisalhamento obtida com o incremento de fibras se mantém após passagem por ciclos secagem-molhagem?

1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

O presente trabalho foi desenvolvido objetivando analisar a influência de 5 e 10 ciclos secagem-molhagem (S-M) no comportamento hidráulico-mecânico de misturas compactadas de solo argiloso com 1% (em peso) de fibras oriundas de resíduos do coco verde (*Cocos nucifera*) distribuídas aleatoriamente na matriz de solo. Para tanto, foram estabelecidos como objetivos específicos:

- a) comparar a influência do incremento de fibras de coco nas curvas características (sucção-umidade) – trajetórias de secagem e umedecimento – e nas curvas de condutividade hidráulica não saturada;
- b) avaliar as alterações que a inclusão de fibra de coco promove na condutividade vertical do solo seco ao ar em comparação com o ‘solo puro’, com execução de ciclos de S-M;
- c) verificar o efeito de diferentes pressões de confinamento na condutividade do solo seco ao ar, com e sem adição de fibras de coco;
- d) examinar a decorrência da inclusão de fibra de coco na condutividade vertical saturada à água do ‘solo puro’, com execução de ciclos de secagem-molhagem;
- e) averiguar o efeito de diferentes quantidades de ciclos S-M na resistência ao cisalhamento direto de solo argiloso compactado em situações sem e com inclusão de fibras de coco verde.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho é organizado em cinco capítulos:

- a) o primeiro traz uma introdução com breve contextualização relacionada às temáticas abordadas, seguida da justificativa do estudo, objetivos e estrutura da dissertação;
- b) o segundo trata da revisão de literatura que abrange os temas relacionados diretamente com a pesquisa, abordando a cultura do coco verde (resíduos gerados, processo de beneficiamento e aplicações atuais da fibra de coco); desenvolvimento de materiais compósitos – em especial com utilização de fibras vegetais; fluxo em meio poroso (líquidos e gases); solos não saturados e, por fim, a durabilidade de materiais, com foco nos ciclos S-M no contexto geotécnico;

- c) o terceiro descreve os materiais utilizadas e as etapas da metodologia realizadas na pesquisa, destacando a preparação das amostras de ‘solo-fibra’, os ciclos S-M, ensaios de determinação da curva de retenção de água e estimativa da condutividade hidráulica não saturada, de condutividade vertical máxima (ao ar e à água) e de resistência ao cisalhamento direto;
- d) o quarto aborda os resultados e discussões das análises e ensaios realizados, comparando a influência que a adição de fibras assume no comportamento da curva característica e na condutividade hidráulica não saturada, além de destacar o efeito da execução de ciclos S-M na condutividade vertical ao ar (solo seco) e à água (saturada), e na resistência ao cisalhamento direto;
- e) o quinto refere-se às conclusões e principais considerações quanto aos resultados obtidos, além de recomendações para pesquisas futuras sobre o tema abordado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Foi realizada revisão bibliográfica a fim de embasar o conhecimento teórico necessário ao desenvolvimento da pesquisa. Pesquisou-se sobre a cultura do coco verde, obtenção e aplicação de seus resíduos; o desenvolvimento de materiais compósitos, especialmente com a utilização de fibras vegetais como reforço de solos argilosos; fluxo em meio poroso no contexto geotécnico; solos não saturados; e durabilidade de materiais, com foco no efeito de ciclos secagem-molhagem em solos.

2.1 O COCO VERDE: CARACTERÍSTICAS, PRODUÇÃO E CONSUMO

As teorias mais aceitas atualmente consideram o coqueiro (*Cocos nucifera L.*) originário do sudoeste do pacífico (Ásia), embora sua proveniência ainda não seja consenso entre os estudiosos. Pertence à família das palmeiras (*Arecaceae*, anteriormente denominada *Palmae*), uma das mais importantes na classe das monocotiledôneas – plantas que possuem apenas um cotilédono no interior das sementes (SILVA, 2014) e está presente em praticamente todos os continentes, representando uma das frutíferas mais disseminadas naturalmente no mundo.

Há forte crença na dispersão natural do fruto (coco verde), que é capaz de flutuar por dias na água do mar sem afundar ou danificar seu embrião. Assim, as correntes marítimas podem ter propiciado seu acesso a praias distantes. Vindo de Cabo Verde, chegou no Brasil pela Bahia (razão de ser chamado também de “coco-da-baía”) em meados do século XVI (BOLAÑOS, 2013) e se disseminou facilmente no litoral nordestino e outras regiões do país, tendo em vista ser uma frutífera típica de clima tropical (CINTRA *et al.*, 2009).

A cultura do coqueiro tem as vantagens do fácil cultivo, compatível com solo com bastante cálcio e fósforo (como a areia da praia, inviável para outros tipos de plantio), atrelado à grande produção durante longos períodos. Requer clima quente e grande intensidade solar, favorecendo-se de águas em movimento (ricas em oxigênio), razões pelas quais se adaptam tão bem ao litoral (SENHORAS, 2003).

A Ásia possui cerca de 80% da área plantada com coqueiros do mundo, sendo a Indonésia o maior produtor, seguida por Filipinas, Índia e Brasil, respectivamente (MARTINS; JESUS JR., 2011). Os valores referentes à produção de 2008 são apresentados na Tabela 1. Em 2013, os cinco maiores produtores foram responsáveis por cerca de 92% da produção mundial, onde o Brasil respondeu por 5% (SILVEIRA; ARAGÃO, 2016).

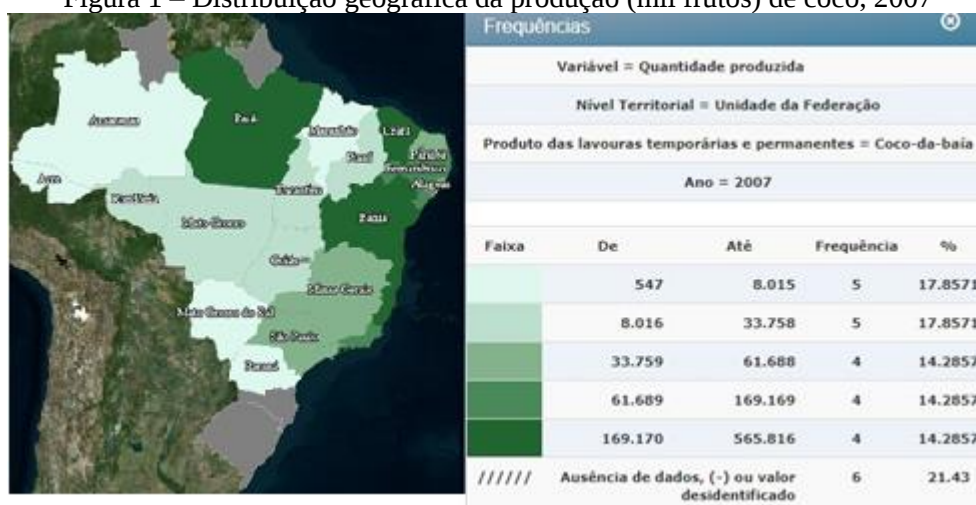
Tabela 1 – Produção e área colhida dos principais países produtores de coco (2008)

País	Área colhida (ha)	Produção (1000 t)	Participação da produção (%)
Indonésia	2.950.000	19.500.000	32,12
Filipinas	3.379.740	15.319.500	25,23
Índia	1.940.000	10.894.000	17,94
Brasil	287.016	2.759.044	4,54
Sri Lanka	394.840	2.210.800	3,64
Outros	2.279.030	10.029.792	16,53
Mundo	11.230.626	60.713.136	100,00

Fonte: adaptado de Martins e Jesus Jr. (2011)

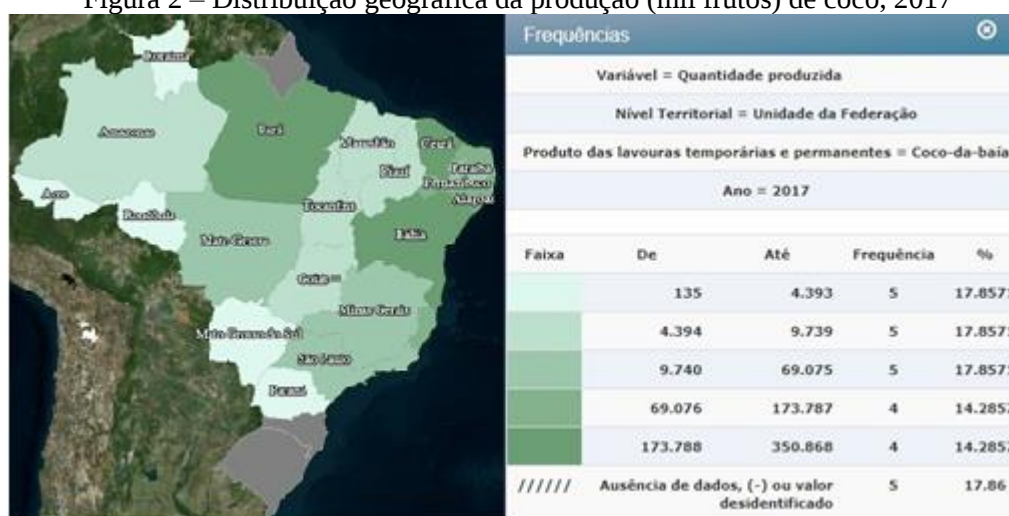
Internacionalmente, a produção é contabilizada em toneladas, mas nacionalmente, utiliza-se a quantidade “mil frutos”. A Figura 1 e a Figura 2 ilustram a distribuição geográfica de produção de coco no Brasil nos anos de 2007 e 2017, respectivamente. Embora seja possível perceber uma diferença significativa de quantitativos entre os anos levantados (decréscimo), a contribuição bem mais expressiva do Nordeste permanece constante.

Figura 1 – Distribuição geográfica da produção (mil frutos) de coco, 2007



Fonte: IBGE, 2019

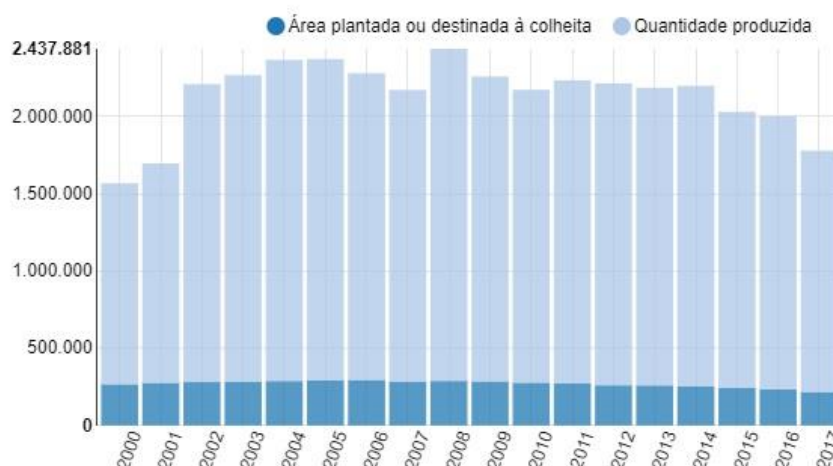
Figura 2 – Distribuição geográfica da produção (mil frutos) de coco, 2017



Fonte: IBGE, 2019

O histórico da produção de coco no Brasil pode ser visualizado na Figura 3, revelando que o ápice produtivo se deu em 2008, com mais de 2,1 bilhões de frutos. Em 2017 o quantitativo se aproximou de 1,6 bilhões. A Figura 3 mostra ainda que a maior destinação de área para plantio ou colheita de coco aconteceu em 2006, quando ultrapassou 294 mil hectares, com tendência a gradativo declínio ao longo dos anos – em 2017 foi aproximadamente 217 mil ha (IBGE, 2019).

Figura 3 – Histórico da produção de coco no Brasil (mil frutos) e área plantada ou destinada à colheita (ha), de 2000 a 2017



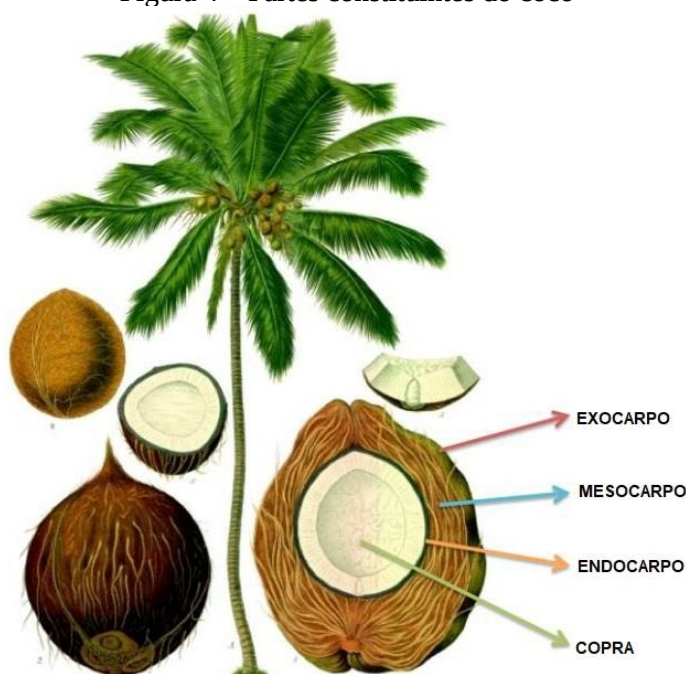
Fonte: IBGE, 2019

Enquanto mundialmente o coco é tido como uma oleaginosa para produção de óleo e outros produtos em seu estado final de maturação, no Brasil é bastante comum também seu consumo ainda imaturo (verde) para obtenção de água (ROSA *et al.*, 2001a). O Brasil possui

aproximadamente 100 mil hectares de coqueiro-anão, principalmente cultivado para o consumo de água de coco (*in natura* ou processada) do fruto verde (com cerca de sete meses de idade), embora também possa ser empregado como matéria-prima nas agroindústrias alimentícias de leite de coco, coco ralado e similares (PINO, 2005).

O coco é uma drupa (fruto carnoso com apenas uma semente ou caroço) sem caroço, formado por uma parte externa lisa (exocarpo ou epicarpo) que envolve um mesocarpo fibroso e espesso (3 a 5 cm), o qual envolve uma camada muito rígida mais interna (endocarpo), onde ficam armazenadas a copra (polpa branca) e a água de coco, conforme ilustrado na Figura 4 (ESMERALDO, 2006; SILVA, 2014).

Figura 4 – Partes constituintes do coco



Fonte: adaptado de Bolaños (2016, p. 63)

O conjunto polpa mais água corresponde em média a apenas 20% do peso bruto de um coco verde, ou seja, entre 80 e 85% do seu peso é resíduo (exocarpo + mesocarpo + endocarpo) (ROSA *et al.*, 2001a). Frequentemente as cascas do coco são descartadas como lixo ou queimadas, situações em que acabam poluindo o meio ambiente (SILVA; JERÔNIMO, 2012). Quando são descartadas em aterros sanitários, diante do grande volume que possuem, acabam por reduzir significativamente a vida útil desses depósitos. Não é incomum, ainda, a deposição irregular de resíduos sólidos urbanos, os quais se tornam problema de saúde pública, fonte de contaminação (do solo e água) e mau cheiro, além de comprometer a estética da paisagem (ROSA *et al.*, 2001a).

A possibilidade de aproveitamento do resíduo do coco reduz a disposição irregular de lixo, assim como o volume destinado aos aterros sanitários (aumentando sua vida útil), além de preservar outras matérias-primas e proporcionar geração de emprego e renda local. Esse material é fonte de matéria-prima orgânica que ao ser beneficiada pode ser utilizado nos mais variados setores. Assim, a partir do desenvolvimento de alternativas que conferem valor econômico aos diversos subprodutos criados, a sustentabilidade é garantida em todos os aspectos, pois além de reduzir os impactos perversos sobre o meio ambiente e as demandas por outros recursos naturais, são gerados empregos e renda, alargando a base de consumo na sociedade.

2.2 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO DE COCO VERDE

O mesocarpo do fruto é constituído de densas fibras agregadas por tecido conjuntivo, resistentes à água salgada, denominadas “coiro”, “cairo” (SENHORAS, 2003), “coir”, “bonote” ou fibra, o qual é um produto do beneficiamento do resíduo do coco. Índia e Sri Lanka são líderes mundiais em processamento de coco maduro (responsáveis por mais de 90% da produção), sendo este o principal exportador de fibras de coco e aquele, de produtos com maior valor agregado. As atividades necessárias à produção empregam milhares de pessoas, tendo grande importância social e econômica para esses países (van DAM, 1999).

As fibras do coco são materiais ligninocelulósicos com elevados valores de rigidez e dureza devido à celulose e ao lenho, seus principais componentes. Os cocos secos e maduros fornecem fibras duras e lenhosas, enquanto os cocos verdes garantem a melhor fibra celulósica. Pertencentes à família das fibras duras (como as do sisal), têm como características a alta resistência à água, às bactérias e ao impacto, além de baixa condutividade térmica (SENHORAS, 2003). O aproveitamento da fibra se torna possível a partir do beneficiamento da casca (resíduo) para sua obtenção.

Pannirselvam *et al.* (2005) apresenta dois métodos de beneficiamento do coco seco, brevemente explicitados: o convencional e o moderno. O primeiro pode ser executado por dois procedimentos: 1) submersão por seis meses em água ou de 10 a 12 meses em água salgada de fermentação biológica para amaciamento das fibras e extração por batidas, para posterior lavagem, secagem e limpeza; ou 2) utilização um desfibrilador mecânico para extrair a fibra depois de cinco dias de imersão em água, para posterior lavagem, limpeza, secagem e amaciamento – vale ressaltar que esse processo prejudica bastante a qualidade da fibra. O

método moderno, por outro lado, preserva a alta qualidade da fibra ao utilizar da biotecnologia, reduzindo ainda o tempo de imersão para três dias.

Já no caso do coco verde, foco desde trabalho, o processo de beneficiamento consiste nas operações de dilaceração, moagem, secagem e classificação. É possível realizar, ainda, uma etapa extra de secagem previamente à moagem, na qual após quatro dias de exposição ao sol a umidade do resíduo passa de 85% para cerca de 15 ou 20%. A secagem prévia possibilita a obtenção de material mais homogêneo, com menor granulometria, especialmente interessante quando se deseja extrair o resíduo em forma de pó – para aplicações agrícolas, por exemplo (ROSA *et al.*, 2001b).

O processamento da casca de coco verde se inicia com a coleta das cascas, transporte e descarregamento na unidade de beneficiamento. É importante obter informações a respeito da origem do resíduo e tipo (inteiro ou em bandas) para conhecer melhor a dinâmica de geração da casca e possibilitar um planejamento da produção e formação de estoques. Vale ressaltar que a desidratação do material aumenta sua densidade, o que dificulta a retirada de sais na prensagem e classificação das fibras. Dessa forma, o ideal para garantir a qualidade dos produtos finais é a destinação das cascas à unidade de beneficiamento em até três dias após a abertura do coco (MATTOS *et al.*, 2011).

O material é descarregado na moega de recepção (Figura 5a), a qual possui declividade a fim de conduzi-lo por gravidade até a entrada da linha de processamento. Nesse momento devem ser removidos quaisquer materiais estranhos, como canudos, pedras, plásticos, cascas podres etc. A Embrapa Agroindústria Tropical (unidade descentralizada da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária localizada em Fortaleza-CE), junto a metalúrgica Fortalmag, desenvolveu a tecnologia atualmente utilizada no processamento das cascas de coco verde. O equipamento é responsável por realizar os seguintes processos, nesta ordem (MATTOS *et al.*, 2011):

- a) Trituração (Figura 5c): um rolo de facas fixas promove o esmagamento da parte fibrosa da casca (mesocarpo) minimizando cortar as fibras, para melhor aproveitamento das fibras longas. Quando não há interesse em aproveitamento das fibras, também podem ser usados equipamentos com outras ferramentas de corte que trituram integralmente a casca, como discos e facas, discos de corte alternados, e moinhos universais.
- b) Prensagem (Figura 5d): a casca de coco possui elevada umidade (cerca de 80%), de forma que a maior parte dos sais se encontram em solução. Assim, a partir da passagem do conjunto triturado em prensa rotativa horizontal, o excesso de umidade

é extraído e a salinidade é reduzida – resultando em economia de água no posterior processo de lavagem. Vale salientar que a remoção de sais na prensagem é otimizada quanto maior for a umidade das cascas processadas. Ao final dessa etapa se obtém, além das fibras desagregadas, um efluente denominado de “líquido da casca de coco verde” (LCCV) – numa proporção de 30% do peso inicial. Essa água residuária tem uma composição complexa e necessita de tratamento adequado para descarte.

- c) Seleção: marteletes fixos helicoidais e uma chapa perfurada permitem separar o pó, o qual cai pela chapa (Figura 5e), das fibras, as quais saem no final do percurso.

Figura 5 – Processamento do coco verde



Fonte: adaptado de Mattos *et al.* (2011, p. 18-22)

Para garantir o máximo de eficiência no processo, a velocidade de alimentação da esteira (Figura 5b) deve seguir a vazão ideal da prensagem, através de monitoramento manual do número e tamanho das cascas a serem processadas (além de nova checagem por materiais estranhos), modificação da quantidade de pás/ganchos da esteira e controle da velocidade da esteira.

De acordo com van Dam (1999), cascas de coco produzem cerca de 70% de pó e 30% de fibra (em relação ao peso seco), porém essa porcentagem varia bastante a depender da área geográfica de cultivo e características dos coqueiros. Dentre as fibras, entre 56 e 65% são consideradas longas (comprimento > 150 mm, normalmente até 350 mm), e entre 5 e 8% são curtas (comprimento < 50 mm). Após a separação, cada material segue para etapas de processamento distintas, para obtenção de substrato agrícola (pó) ou fibra bruta de casca de coco verde, a partir do fluxograma da Figura 6, o qual mostra as etapas operacionais do beneficiamento, os subprodutos e os resíduos gerados ao longo do processo (ROSA *et al.*, 2009).

Para produção de substrato agrícola, o pó segue para lavagem com água limpa, com o intuito de reduzir ainda mais sua salinidade. O material deve ficar submerso por cerca de 15 minutos e depois é espalhado para secagem natural (evaporação) em camadas entre 5 e 10 cm. O efluente desta etapa (água salina) se junta ao LCCV para tratamento. A qualidade do substrato produzido é garantida a partir da etapa de estabilização/fermentação/compostagem, a fim de torná-lo inerte (degradação da matéria orgânica bastante lenta) antes do contato agrícola. Ainda com umidade superior a 50%, a secagem por 20 minutos a 80°C (tratamento térmico) garante a obtenção de uma umidade de 30% (desejada) e possibilita a descontaminação de possíveis microrganismos nocivos (MATTOS *et al.*, 2011).

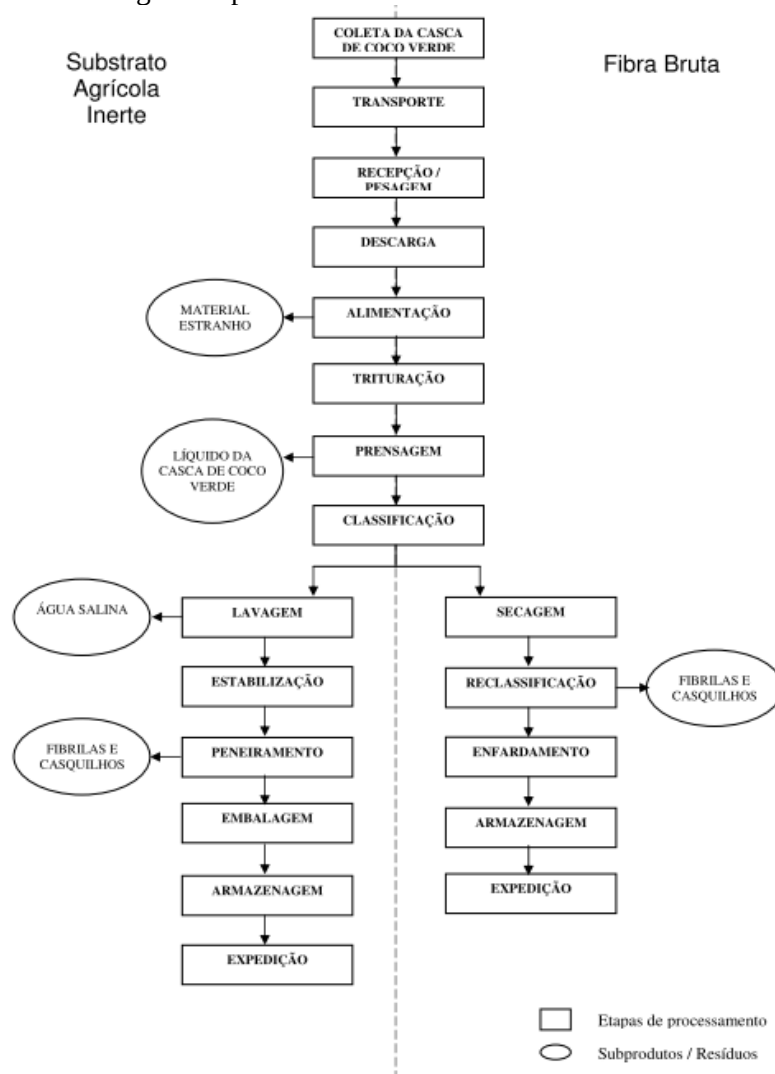
O pó é, então, moído para melhorar a uniformidade do produto, reduzindo as fibras existentes a menos de 2 cm de comprimento. Vale salientar, que quanto mais seco o conjunto, maior a eficiência do moinho de facas paralelas. Como a granulometria do substrato agrícola depende do tipo de cultura em que será utilizado, é feito peneiramento a partir das diferentes finalidades desejadas. Pode ser realizada ainda adição de nutrientes necessários (formulação) antes da embalagem, armazenamento e expedição do substrato pronto (MATTOS *et al.*, 2011).

Na produção de fibras, por outro lado, não há necessidade das etapas de lavagem ou estabilização, seguindo diretamente da classificação para secagem ao sol (ou equipamento de secagem, se necessário) a fim de reduzir sua umidade a 18%. É importante notar que as fibras não devem passar a noite expostas a fim de evitar a reumidificação pelo orvalho. Após, é feita reclassificação/peneiramento das fibras para remover restos de endocarpo e pó que podem estar

no conjunto. As fibrilas e casquilhos removidos podem ser aproveitados na produção de substratos agrícolas mais graúdos. Material de baixa densidade, é feita compactação e enfardamento das fibras com o intuito de reduzir custos de transporte e volume de armazenamento (MATTOS *et al.*, 2011).

Nesse processo, tem-se uma reconceituação dos “resíduos”, que passam a ser encarados como subprodutos estratégicos e matérias-primas de novas indústrias, transformando ameaças ambientais em oportunidades. Senhoras (2003) chama a atenção da importância de atuação do Estado como incentivador econômico dessa prática, para estimular o crescimento ambiental e socialmente responsável. Nesse sentido, além da lei vigente desde 1948 que concede favores (tributários) às fábricas que se instalarem para exploração de fibra de coco (BRASIL, 1948), é essencial que se tenha também um mercado compatível para consumo desses variados produtos.

Figura 6 – Fluxograma operacional do beneficiamento da casca de coco verde



Fonte: Rosa *et al.* (2009, p. 190)

2.3 APLICAÇÕES DO RESÍDUO DE COCO VERDE

O resíduo do coco seco (maduro) tem sido utilizado como combustível de caldeiras, ou beneficiado para obtenção de matéria-prima de manufaturas de tapetes, capachos, estofamentos e cordoalhas (PANNIRSELVAM *et al.*, 2005; ROSA *et al.*, 2001b). Já o coco verde – colhido com sete meses de plantio principalmente para consumo da água de coco, apresentam fibras com características distintas e alta umidade (cerca de 85%), o que, no passado, acabava por dificultar que seus resíduos tivessem a mesma destinação (ROSA *et al.*, 2001b). Embora a alta umidade e outras características da fibra do coco imaturo dificultem seu aproveitamento, não o inviabilizam economicamente, ainda que sejam necessários tratamentos industriais de adequação (SENHORAS, 2003).

Atualmente, as fibras de coco verde têm demonstrado resultados similares às de coco maduro, ampliando essa possibilidade de mercado. A crescente preocupação ambiental tem motivado a procura por produtos ecologicamente corretos, com fontes renováveis e biodegradáveis (ROSA *et al.*, 2009). As fibras de coco se enquadram nesse contexto: por se tratarem de resíduos, possuem um baixo custo, e suas características possibilitam inúmeras aplicações.

Senhoras (2003) afirma que algumas das principais características que representam vantagens na utilização industrial das fibras de coco são: alta resistência à umidade, baixa condutividade térmica, ser inodora, não apodrecer, não produzir fungos e não ser atacada por roedores. As indústrias agropecuária, da construção civil, química, têxtil e automobilística são algumas das macroáreas que tiram proveito desse rejeito das mais variadas formas.

As possibilidades de utilização são diversas, como: material isolante, de enchimento, matéria-prima de artesanatos, vestuário e calçados, tapetes, capachos, vasos e outros elementos de paisagismo, bastões, escovas e pincéis (MARTINS *et al.*, 2013; MATTOS *et al.*, 2011), combustível para caldeiras e cobertura morta (substrato orgânico) para o cultivo vegetal – representando uma alternativa à exploração da samambaiaçu (*Dicksonia sellowiana*) para utilização do xaxim, tendo em vista a ameaça de extinção dessa espécie (ROSA *et al.*, 2009).

Vale salientar que a composição química da casca do coco é sujeita a variações do local de plantio, época de ano e volume de chuvas. Aplicações agrícolas desse material devem levar em consideração seu nível de salinidade e nutrientes, principalmente em relação à condutividade elétrica, tendo em vista que esse é um parâmetro sensível para a maioria das plantas, que pode vir a limitar seu crescimento. Assim, a depender do tipo de cultivo, pode ser

necessário realizar uma etapa de lavagem para permitir a lixiviação dos sais presentes em excesso (ROSA *et al.*, 2001a; 2001b).

Rosa *et al.* (2001b) demonstraram que grande quantidade de sódio e potássio contida no pó da casca de coco verde pode ser lixiviada através de lavagem, assim como os taninos solúveis – os quais podem vir a inibir o crescimento da ponta das raízes. O trabalho também demonstrou que esse material tem pH adequado para utilização como substrato ($\approx 5,0$) e alta capacidade de retenção de água – equivalente a praticamente cinco vezes seu peso bruto, o qual sofre pequeno crescimento ao longo do tempo.

Sua elevada estabilidade, atrelada à capacidade de garantir elevada aeração e retenção de água, fazem da fibra de coco uma boa matéria-prima de substratos agrícolas (SENHORAS, 2003; OLIVEIRA; HERNANDEZ; ASSIS, 2008). Carrijo, Liz e Makishima (2002) afirmam que há uma tendência de utilizar compostos orgânicos como substratos na tentativa de atingir a sustentabilidade e minimizar os impactos ambientais. Os autores apresentam ainda como vantagens da fibra de coco: possuir grande disponibilidade e longa durabilidade sem alteração de suas características físicas, ser biodegradável, possibilitar a esterilização e utilizar matéria-prima renovável e de baixo custo.

Silva *et al.* (2003) chamam a atenção que a utilização da casca de coco maduro como combustível para caldeiras já é bastante disseminada, mas no caso do coco imaturo (verde) essa aplicação só é considerada economicamente viável para produtos de alto valor agregado. Isso se dá porque a alta umidade das cascas verdes (cerca de 85%) impossibilita a utilização direta e exige uma etapa de secagem prévia.

Embora tenha havido uma tendência mundial de substituição dos materiais “tradicionais” pelos sintéticos nas últimas décadas, é possível observar que mais recentemente há uma tentativa da incorporação do resíduo do coco na confecção de diversos produtos com o objetivo de se obter versões mais ecológicas, sustentáveis e com menores tempos de decomposição (van DAM, 1999), como na fabricação de solados de sapatos, encostos e bancos de carro, misturas asfálticas e mesmo embalagens de Poli Tereftalato de Etila (PET) (ROSA *et al.*, 2009).

Van Dam (1999) avalia que esse tipo de produto pode ter boas perspectivas de mercado se conseguirem ser produzidos a preços competitivos, balanceando qualidade e demanda, como uma forma de mitigar os efeitos ecológicos adversos dos atuais métodos de produção empregados. O autor previu ainda a utilização alternativa das fibras como reforço em compósitos, produção de painéis/placas (com finalidade de isolamento) e materiais construtivos similares.

Os elevados índices de dureza e rigidez da fibra de coco a transformam em material muito indicado para utilização no isolamento acústico e térmico. Ela promove redução significativa dos níveis sonoros (tanto de impacto quanto aéreos), superando substancialmente o desempenho de outros materiais existentes no mercado e constituindo a solução ideal para muitos problemas acústicos (SENHORAS, 2003; SILVA; JERÔNIMO, 2012).

Os resíduos do coco verde podem também substituir a lenha ao serem transformados em briquetes (pequenas toras compactadas a elevadas pressões, sem necessidade de carbonização), considerados “carvão ecológico” de alta qualidade com alto poder calorífico (entre 3.000 e 4.000 kcal/kg) e formato padrão, possibilitando economia e melhor utilização do espaço físico com uma fonte de energia renovável e sustentável (ROSA *et al.*, 2009; SILVEIRA, 2008). Pannirselvam *et al.* (2005), por exemplo, demonstram o potencial de aproveitamento da biomassa residual do coco como fonte energética, e van Dam (1999) explica ainda que é possível obter carvão vegetal e posteriormente carvão ativado a partir da carbonização das cascas de coco, possibilitando sua utilização também como material filtrante ou adsorvente.

Levando em consideração que o consumo de papel é uma das principais causas de desflorestamento no planeta, Senhoras (2003) levanta ainda a possibilidade de utilização na indústria do papel como fonte de fibra celulósica. Assim, seria possível reduzir a quantidade de polpas extraídas de madeiras, possibilitando o aumento da produção de papel com redução da área de plantio de árvores madeireiras, como pinheiros ou eucaliptos. No entanto, é importante observar que essa alternativa se depara com dificuldades logísticas as quais devem ser devidamente estudadas para que garantam a eficiência econômica da substituição.

Na nanotecnologia, as fibras podem ser utilizadas na obtenção de nanocristais de celulose, os quais têm aplicabilidade nas indústrias automobilísticas e na química de polímeros e compósitos, tendo em vista o grande potencial como agente de reforço. Esses cristais podem, por exemplo, melhorar as propriedades mecânicas de novos materiais e aumentar a biodegradabilidade de plásticos (SILVA *et al.*, 2009).

Há a possibilidade ainda de utilização da casca do coco verde em processos fermentativos para alimentação humana, como a produção de enzimas, indústria ainda bastante tímida no Brasil. A adição das fibras em pães, por exemplo, demonstrou que não há modificação no processo de envelhecimento do pão, e que sua ingestão favorece a adsorção de água, gorduras, glicose e minerais, além de acelerar o trânsito intestinal e promover a diminuição da concentração do colesterol total e redução de HDL (colesterol “bom”) (SENHORAS, 2003).

Subprodutos e resíduos agroindustriais vêm sendo utilizados na alimentação animal já há muitas décadas, pois mesmo sendo pobres em nutrientes, são capazes de suprir parte das demandas energéticas de certos animais, especialmente se melhorados com esta finalidade. Os ruminantes possuem um aparelho digestivo diferenciado, e podem se beneficiar da alimentação da fibra de coco tratada quimicamente. Do ponto de vista global esse aproveitamento das fibras representa grande benefício, pois expande a capacidade de geração de alimentos à população (SENHORAS, 2003).

Uma aplicação bem difundida na geotecnia é na confecção de mantas geotêxteis a serem utilizadas em superfícies sujeitas a erosão pluvial ou eólica, especialmente na estabilização de taludes e na recuperação de áreas degradadas, podendo ainda ser empregada com fins paisagísticos e áreas situadas em declives acentuados ou de ressecamento rápido (GOMES, 2005; HOLANDA; ROCHA; OLIVEIRA, 2008; ROSA *et al.*, 2009;). Esse sistema tem a vantagem de propiciar rápida recuperação do solo a baixo custo, incorporando-se ao terreno e reduzindo o impacto ambiental, atrelado a ganhos estéticos à paisagem (SENHORAS, 2003). Com lenta decomposição, são capazes de reduzir a taxa de evaporação e aumentar a retenção de umidade, protegendo o solo e favorecendo a atividade microbiana, a qual contribui para o desenvolvimento vegetal (GOMES, 2005).

Suas características microscópicas revelam também grande potencial adsorvente, especialmente quando em pó, podendo ser utilizada para remoção de metais pesados (como cádmio e cromo) com aplicabilidade em biorremediação ambiental de solos e tratamento de efluentes contaminados (PINO, 2005; PINO *et al.*, 2006; SOUZA *et al.*, 2007).

Soares, Silva e Pinheiro (2008) investigaram a possibilidade de utilização das fibras de coco verde na fabricação de tijolos de adobe. Incorporadas à mistura de terra crua e água, os blocos são moldados e secos ao ar livre sem queima. A celulose, a lignina e a hemicelulose das fibras acabam agindo como esqueleto principal do conjunto, conferindo maior coesão entre os materiais. O trabalho mostrou que a presença de fibras proporcionou um aumento de 25% na resistência à compressão dos tijolos, revelando mais uma possibilidade de aplicação importante na luta contra o aquecimento global, tendo em vista que além do aproveitamento de resíduos com melhoria de qualidades do produto final, a confecção desse tipo de tijolo não demanda gasto energético ou combustíveis fósseis, nem gera emissão de poluentes na atmosfera ou outros resíduos. Em contrapartida, a adição das fibras provoca aumento de custos, o que pode ser um grande empecilho para a disseminação da prática.

A fibra de coco vem sendo estudada também para utilização como reforço de matrizes cimentícias na produção de argamassa e concreto. Silva, Marques e Fornari Júnior (2012)

compilam uma série de pesquisas que demonstram a aplicabilidade das fibras nesse contexto, tendo em vista que são capazes de melhorar propriedades físicas e mecânicas do compósito, tais como massa específica, fluidez, resistência à tração, à flexão e ao impacto, além do isolamento térmico. Vale ressaltar que como não há legislação específica ou norma técnica sobre esse tipo de aplicação, é através das comparações de desempenho nas diferentes investigações que é possível verificar se o comportamento é adequado para aplicações em larga escala e quais as proporções adequadas de acréscimo para cada caso.

É importante notar que diante das inúmeras possibilidades de utilização da fibra de coco verde, o principal gargalo de aplicação se torna o fator econômico – os custos envolvidos. Deve haver participação governamental no sentido de garantir a destinação dos resíduos do coco às usinas de beneficiamento e estimulá-las economicamente, de modo a incentivar o ciclo produtivo e garantir que o produto beneficiado possa ser adquirido no mercado a baixos preços. Rosa *et al.* (2009) e Silveira e Aragão (2016), por exemplo, realizaram análises de viabilidade financeira para implantação de unidade de beneficiamento de casca de coco verde. Vale ressaltar que esse tipo de investimento significa melhoria da saúde pública, redução de gastos com limpeza urbana e, principalmente, com disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários – o que também tem um alto custo para o Poder Público.

2.4 DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais desenvolvidos ao longo da história foram tão decisivos no progresso das civilizações que até marcaram diferentes períodos pré-históricos: idade da pedra e idade dos metais (do cobre, do bronze e do ferro). Mesmo nesses tempos remotos, o ser humano tentava combinar as matérias-primas disponíveis para obter novos materiais que supririam melhor às necessidades da época.

O avanço tecnológico provoca mudanças nos requisitos exigidos dos materiais, sendo necessário o surgimento de novos compostos capazes de atendê-los. Entende-se o compósito como a combinação de dois ou mais constituintes (fases) diferentes para formar um material com desempenho melhor (em algum ou alguns aspectos) do que cada um de seus componentes atuando isoladamente (VENTURA, 2009). Embora os constituintes conservem sua identidade e propriedades mecânicas, eles devem ser compatíveis quimicamente (NOSSA, 2011).

A fase contínua (matriz) envolve a(s) fase(s) dispersa(s)/descontínua(s) (denominada “reforço”) e confere a estrutura do compósito, preenchendo os espaços vazios ao redor do reforço (VENTURA, 2009). É função da matriz resistir a intempéries químicos e físicos aos

quais o material pode estar sujeito, além de absorver e posteriormente transmitir as solicitações ao reforço, promovendo uma resistência compartilhada entre os componentes (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012). Já a fase dispersa atua proporcionando melhor desempenho de força, rigidez, resistência térmica, corrosão e/ou condutividade, a depender de cada caso (VENTURA, 2009). Vale ressaltar que as propriedades do novo material dependem não só das propriedades dos constituintes, mas também de sua interface (NOSSA, 2011).

Se a própria observação da natureza demonstra que os materiais biológicos são compósitos, então nada mais natural que imitá-la. E desde a antiguidade os seres humanos criam e utilizam esse tipo de material, seja utilizando fibras de papiro para fabricação de barcos, velas e cordas no Egito Antigo há mais de 6.000 anos, seja inserindo palha na fabricação de tijolos há mais de 2.000 anos. A utilização de fibras sintéticas, por outro lado, já é bem mais recente, a partir do século XIX (VENTURA, 2009). Um exemplo clássico da construção civil é o concreto, material composto por uma matriz cimentícia reforçada com partículas minerais de variadas dimensões e formas (areias e britas) aleatoriamente incorporadas.

A utilização desses novos materiais está em constante expansão devido ao aumento de rendimento e desempenho que proporcionam, além das vantagens que apresentam, como: elevada rigidez, módulo específico, resistência à corrosão e condutividade térmica; estabilidade estrutural; boa fluidez e fácil moldagem. No entanto, é importante notar que o sucesso de determinado compósito depende bastante da disponibilidade dos componentes e facilidade de fabricação. Na atualidade, a crescente preocupação ambiental e demanda por materiais que agreguem também valores econômicos e sociais, atrelado à redução dos custos industriais, impulsionaram a utilização de componentes naturais (VENTURA, 2009).

Os compósitos são classificados pelo material da fase matriz, o qual pode ser de origem metálica, polimérica ou cerâmica/mineral (esta última inclui matrizes de cimento Portland e também de solo). O tipo de reforço empregado também permite a classificação entre dois tipos principais: reforçados com partículas (PRC – *Particle Reinforced Composite*) ou com fibras (FRC – *Fiber Reinforced Composite*). Os compósitos particulados podem ter o reforço disposto em orientação aleatória ou preferencial, e seu desempenho depende principalmente das dimensões das partículas utilizadas, espaço existente inter-partículas e fração de volume do reforço em relação ao composto (VENTURA, 2009).

As fibras representam uma classe importante de reforço, sendo inicialmente utilizadas as de vidro, ainda amplamente utilizadas, e posteriormente descobertas as de cerâmica e metais, as quais promovem materiais com maior rigidez e resistência ao calor (VENTURA, 2009). Os compósitos fibrosos podem ser classificados como: multiaxiais, camada única (fibras

contínuas/longas ou descontínuas/curtas) ou multicamadas (laminados ou híbridos). Os reforços com fibras longas podem ser unidirecionais ou bidirecionais, e os com fibras curtas, com orientação aleatória ou preferencial (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012). Um esquema dessa classificação é mostrado na Figura 7.

O comportamento do compósito é intimamente relacionado com as dimensões, a forma e a composição do reforço, e também com as propriedades mecânicas da matriz. É importante observar que é possível obter grande variação de desempenho a partir do arranjo, da concentração, da orientação e da forma de disposição da fase dispersa (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012; VENTURA, 2009).

O desempenho do conjunto também depende da compatibilização entre as fases, já que a região interfacial, onde ocorre o contato entre os componentes, é a principal responsável pela transferência das solicitações mecânicas da matriz para o reforço (BURAKOWSKI; REZENDE, 2001). Aspectos como resistência, comportamento na fratura, desempenho mecânico, rigidez, degradação ambiental e resistência à fadiga sofrem grande influência do perfil de interface existente entre as fases (LEVY NETO; PARDINI, 2006; NOSSA, 2011).

Figura 7 – Classificação dos compósitos segundo o reforço



Fonte: Bolaños (2013, p. 26)

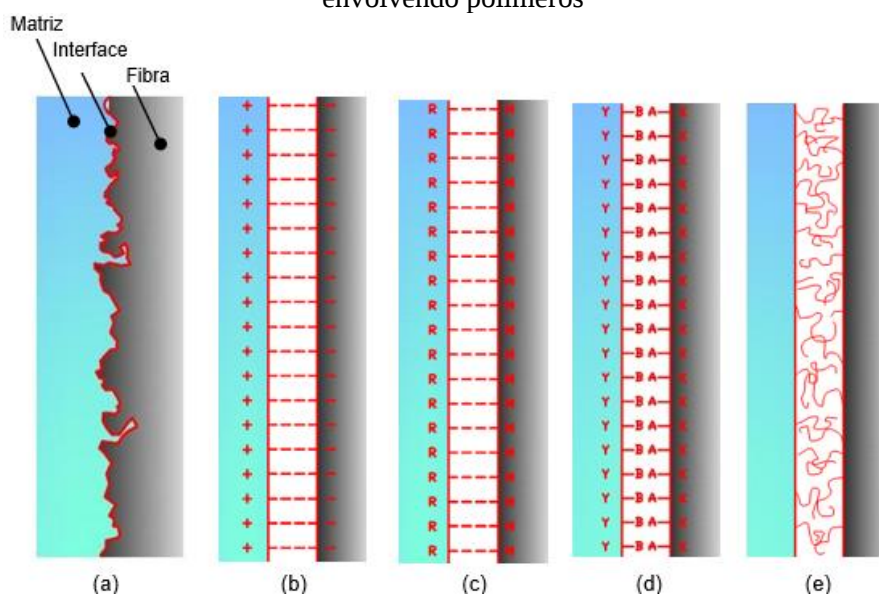
Uma adesão inadequada pode provocar o início de falhas no sistema que comprometem o seu desempenho, tais como caminhos preferenciais de escoamento, diminuição de resistência ou aumento de porosidade (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012; LEVY NETO; PARDINI, 2006). Para que haja um comportamento de excelência do conjunto é essencial que a interface consiga balancear a rigidez do reforço com a ductilidade da matriz, a qual deve ser mínima ou mesmo nula (VENTURA, 2009). O reforço pode ainda passar por diferentes processos de tratamento superficial com o intuito de melhorar a transferência de tensões nos compósitos e,

consequentemente, aumentar sua resistência (BURAKOWSKI; REZENDE, 2001; MATTHEWS; RAWLINGS, 2000).

Normalmente na interface há uma descontinuidade das propriedades mecânicas e na natureza química e cristalina dos materiais envolvidos, podendo esta região vir a se comportar como uma fase distinta daquelas do compósito (“interfase”) (NOSSA, 2011). Cada tipo de interação matriz-reforço provoca diferentes descontinuidades de propriedades específicas, sendo a rugosidade do reforço de grande relevância para as características da interface criada (BURAKOWSKI; REZENDE, 2001; LEVY NETO; PARDINI, 2006).

A adesão entre as fases se dá principalmente por: encaixe mecânico, atração eletrostática, ligações químicas ou interdifusão de materiais (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012; MATTHEWS; RAWLINGS, 2000; NOSSA, 2011), conforme mostrado na Figura 8. A adesão mecânica mostrada em (a) é especialmente favorecida pela presença de reentrâncias (rugosidades) na superfície no reforço e ocorrência de contração de matriz durante o processo de cura, provocando uma resistência mais efetiva em carregamentos paralelos à interface (LEVY NETO; PARDINI, 2006; MATTHEWS; RAWLINGS, 2000; NOSSA, 2011).

Figura 8 – Mecanismos de adesão na interface fibra-matriz
(a) adesão mecânica; (b) adesão eletrostática; (c) adesão química entre grupos químicos compatíveis;
(d) adesão química com aplicação de agente de acoplamento; (e) adesão por reação ou interdifusão envolvendo polímeros



Fonte: Nossa (2011, p. 12)

Frequentemente a ancoragem mecânica (a) atua em conjunto com outros mecanismos de adesão (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012; LEVY NETO; PARDINI, 2006). A adesão eletrostática (b) depende da diferença de cargas entre as duas superfícies, atuando em curtas

distâncias (atômicas), de forma que a resistência dependerá da densidade das cargas e distância entre as fases. Vale ressaltar que para efetivação desse mecanismo, é essencial que não haja contaminação das superfícies envolvidas (MATTHEWS; RAWLINGS, 2000).

A adesão química (c) se dá pelas ligações químicas formadas entre componentes, cuja resistência depende do tipo e número de ligações por unidade de área (LEVY NETO; PARDINI, 2006). Em caso de incompatibilidade química, é possível ainda fazer uso de agentes de acoplamento para possibilitar esse tipo de mecanismo (d) (MATTHEWS; RAWLINGS, 2000). Já a adesão por reação ou interdifusão (e) há difusão (atômica ou molecular) na área de interface, processo que ocorre quando há as condições favoráveis de adesividade e contato entre as fases, mais comum em casos de matriz polimérica, sendo considerado um entrelaçamento de moléculas (MATTHEWS; RAWLINGS, 2000).

A depender do tipo de compósito, a molhabilidade da matriz também contribui para a adesão da interface. Este conceito representa a extensão de espalhamento de um líquido sobre superfície sólida, logo, uma boa molhabilidade significa que a matriz é menos viscosa e mais fluida para preencher as imperfeições do reforço, conseqüentemente, deslocando ar desta área e garantindo uma melhor ancoragem. Matrizes com viscosidade mais elevadas, no entanto, não contam com essa contribuição (MATTHEWS; RAWLINGS, 2000; NOSSA, 2011).

Em resumo, a natureza da adesão que será estabelecida em cada caso depende de fatores como: arranjo atômico e geométrico, cristalinidade, orientação e propriedades químicas do reforço; constituição química e conformação molecular da matriz; realização de tratamento superficial nas fibras que provocaram existência de grupos funcionais; e difusividade dos elementos envolvidos (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

2.5 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

As características mecânicas, físicas e químicas das fibras empregadas influenciam no comportamento resultante do compósito, razão pela qual são normalmente incorporadas nos compósitos com o intuito de melhorar suas propriedades mecânicas e reduzir seu peso específico (BOLAÑOS, 2013).

O desempenho dos compósitos fibrosos depende de aspectos como origem, tipo, constituição, teor, comprimento, orientação e distribuição das fibras na matriz, além da aderência estabelecida entre as fases e características da matriz (HANNANT, 1994). A orientação da fibra em relação ao plano de ruptura é determinante para a contribuição que dará ao sistema: perpendicular, colabora integralmente com a transferência de carregamento;

enquanto paralela, não assume nenhum papel (BOLAÑOS, 2013; CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012; LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Em geral, o desempenho do composto é melhor quando há distribuição uniforme do reforço, mas vale salientar que é necessário avaliar as aplicações pretendidas a partir das solicitações específicas que o material estará submetido, assim como os custos envolvidos. Para situações de tensões multidirecionais, por exemplo, recomenda-se a utilização de fibras descontínuas e aleatórias, embora esse arranjo se mostre bem menos eficiente que fibras contínuas e alinhadas longitudinalmente em relação à direção tensionante (VENTURA, 2009).

Callister Jr. e Rethwisch (2012) acredita que os materiais fibrosos utilizados para reforço devem ser macroscopicamente homogêneos, flexíveis e com alta relação entre comprimento e seção transversal (> 40). A integridade estrutural da fibra (menor quantidade de defeitos) também é um aspecto apontado por Levy Neto e Pardini (2006).

Elevados valores de resistência à tração e módulo de elasticidade são características comuns de fibras, e muitas vezes a comparação entre módulos de elasticidade é o critério utilizado para escolha do tipo adequado de fibra a ser utilizado em cada caso (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012; LEVY NETO; PARDINI, 2006; SANTOS, 2006).

Em matrizes cerâmicas, Hannant (1994) e Taylor (1994) defendem que a principal contribuição das fibras se dá após o início da fissuração no compósito, quando serão acionadas e contribuirão para o aumento da resistência a carregamentos que induzem tensões de tração (tração indireta, flexão e cisalhamento) e absorção de energia. Embora a utilização de fibras mais rígidas que a matriz possa contribuir com o aumento de resistência também pré-fissuração, entende-se que o aumento da resistência à tração provocado pela adição da fibra geralmente não impede a formação de fissuras diante de tensões desviadoras, mas atuam provocando um aumento de tenacidade (energia total absorvida) e ductilidade que evitam sua propagação através da matriz (considerada frágil) (HANNANT, 1994; TAYLOR, 1994).

De forma geral, o comportamento do compósito dependerá da relação estabelecida entre matriz e reforço empregados. Há na atualidade uma grande diversidade de fibras utilizadas como reforço dos diferentes tipos de matriz, sendo indispensável utilizar a combinação que resulte em propriedades adequadas para determinada aplicação. As fibras utilizadas em compósitos são classificadas principalmente segundo sua origem, podendo ser sintéticas ou naturais.

As fibras sintéticas resultam de processamento para sua fabricação, podendo ser minerais, metálicas ou poliméricas. De forma geral, as fibras minerais apresentam alta resistência mecânica e densidade intermediária, além de elevada resistência química. As fibras

poliméricas são muito variadas em sua composição, mas normalmente apresentam bom comportamento mecânico e são menos suscetíveis a intempéries químicas e biodegradação, fator importante para o desempenho ao longo do tempo. Já as fibras metálicas, embora possuam desempenho mecânico muito bom, possuem densidade muito elevada e são muito suscetíveis à corrosão (BOLAÑOS, 2013; CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012; LEVY NETO; PARDINI, 2006).

As fibras naturais podem ser de origem vegetal (frutos, caules, etc.) ou animal (fios, cabelos, lã, etc.), sendo as vegetais comumente mais utilizadas como reforço de compósitos. Elas possuem o grande atrativo de constituir custo muito inferior às sintéticas, e serão explanadas mais detalhadamente no tópico seguinte por serem objeto de investigação deste trabalho.

2.6 FIBRAS VEGETAIS UTILIZADAS COMO REFORÇO

As fibras vegetais podem ser agrupadas de acordo com sua origem de extração entre fibras de semente (algodão), de fruto (coco), de raiz (zacatão), de caule (juta, linho) ou de folhas (bananeira, sisal, piaçava). As duas últimas são consideradas fibras duras, e são as mais utilizadas em compósitos poliméricos (SILVA, 2003).

A utilização de fibras vegetais como reforço apresenta várias vantagens em comparação com outros materiais sintéticos, como reciclabilidade, biodegradabilidade, proveniência de fonte abundante renovável e biodegradável, abrasividade reduzida, baixa densidade, propriedades mecânicas específicas favoráveis, atoxidade, possibilidade de melhoria de suas propriedades a partir de modificação química, baixo consumo de energia em sua produção, baixo custo, e possibilidade de aproveitamento da mão de obra local (BLEDZKI; GASSAN, 1999; FERREIRA *et al.*, 2012; LEVY NETO; PARDINI, 2006; PANNIRSELVAM *et al.*, 2005).

Como desvantagem, tem-se a possibilidade de perda significativa das principais propriedades a temperaturas acima de 200°C, a grande variabilidade das propriedades (dependem do local/período de colheita), sensibilidade a efeitos ambientais, e a alta absorção de umidade (em geral, são hidrófilas, o que provoca inchamento da fibra) (BOLAÑOS, 2013; REDDY; YANG, 2005). Esses aspectos em si não são impeditivos da sua utilização, tendo em vista que muitos compósitos são processados em temperaturas abaixo de 200°C e é possível reduzir bastante da absorção de umidade a partir de tratamentos químicos e de uma boa adesão na interface de contato (SILVA, 2003).

A falta de uniformidade das propriedades é uma consequência da própria natureza, e aspectos como composição química, diâmetro transversal, tamanho, forma, cristalinidade, propriedades da superfície, força e rigidez podem divergir entre fibras de mesma espécie (BLEDZKI; GASSAN, 1999). Savastano Jr. (2000) chama a atenção que os coeficientes de variabilidade das fibras vegetais são frequentemente maiores que 40%.

Passos (2005) afirma que para determinar a utilização de fibras vegetais em compósitos é necessário analisar detalhadamente características da fibra como, por exemplo, idade, tipo de celulose, e relação entre celulose e hemicelulose e lignina. Essa análise deve se relacionar também com as propriedades da matriz utilizada, visando devida compatibilidade e adesão entre as fases.

As fibras vegetais são compostas basicamente de carboidratos (celulose e hemicelulose) e lignina, além de pectina e minerais, em menor concentração. A celulose é o componente mais influente em suas propriedades mecânicas, propiciando grande resistência ao material. A hemicelulose nada mais é que um tipo de material celulósico com grau de polimerização baixo, com ligações mais frágeis que a celulose. A lignina é um polímero que une as fibras celulósicas como uma cola, conferindo resistência à compressão ao conjunto e protegendo os carboidratos. A pectina é um polissacarídeo com função aglutinante presente nas paredes celulares. Por fim, os minerais constituem as cinzas resultantes de incineração das fibras (PASSOS, 2005).

As propriedades mecânicas de cada tipo de fibra são influenciadas por uma série de fatores, como as diferentes composições químicas das células (celulose, lignina, etc.), ângulo helicoidal das microfibrilas de celulose, local de origem (clima, propriedades do solo), idade (maturação) e método de extração. A composição química, no entanto, tem relevância especial (BOLAÑOS, 2013).

O teor de celulose e de lignina se relacionam diretamente com o módulo de elasticidade e resistência à tração das fibras vegetais (PINO, 2005; CORRADINI *et al.*, 2009; BOLAÑOS, 2013). Segundo Thakur e Singha (2010), fibras com alta concentração de celulose, com material celulósico de alto grau de polimerização e baixo ângulo microfibrilar possuem alta resistência à tração. Em contrapartida, apresentam variações nas propriedades mecânicas entre fibras e também ao longo do comprimento de uma mesma fibra. Já a lignina tem influência direta na flexibilidade e resistência ao ataque de microrganismos (CORRADINI *et al.*, 2009), conferindo rigidez à parede celular (SILVA, 2003).

A Tabela 2 apresenta algumas das propriedades da fibra de coco verde e a Tabela 3, a composição química de algumas fibras vegetais. É possível perceber, comparando as duas tabelas, que a fibra de coco tem percentual bem menor de celulose e bem maior de lignina em

relação à maioria das demais fibras apresentadas, o que promove um comportamento diferenciado. Nota-se ainda que a fibra do bagaço de cana é a que possui composição mais semelhante à fibra do coco, embora não muito.

Em geral, fibras com alto teor de celulose são indicadas para uso como reforço de compósitos, como é o caso do juta, linho, rami e sisal, tendo em vista as melhores propriedades mecânicas que apresentam. Por outro lado, fibras com alto teor de lignina, como coco, juta e sisal, também se tornam interessantes por contarem com fortalecimento adicional das ligações internas, em especial para casos de processamento em altas temperaturas (comum no caso de matriz cimentante) (TOMCZAK, 2010). A maior flexibilidade proporcionada pela lignina garante melhor aderência do reforço à matriz, melhorando o desempenho do compósito como um todo (LEOCÁDIO, 2005)

Tabela 2 – Principais propriedades da fibra de coco verde

Propriedade	Valor
pH	5,4
Condutividade elétrica	1,8 dS/m
Relação C/N	132
Densidade	70 g/L
Porosidade total	95,6 %
Retenção de água	538 mL/L
Água facilmente assimilável	19,8 %
Porcentagem de lignina	35 a 45 %
Porcentagem de celulose	23 a 43 %
Porcentagem de hemicelulose	3 a 12 %

Fonte: Silva e Jerônimo (2012, p. 2196)

Tabela 3 – Composição química de algumas fibras vegetais (%)

Fibra	Celulose	Hemicelulose	Lignina
Algodão	82,7	5,7	-
Juta	64,4	12,0	11,8
Linho	64,1	16,7	2,0
Rami	68,6	13,1	0,6
Sisal	65,8	12,0	9,9
Bagaço de cana	32 – 48	19 – 24	23 – 32
Folha de abacaxi	70 – 82	18,0	5 – 10
Folha de bananeira	60 – 65	6 – 8	5 – 10
Coco verde	23 – 43	3 – 12	35 – 45

Fonte: adaptado de Silva e Jerônimo (2012, p. 2196)

As fibras vegetais normalmente possuem valores de módulo de elasticidade e densidade menores que as fibras sintéticas, aspectos importantes na tomada de decisão sobre a aplicabilidade do reforço (CALLISTER, 2012; LEVY NETO; PARDINI, 2006; SANTOS, 2006). A Tabela 4 traz algumas propriedades físicas de fibras (vegetais e sintéticas) normalmente utilizadas como reforço de compósito. A resistência à tração diz respeito à carga uniaxial por unidade de área aplicada no material no momento de ruptura, o alongamento informa o aumento percentual do seu comprimento durante esse processo, e o módulo de elasticidade é a razão entre tensão e deformação no regime elástico (no qual a deformação é proporcional à tensão e totalmente reversível) (SILVA, 2003).

Tabela 4 – Propriedades físicas de fibras utilizadas como reforço

Fibra	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm ³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)
Algodão	16 – 21	1,5 – 1,6	287 – 597	5,5 – 12,6	7 – 8
Juta	200	1,3	393 – 773	26,5	1,5 – 1,8
Linho	-	1,5	345 – 1035	27,6	2,7 – 3,2
Cânhamo	-	-	690	-	1,6
Rami	-	1,5	400 – 938	61,4 – 128	3,6 – 3,8
Sisal	50 – 300	1,45	511 – 635	9,4 – 22	3 – 7
Coco	100 – 450	1,15 – 1,45	131 – 175	4 – 13	15 – 40
Vidro – E	8 – 14	2,5	2000 – 3500	70	1,8 – 3,2
Vidro – S	10	2,5	4590	86	5,7
Kevlar-49	12	1,48	2800 – 3792	131	2,2 – 2,8
Carbono	7 – 10	1,6 – 1,9	4000	230 – 240	1,4 – 1,8

Fonte: Silva (2003, p. 24)

A fibra de vidro apresenta maior densidade, propiciando maior peso aos compósitos por ela constituídos. As fibras sintéticas minerais (vidro e carbono) possuem valores de resistência à tração e módulo de elasticidade muito superiores às vegetais. É interessante notar que embora a fibra de coco possua os menores valores de resistência à tração e módulo de elasticidade, é a fibra que apresenta maior alongamento, muito superior às demais.

Segundo Silva (2003), a baixa resistência à tração da fibra de coco é atribuída ao alto ângulo espiral e ao teor intermediário de celulose, já que esse componente é o principal responsável pela resistência mecânica das fibras vegetais. No entanto, o alto teor de lignina contribui para o desempenho mecânico da fibra e a torna mais resistente à biodegradação natural (SILVA, 2014). Entende-se que a resistência à tração e o módulo de elasticidade das fibras vegetais se relacionam diretamente com o teor de celulose presente e inversamente ao ângulo

espiral; enquanto o alongamento máximo de ruptura varia diretamente com o ângulo (SAVASTANO JR., 2000).

A fibra do coco verde possui alta resistência, baixa densidade, elevado percentual de alongamento, pequena resistência à tração e baixo módulo de elasticidade. Seu alto teor de lignina e polioses lhe confere grande força e durabilidade, e apresenta ainda baixo teor de celulose e grande ângulo espiral, o que promove um comportamento diferenciado (ROSA *et al.*, 2009). Ray e Bandyopadhyay (1965) afirmam que o elevado alongamento das fibras de coco é reflexo do perfeito ângulo espiral formado pelas microfibrilas vegetais ao redor do eixo.

Rosa *et al.* (2009) afirmam que as características da fibra de coco a tornam adequada para reforçar materiais, especialmente na elaboração de compósitos, onde tende a reduzir a densidade do conjunto com bom potencial de alongamento e média capacidade de reforço. É importante observar que a capacidade aglutinante da lignina traz possibilidade de melhoria do desempenho da interação fibra-matriz, assim como a ação do calor na formação do compósito.

O baixo custo e alta disponibilidade das fibras de coco e sisal motivam a investigação de sua utilização (AGOPYAN, 1991). Embora na construção civil seja possível utilizar fibras mais curtas, normalmente rejeitadas pelas indústrias têxtil e de estofados (tradicionais consumidoras das fibras), o baixo módulo de elasticidade compromete sua eficiência como reforço de matrizes cimentícias sujeitas a elevadas deformações (SAVASTANO JR., 2000).

Ademais, substâncias como a hemicelulose, carboidratos e açúcares, presentes nos materiais lignocelulósicos, além de outras de caráter ácido, liberadas em solução aquosa, têm efeito inibitório à reação de hidratação do cimento, retardando seu processo de cura, de forma que a utilização de fibras vegetais em matrizes cimentícias normalmente requer algum tipo de processamento prévio (BRASILEIRO *et al.*, 2012; SAVASTANO JR., 2000). De forma similar, o revestimento céreo apolar (denominado cutícula) presente na superfície da fibra de coco é incompatível com a maioria dos polímeros, sendo muitas vezes também necessário submeter a fibra a tratamentos químicos a fim de possibilitar sua utilização na fabricação de compósitos poliméricos (SATYANARAYANA *et al.*, 1990). Por outro lado, a utilização das fibras como reforço de solos não apresenta as mesmas limitações químicas, ampliando e facilitando as opções de aplicação.

2.7 SOLOS ARGILOSOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Os solos são considerados matrizes de origem mineral, assim como derivados do cimento Portland. A utilização de fibras para reforçar o solo é uma técnica muito antiga, com

indícios de utilização há milhares de anos. A partir da avaliação do efeito positivo que raízes de plantas conferiam ao solo, contribuindo para o aumento da resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, para a estabilidade de taludes, desde a década de 70 tem se investigado a possibilidade de reprodução de efeitos similares através do reforço do solo com fibras aleatoriamente distribuídas (BOLAÑOS, 2013).

A melhoria ou reforço de solos é a utilização de processos químicos e/ou físicos com o intuito de efetivamente melhorar as propriedades do solo. Em geral, os métodos visam promover aumento da resistência mecânica e diminuição da condutividade hidráulica e compressibilidade. Enquanto a “melhoria” diz respeito mais a processos químicos, o “reforço” é associado a utilização de adições físicas (CASAGRANDE, 2005).

O reforço de solos é geralmente aplicado em obras geotécnicas onde há necessidade de compactação do solo. A própria compactação é executada com o objetivo de melhorar o comportamento mecânico do solo, uniformizando o material, aumentando a resistência ao cisalhamento e reduzindo os vazios existentes, o que acaba por diminuir a condutividade hidráulica e a compressibilidade. A adição de materiais naturais ou sintéticos no solo tem por objetivo melhorar seu desempenho em algum aspecto ou aspectos específicos, sendo comumente utilizado fibras ou geossintéticos.

Combinações diversas de solos e fibras têm sido estudadas, em geral com desempenho bastante satisfatório para aplicações geotécnicas. Os principais aspectos que influenciam no comportamento do compósito são: tipo, concentração (teor), distribuição, orientação, comprimento e propriedades do reforço; tipo e propriedades da matriz (solo); adesão e aderência solo-fibra.

Solos argilosos normalmente têm significativo melhoramento do desempenho mecânico a partir do reforço com fibras pois a maior superfície de contato das partículas de argila proporciona uma melhor adesão matriz-reforço (DONATO, 2003; FEUERHEMEL, 2000). Após a transmissão do carregamento da matriz para o reforço, é a força de adesão solo-fibra é que mobiliza a resistência à tração da fibra, e a compatibilidade entre matriz e fibra pode potencializar esse efeito (ANAGNOSTOPOULOS; TZETZIS; BERKETIS, 2013; TANG *et al.*, 2007; TANG *et al.*, 2010b).

Normalmente há um teor ótimo de incremento de fibra que proporciona melhores propriedades mecânicas aos compósitos, a partir do qual os ganhos passam a reduzir (BOLAÑOS, 2013; CASAGRANDE *et al.*, 2002; CASAGRANDE; COOP; CONSOLI, 2006). Embora saiba-se que o posicionamento do reforço no sentido das deformações de tração do solo potencializa o desempenho do conjunto (FESTUGATO *et al.*, 2017), a distribuição aleatória no

solo evita a geração potenciais planos de fragilidade e tende a proporcionar uma resistência mais isotrópica (CASAGRANDE *et al.*, 2002; CASAGRANDE; COOP; CONSOLI, 2006).

Os ganhos de resistência mecânica são diretamente proporcionais ao comprimento da fibra empregada até certo limite, onde passa a ocorrer queda do desempenho com o aumento da fibra (BOLAÑOS, 2013; PRABAKAR; SRIDHAR, 2002). Segundo Savastano Jr. (2000), em compósitos de matriz frágil reforçada com fibras de baixo módulo de elasticidade (como as do coco) predomina o arrancamento da fibra à ruptura, diante de elevadas solicitações. Nesses casos, a aderência entre as fases é o principal fator de influência na tenacidade do composto.

Em geral, a adição de fibras em solos argilosos promove o aumento da condutividade hidráulica, diretamente relacionado ao teor de fibras adicionado (AL WAHAB; EL-KEDRAH, 1995). A bibliografia mostra, no entanto, que para percentuais menores de fibras a condutividade hidráulica permanece praticamente invariável (HEINECK, 2002).

Feuerharmel (2000) demonstra ainda que adição de cimento em solo argiloso reforçado com fibra promovem a floculação e aglomeração das partículas de argila em volta das partículas de cimento, segregando as fibras que outrora se aderiam à argila. Em solos granulares a adição de fibras promove um aumento bem mais significativo da condutividade hidráulica.

Miller e Rifai (2004) também observaram que acréscimos de até 1% (em peso) de fibras de polipropileno em solo argiloso de classificação CL não promovem alteração da ordem de grandeza da condutividade hidráulica saturada à água. Percentuais maiores de fibras, por outro lado, prejudicam a adesão da mistura e promovem aumentos da permeabilidade, como verificado por Oliveira Jr. (2018), em teor de 2% de fibra de coco para o mesmo solo ensaiado neste trabalho.

Oliveira Jr. (2018) estudou a adição de 0,5%, 1% e 2% (em peso) de fibras curtas de coco randomicamente distribuídas em mesmo solo argiloso compactado utilizado no presente estudo, e encontrou influências significativas. Em imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) o autor verificou perda de adesão na mistura com 2% de fibras, em razão da pontos de aglomeração da fibra que prejudicavam a interação solo-fibra. Enquanto a compressibilidade aumentou continuamente com adição de fibras, a condutividade hidráulica se manteve na mesma ordem de grandeza para acréscimos de até 1% e a resistência ao cisalhamento máxima ocorreu para o incremento de 1%.

2.8 FLUXO EM MEIO POROSO

Os diferentes tipos de fluxo que podem ocorrer no solo dependem dos gradientes atuantes em cada caso. Tendo em vista que todo sistema tende ao equilíbrio, os fluxos hidráulicos, químicos, térmicos ou elétricos ocorrem a partir da existência de uma força motriz do movimento, sempre no sentido do maior para o menor potencial. O fluxo hidráulico contempla o movimento dos fluidos, e cada taxa de fluxo se relaciona linearmente com sua correspondente força motriz (gradiente) a partir de um coeficiente de condutividade (MITCHELL, 1993). Considerando a condutividade hidráulica, o movimento dos líquidos é motivado pelo gradiente hidráulico, enquanto o gradiente de pressão controla o deslocamento dos gases.

Sabe-se ainda que o movimento dos fluidos também é capaz de ser afetado por fenômenos de atenuação devido a interações químicas e/ou microbiológicas possíveis de ocorrer diante das características do meio poroso e do percolante. E o aumento do comprimento de percolação, em geral, tende a reduzir a taxa de movimentação, pois aumenta a possibilidade de obstruções à passagem do fluido e ocorrência de reações químicas e/ou biológicas durante o transporte (LOPES, 2011). Esses fenômenos, no entanto, não foram considerados neste trabalho.

2.8.1 Fluxo de líquidos

O líquido comumente mais presente no solo é a água, cujo fluxo se relaciona com os fenômenos de deslocamento em seus vazios, como infiltração, drenagem, capilaridade, evaporação e absorção pela vegetação (PINTO, 2005). Darcy propôs, em 1856, a existência de proporcionalidade direta entre a velocidade de percolação do fluido (v) e o gradiente hidráulico (i) através de equação empírica que recebeu seu nome (1). O coeficiente de proporcionalidade (k) encontrado traduz a facilidade do fluido percolar pelos vazios intersticiais de um solo saturado, recebendo o nome de coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica. O sinal negativo da equação indica que o fluxo ocorre na direção da maior diminuição da carga hidráulica (BLIGHT, 2013; FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012).

$$v = -k_{sat} * \frac{\delta h}{\delta y} \text{ (Lei de Darcy)} \quad (1)$$

Onde:

v : velocidade de percolação do fluido (m/s).

k_{sat} : coeficiente de permeabilidade saturada do fluido (m/s).

$\frac{\delta h}{\delta y}$: gradiente hidráulico do fluido na direção ‘y’, designado “ i_{hy} ”.

Essa relação foi definida originalmente, no entanto, considerando percolação de fluidos viscosos e incompressíveis em um meio poroso, homogêneo, isotrópico e saturado sob regime de fluxo unidimensional laminar a temperatura constante (BICALHO; MACHADO; GERSCOVICH, 2015; MITCHELL, 1993), podendo também ser escrita considerando as direções ‘x’ ou ‘z’ isoladamente (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012). Posteriormente a aplicação foi estendida para fluxos tridimensionais em meios anisotrópicos saturados. O coeficiente de permeabilidade, portanto, depende tanto das propriedades do solo quanto do fluido (MITCHELL, 1993), e para um dado conjunto ‘solo saturado + fluido de saturação’, pode ser considerado constante (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012).

Para os casos de saturação, é possível determinar uma relação entre a condutividade hidráulica (k) e a permeabilidade intrínseca do solo (K) através da Equação (2) (MITCHELL, 1993). A permeabilidade intrínseca é usada para converter as propriedades de fluxo utilizadas entre áreas do conhecimento distintas e, na geotecnia, para o estudo de solos não saturados. Independente das propriedades e quantidade do fluido percolante, ela representa as características do meio poroso isoladamente. Assim, a partir da medição de condutividade hidráulica saturada à água pode-se calcular a condutividade hidráulica ao ar para o solo seco nas mesmas condições de vazios – ao considerar o ar e a água como as duas únicas fases fluidas no solo. No entanto, o coeficiente de permeabilidade/condutividade hidráulica, por considerar as propriedades do fluido percolante e do solo conjuntamente, é amplamente mais utilizado na geotecnia (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012).

$$K = k_{sat} * \frac{\mu}{\rho * g} \quad (2)$$

Onde:

K : permeabilidade intrínseca do solo (m^2).

k_{sat} : coeficiente de permeabilidade saturada (m/s).

μ : viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s).

ρ : densidade absoluta (massa específica) do fluido (kg/m^3).

g : aceleração da gravidade (m/s^2).

Para um solo de configuração homogênea a condutividade hidráulica depende mais das partículas finas, pois mesmo um pequeno percentual de finos pode vir a obstruir (entupir) a passagem do permeante, comprometendo de forma significativa a percolação. De forma geral, o tamanho dos poros influencia diretamente na velocidade de fluxo do fluido, e é possível relacionar a permeabilidade saturada com o índice de vazios de um solo arenoso (BLIGHT, 2013; MITCHELL, 1993).

Solos argilosos, entretanto, muitas vezes apresentam discrepâncias em razão principalmente da natureza dos minerais argílicos, com excesso de cargas elétricas e grande superfície específica, a qual propicia o agrupamento de partículas e formação de poros com diferentes dimensões entre os aglomerados (MITCHELL, 1993). A densidade de cargas superficiais, a sorção, a troca catiônica e a dupla camada se relacionam com a superfície específica dos minerais argílicos, e favorecem intensa interatividade com o líquido percolante, a depender da sua natureza. Além de propiciar ocorrência de importantes fenômenos químicos e elétricos durante o fluxo, essas propriedades afetam a expansividade, a retenção de água, a compressibilidade e a resistência ao cisalhamento do solo (BICALHO; MACHADO; GERSCOVICH, 2015).

2.8.2 Fluxo de gases

A forma como um fluido percola em um meio está diretamente relacionado com suas propriedades. Conforme já mencionado, a Lei de Darcy (1) foi estabelecida para fluidos viscosos e incompressíveis em um meio poroso saturado sob regime laminar (MITCHELL, 1993). A direta proporcionalidade proposta por Darcy permite obter a permeabilidade intrínseca de solo percolado por fluido viscoso e incompressível submetido a gradiente de pressão aplicado entre suas extremidades através da Equação (3) (MACIEL, 2003).

$$K_{ia} = \frac{v * \mu * L}{\Delta P} \quad (3)$$

Onde:

K_{ia} : permeabilidade intrínseca para fluidos incompressíveis (m^2).

v : velocidade de Darcy (m/s).

μ : viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s).

L : comprimento de percolação (altura) da amostra de solo (m).

ΔP : gradiente de pressão aplicada ($P_E - P_S$).

P_E : pressão de entrada da amostra (Pa).

P_S : pressão de saída da amostra (Pa).

A condição de saturação diz respeito à necessidade de existência de um único fluido no meio, sem interferência de outros fluidos na percolação, incluindo tanto líquidos, quanto gases. Entretanto, considera-se, em geral, os líquidos, incompressíveis, e os gases, compressíveis – sujeitos ao fenômeno de expansão dos gases (MITCHELL, 1993). Fluidos gasosos sofrem um aumento de volume ao longo do trajeto, o que resulta em maior velocidade de percolação e compromete a proporcionalidade proposta por Darcy. A validação da Lei de Darcy para transporte de gases exige, então, ou a comprovação de manutenção da proporcionalidade entre velocidade e gradiente durante a percolação, ou modificações na formulação original (MACIEL, 2003).

Vale ressaltar, no entanto, que a expansão sofrida pelo gás depende dos níveis de pressão aplicados e aumenta com a aproximação do fluido à extremidade de saída do fluxo (IGNATIUS, 1999). Blight (1971, *apud* MACIEL, 2003) e Loiseau, Cui e Delage (2002) constataram ausência de linearidade para gradientes de pressão superiores a 200 kPa, situações em que a Lei de Fick pode ser uma alternativa em substituição à Lei de Darcy. Gradientes mais baixos, no entanto, não promovem tanta expansão e conseguem manter a proporcionalidade de Darcy (BLIGHT, 2013; JUCÁ; MACIEL, 1999; MACIEL, 2003; MACIEL; JUCÁ, 2000).

Ignatius (1999) desenvolveu modificações conceituais para que fosse possível utilizar a Lei de Darcy para todos os níveis de pressão de fluidos compressíveis. Partindo das premissas de que os gases obedecem a Lei dos Gases Ideais, que a expansão do gás provoca variação de volume, e que o fluxo é constante em massa e isotérmico, o referido autor desenvolveu a Equação (4) para obtenção da permeabilidade intrínseca do solo para fluidos compressíveis (K_a). É possível verificar, ainda, a influência da compressibilidade do gás na permeabilidade a partir da relação numérica entre K_a e K_{ia} , demonstrada na Equação (5) (LANGFELDER *et al.*, 1968, *apud* MACIEL, 2003). Essa relação indica que além da influência do gradiente de pressão aplicado, a compressibilidade do gás também depende da pressão média (P_m), ou seja, varia para diferentes valores de entrada (P_E) e saída (P_S) ainda que o ΔP seja o mesmo.

$$K_a = \frac{2 * \mu * L * P_S * v}{(P_E^2 - P_S^2)} \quad (4)$$

$$\frac{K_a}{K_{ia}} = 1 - \frac{\Delta P}{2P_m} \text{ sendo } P_m = \frac{P_E + P_S}{2} \quad (5)$$

Onde:

K_a : permeabilidade intrínseca para fluidos compressíveis (m^2).

Cabe destacar que a viscosidade do fluido permeante também tem bastante influência em sua percolação: quanto maior a viscosidade, mais difícil a movimentação do fluido por entre os vazios e, conseqüentemente, menor sua permeabilidade. Assim, em razão da maior viscosidade da água, tem-se que a máxima condutividade hidráulica ao ar (k_a), obtida com o solo seco ($S = 0\%$), será necessariamente maior que a máxima condutividade hidráulica à água (k_w), em solo saturado ($S = 100\%$) (BARBOSA *et al.*, 2015; FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012; MACIEL, 2003).

Ademais, gases podem adquirir uma velocidade adicional devido a um fenômeno de “deslizamento” do gás junto às partículas sólidas do solo, o qual tem efeito significativo quando o comprimento médio de deslocamento das moléculas de gás (“*mean-free path*”) é similar ao diâmetro dos poros do solo (IGNATIUS, 1999). A situação extrema, denominada fluxo de Knudsen, pode ocorrer quando o comprimento médio de deslocamento das moléculas de gás for muito maior que o diâmetro dos poros, e a viscosidade será considerada desprezível pois as moléculas do gás não mais colisão entre si, apenas com as paredes sólidas. No entanto, Alzaydi e Moore (1979 *apud* MACIEL, 2003) afirmam que esse fenômeno tem pouca influência no fluxo viscoso real e pode ser desprezado, pois a Lei de Darcy proporciona uma boa aproximação do fluxo de gases mesmo em solos argilosos.

2.9 SOLOS NÃO SATURADOS

O comportamento macromecânico de um solo depende significativamente da energia de contato/coesão entre suas partículas e agregados (GU *et al.*, 2014), a qual resulta das várias forças físico-químicas atuantes, como as forças de van der Waals, forças elétricas (dipolo) de atração ou repulsão, cimentação causada por precipitação de soluto, e sucção devido às poropressões negativas e superfície de tensão do líquido (LU; WU; TAN, 2007). Não obstante maiores frações argilosas (partículas menores) promovam maior número de contato entre as partículas do solo (TAMRAKAR *et al.*, 2005), o efeito da sucção prevalece, tendo sido considerada um dos principais parâmetros de descrição do comportamento tanto macro como micromecânico de solos não saturados (TANG *et al.*, 2016).

A sucção é um estado de tensão que representa a capacidade de reter água de um solo, composta pela sucção matricial e osmótica. A primeira é um fenômeno físico, relacionada com as propriedades físicas e mineralógicas do solo, enquanto a sucção osmótica diz respeito à

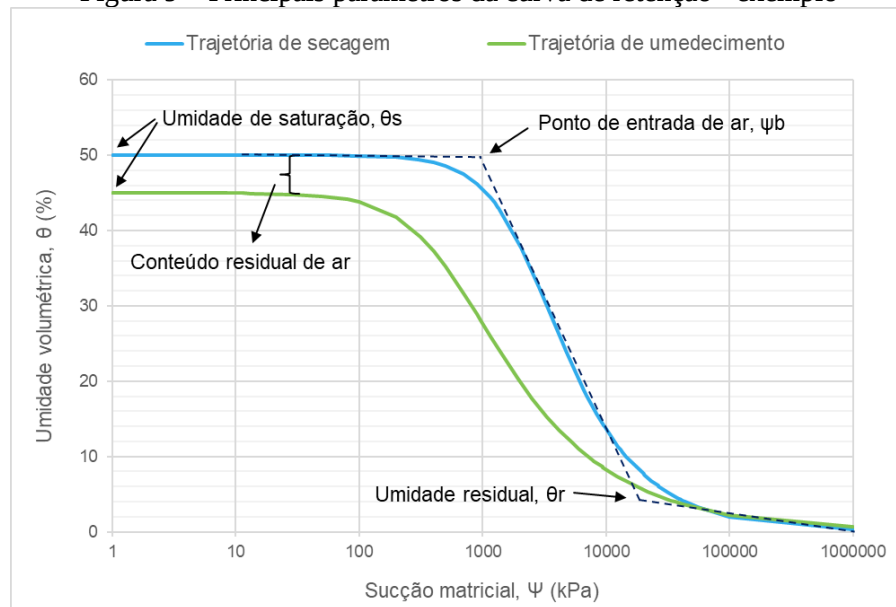
concentração química da água presente no solo. A afinidade do solo em absorver água vai depender da quantidade de água presente nos vazios: solos mais secos apresentam grande demanda por água (alta sucção) e solos com alta umidade possuem menor afinidade de absorção (menor sucção) (JUCÁ, 1990).

Antes do ponto de entrada de ar, solos inicialmente saturados tendem a permanecer saturados mesmo com grandes quantidades de água perdida (TANG *et al.*, 2011b). Após esse ponto, o solo se torna não saturado, e pequenas variações de umidade podem resultar em aumentos significativos de sucção (JUCÁ, 1990; FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012).

A relação entre o conteúdo de água do solo (umidade volumétrica ou grau de saturação) e a sucção mátrica atuante (poropressão) pode ser representada graficamente pela curva característica (ou curva de retenção), permitindo a caracterização hidráulica e compreensão da circulação de umidade do solo (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012). A formatação dessa curva dependerá da distribuição dos poros do solo e sua compressibilidade em relação à sucção, frequentemente assumindo a forma de um “S” (MARINHO, 2005) e podendo assumir configuração distinta, ainda, se a variação da umidade ocorreu devido a secagem ou umedecimento, característica denominada histerese (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012).

Os principais parâmetros obtidos através da curva característica são mostrados na Figura 9, um exemplo típico para solo argiloso. O ponto de entrada de ar (Ψ_b) indica o valor de sucção acima da qual há incorporação de ar na estrutura do solo. A umidade residual (θ_r) é o teor de umidade a partir do qual não ocorrem variações significativa de umidade com o aumento da sucção. A umidade de saturação (θ_s) é o teor de umidade em que todos os vazios do solo estão preenchidos por água (FREDLUND; XING, 1994).

Figura 9 – Principais parâmetros da curva de retenção - exemplo

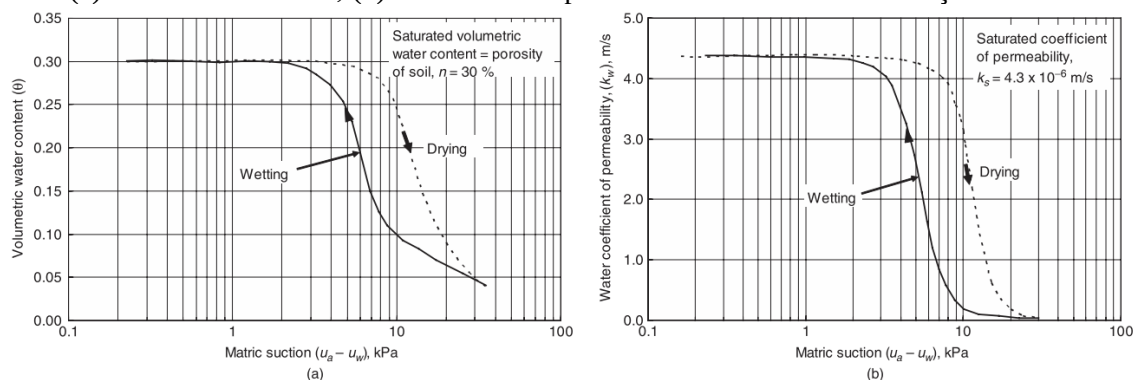


Fonte: adaptado de Fredlund e Xing (1994, p. 522)

A histerese é um fenômeno que envolve aspectos de superfície e se relaciona com a forma do material perder (secagem) ou absorver (umedecimento) água diferentemente (MARINHO, 2005), podendo ser percebida na curva característica (Figura 10a) e na curva de condutividade hidráulica quando representada em função da sucção matricial (Figura 10b). Por outro lado, se torna quase inexistente quando a curva de condutividade hidráulica é expressa em função da umidade volumétrica ou do grau de saturação (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012), conforme mostrado na Figura 11.

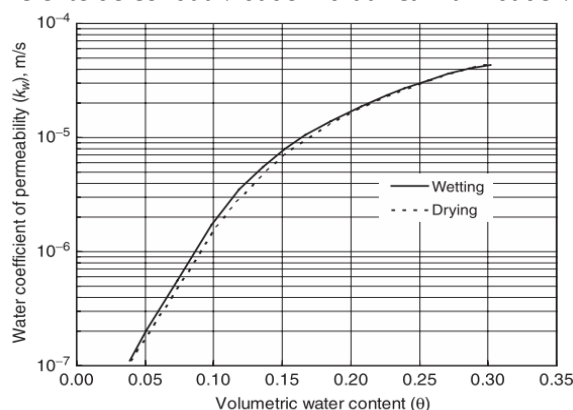
Figura 10 – Indicação de histerese em curvas

(a) curva característica; (b) coeficiente de permeabilidade hidráulica x sucção mátrica



Fonte: Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012, p. 339)

Figura 11 – Histerese quase inexistente
Curva ‘coeficiente de condutividade hidráulica $\times$ umidade volumétrica’



Fonte: Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012, p. 339)

As informações fornecidas pela curva de retenção são essenciais para compreender os fenômenos relacionados com fluxo, resistência e compressibilidade dos solos não saturados. Embora receba esse nome, a curva não é uma característica própria do solo, pois é afetada por fatores como trajetória considerada (secagem/umedecimento) e história de tensões do material poroso; porém, no geral, pode-se dizer que a retenção de água é influenciada por: índice de vazios, teor de umidade inicial, estrutura e mineralogia do solo. A depender do tipo de solo e do método de modelagem matemática utilizado para ajuste das curvas, esses fatores irão interferir em seu formato de maneiras diferentes (FREDLUND; XING; HUANG, 1994; MARINHO, 2005).

Tang *et al.* (2016) sugerem que a resistência do solo tende a diminuir com a profundidade do perfil em razão da ação predominante da evaporação na região mais superficial, onde há indução de maior gradiente de sucção. Com a secagem contínua, a zona não saturada se expande gradualmente até maiores profundidades (SHOKRI *et al.*, 2008). O processo de secagem promove melhoria natural do comportamento mecânico do solo em razão do aumento da sucção atuante, e nas argilas promove ainda a contração e reestruturação de sua microestrutura, que resultam em um arranjo mais denso, o que, em geral, aumenta a resistência do solo (TANG *et al.*, 2016).

Utilizando micropenetrômetros, Tang *et al.* (2016) perceberam que a máxima profundidade cuja resistência era afetada pelo processo de secagem corresponde à interface das zonas não saturada e saturada do perfil. As amostras saturadas naturais (não compactadas) apresentaram valores por volta de 20 mm, e as não saturadas compactadas, 25 mm.

Enquanto em solos saturados a permeabilidade (para um dado fluido) pode ser entendida como constante, função principalmente do índice de vazios interconectados, granulometria,

configuração e mineralogia do solo; em solos não saturados esse coeficiente pode variar muito a partir do grau de saturação e estado de tensão, mas especialmente para mudanças da sucção em casos acima do valor de entrada de ar (BLIGHT, 2013; FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012). Assim como o ar obstrui a passagem da água no solo não saturado, o inverso também é verdadeiro: a água e as partículas sólidas bloqueiam o fluxo de gases.

Um mesmo solo compactado pode, ainda, apresentar variação em sua permeabilidade ao ar e à água a partir de sua estrutura interna, determinada pela umidade e energia empregadas durante a compactação. Considerando a utilização de uma mesma energia, se for executada com umidade abaixo da ótima (ramo seco da curva de compactação), o solo apresentará configuração floclada, com partículas de argila aleatoriamente orientadas e com grande resistência ao reordenamento durante o processo. Esse tipo de disposição cria poros grandes em ambas as direções (horizontal e vertical), facilitando a percolação de fluidos (LAMBE, 1958, *apud* BOSCOV, 2008; MITCHELL, 1993).

Já a compactação realizada no ramo úmido cria uma estrutura dispersa, em que as partículas de argila se distribuem em arranjos paralelos horizontalizados, dificultando o fluxo vertical do fluido, mas favorecendo o fluxo horizontal. Assim, as condições ótimas de compactação para uma aplicação podem não ser adequadas para outra e devem ser avaliadas caso a caso. Fatores externos, como presença de fissuras, trincas e raízes também podem aumentar bastante a condutividade de camadas de solos previamente compactadas (LAMBE, 1958, *apud* BOSCOV, 2008; MITCHELL, 1993).

Entende-se as partículas de ar existentes no solo não saturado como obstruções à passagem de água, bem similar à fase sólida, de forma que o solo não saturado pode ser tratado como um solo saturado com conteúdo de água reduzido (CHILDS, 1969 *apud* FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012), onde a condutividade hidráulica passa a depender também da quantidade de água presente e do histórico de saturação (MASROURI; BICALHO; KAWAI, 2008). Variações no volume de água do solo normalmente provocam grandes alterações na condutividade hidráulica da água no solo, razão pela qual o coeficiente de permeabilidade é descrito como função do grau de saturação (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012).

A redução de água no solo implica em maior tortuosidade dos percursos de fluxo: uma diminuição aritmética da umidade volumétrica produz uma redução logarítmica no coeficiente de permeabilidade (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012). Quanto maior a presença de água no solo, maior sua facilidade de infiltração e percolação, o que reflete num maior coeficiente de permeabilidade à água. Por outro lado, os gases sofrerão uma diminuição de área

disponível nos vazios para sua movimentação, reduzindo a condutividade hidráulica do solo aos gases.

O contrário também é verdadeiro, e é fácil perceber que a condutividade hidráulica à água e ao ar se comportam de forma inversa a partir do grau de saturação do solo. Em graus de saturação mais elevados o ar pode estar ocluso, enquanto para graus de saturação mais reduzidas a fase ar se torna predominantemente contínua (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012). Marinho (1994) aponta que a distribuição do ar nos vazios do solo vai depender da trajetória de mudança da umidade (secagem ou umedecimento), além do grau de saturação inicial.

No processo de secagem partindo da saturação, a água presente nos grandes poros é expulsa primeiro, passando a percolar nos caminhos menores (naturalmente mais tortuosos) e abrindo espaço para a presença do ar. O aumento da sucção mátrica promove o progressivo decréscimo do conteúdo de água no solo, aproximando cada vez mais a interface água-ar das partículas sólidas, e dificultando o fluxo da água (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012).

A Lei de Darcy foi, então, generalizada para solos não saturados considerando a condutividade hidráulica como função da umidade volumétrica/grau de saturação ou da poropressão (sucção mátrica) do solo, recebendo o nome de Equação de Buckingham-Darcy (6) (BICALHO; MACHADO; GERSCOVICH, 2015; FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012).

$$\begin{aligned} v_x &= -k_x * \frac{\delta h_h}{\delta x} \\ v_y &= -k_y * \frac{\delta h_h}{\delta y} \\ v_z &= -k_z * \frac{\delta h_h}{\delta z} \quad (\text{Equação de Buckingham-Darcy}) \end{aligned} \quad (6)$$

Onde:

v_i : velocidade de percolação do fluido na direção 'i' (m/s).

k_i : coeficiente de permeabilidade hidráulica não saturada na direção 'i', função da sucção mátrica ou teor de umidade volumétrica (m/s).

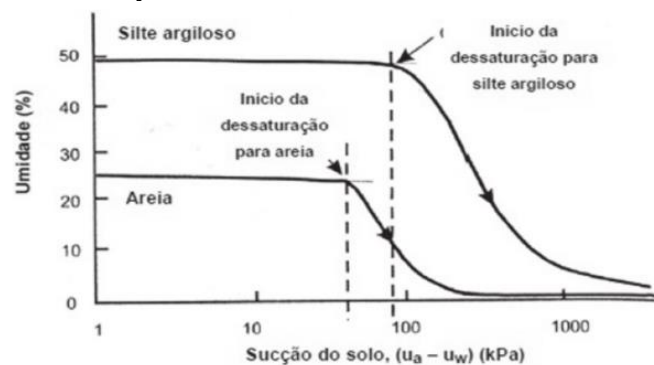
$\frac{\delta h_h}{\delta i}$: gradiente hidráulico na direção 'i', designado " i_{hi} ".

A ação da sucção tem efeitos interessantes no solo. Enquanto solos saturados apresentam condutividade à água basicamente proporcional ao volume de vazios efetivamente

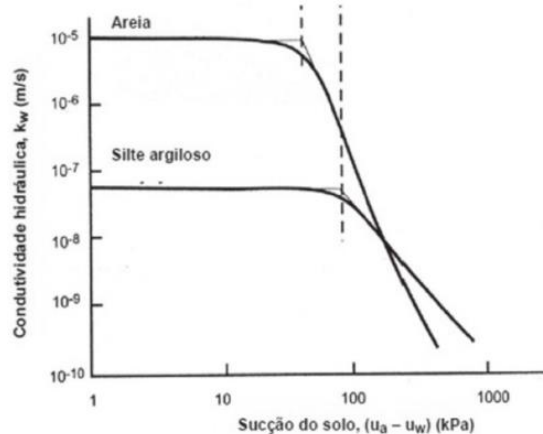
disponível para o fluxo; quanto maiores os vazios nos solos não saturados, mais brusca será a variação de sua condutividade hidráulica com aplicação de sucção. Solos mais finos, por outro lado, possuem maior capacidade de reter fluidos mesmo para altos valores de sucção, e condutividade varia de forma mais suave, sendo possível mesmo atingir valores maiores do que solos com maiores índices de vazios, para uma dada sucção atuante (BICALHO; MACHADO; GERSCOVICH, 2015).

A Figura 12a mostra a comparação entre curvas de retenção de solo argiloso e arenoso. A condutividade hidráulica do solo não saturado se relaciona com a respectiva sucção mátrica atuante através da curva de condutividade hidráulica (ver Figura 12b), onde a saturação é tida como uma condição específica de condutividade hidráulica praticamente constante (BICALHO; MACHADO; GERSCOVICH, 2015).

Figura 12 – Correlação entre curvas de um solo arenoso e um silte argiloso



(a) curvas de retenção (curva característica)



(b) condutividade hidráulica

Fonte: Bicalho, Machado e Gerscovich (2015, p. 302)

Analisando a Figura 12b, percebe-se que a condutividade à água tende a permanecer praticamente constante nos solos saturados até o valor de entrada de ar, quando há incorporação de ar na estrutura do solo e passa a haver variação no grau de saturação. A partir deste ponto,

há um rápido decréscimo, com taxa de redução mais acentuada em solos de maior granulometria – conforme mencionado anteriormente, revelando que para valores de sucção maiores do que ao indicado no ponto de interseção das curvas, a condutividade hidráulica do solo mais fino será maior (ainda que na condição saturada seja cerca muito menor).

Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012) explicam que geralmente para graus de saturação abaixo de 85% o ar tende a se comportar como fase contínua, mas acima de 90% o ar se torna ocluso e seu fluxo passa a ocorrer apenas por processo de difusão. Vale ressaltar que a distribuição do ar nos vazios do solo vai depender do se grau de saturação inicial e se está em trajetória de secagem ou umedecimento (MARINHO, 1994). Avaliar a permeabilidade ao ar em função do teor de umidade ou grau de saturação do solo pode determinar a eficiência de retenção dos gases ao longo dos condicionantes ambientais (MARIANO, 2008).

Maciel e Jucá (2000) encontraram decaimento brusco no fluxo de ar a partir de 80% de saturação para solo argilo-arenoso (classificação SC no SUCS) ensaiado na trajetória de secagem. Para argila de alta plasticidade (com 10% de fração $< 2\mu\text{m}$ e classificação CH no SUCS) ensaiada no ciclo de secagem, Maciel (2003) verificou valores de permeabilidade quase constantes para $S < 60\%$, decréscimo lento entre 60% e 85%, e decréscimo drástico a partir de 85% de grau saturação.

Loiseau, Cui e Delage (2002) acharam variação lenta do coeficiente de permeabilidade ao ar de argila (com 55% de fração $< 2\mu\text{m}$) para grau de saturação entre 55% e 85%, e rápido decréscimo para $S > 85\%$. Mariano (2008) constatou a primeira fase com $S < 65\%$, a segunda com $65\% < S < 75\%$ e a terceira, $S > 75\%$ para solos areno-argiloso e argilo-arenoso de baixa plasticidade (classificação SC e CL no SUCS, respectivamente) em ciclo de secagem.

Lopes (2011) encontrou brusca queda de permeabilidade ao ar para saturação acima de 90% em dois solos siltosos com baixa compressibilidade (ambos com classificação ML no SUCS) e também para duas misturas de solo com composto orgânico proveniente de unidade de compostagem de podas de árvores em diferentes proporções, ambos com características de solos siltosos com alta compressibilidade (classificação MH no SUCS). Todas as amostras apresentaram valores de permeabilidade estáveis até a saturação de aproximadamente 35%.

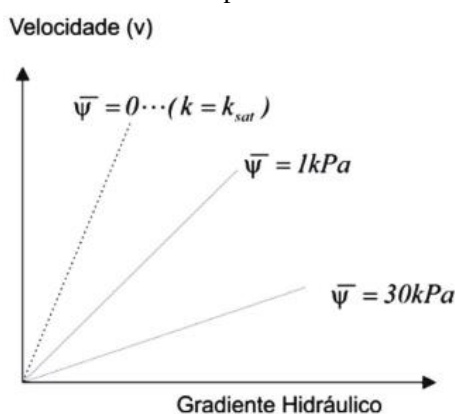
Assim, tem-se que para graus de saturação mais baixos (em geral, entre 55% e 65%) a presença de água praticamente não interfere na permeabilidade ao ar do solo, e as variações estariam diretamente relacionadas com a estrutura (floculada ou dispersa) e densidade de compactação do solo. O grau de saturação a partir do qual é verificada brusca mudança da taxa de variação do coeficiente de permeabilidade ao ar indica o ponto de entrada generalizada de

ar (GAE), no qual ocorre a passagem da fase contínua do ar para o estado descontínuo (e vice-versa, a depender da trajetória de umidade empregada) (MACIEL, 2003; MARIANO, 2008).

É possível determinar a condutividade hidráulica dos solos (saturados ou não) a partir de métodos experimentais ou indiretos. Experimentalmente, em campo ou laboratório, pode-se aplicar métodos permanentes (estacionários), quando a quantidade de fluxo independe do tempo; ou métodos transientes, quando há dependência do tempo. Os métodos permanentes são normalmente bem semelhantes aos utilizados para determinação do coeficiente de permeabilidade em solo saturado, podendo ser aplicado fluxo ou gradiente hidráulico constante. Quando a taxa de fluxo (vazão) é constante, mede-se a sucção ocorrida; e já com o gradiente hidráulico constante, mede-se a taxa de fluxo, determinando a condutividade hidráulica não saturada pela Lei de Darcy (BICALHO; MACHADO; GERSCOVICH, 2015).

É interessante notar que para uma mesma sucção aplicada, a velocidade é proporcional ao gradiente hidráulico atuante (ver Figura 13). Já a condutividade hidráulica, tida como a inclinação da reta entre velocidade e gradiente, varia inversamente com a sucção (com exceção do ar, situação em que a condutividade hidráulica é proporcional à sucção). Já nos solos saturados – mantidas constantes as tensões efetivas aplicadas – a condutividade hidráulica é constante, pois a poropressão permanece nula (BICALHO; MACHADO; GERSCOVICH, 2015).

Figura 13 – Condutividade hidráulica para diferentes valores de sucção média



Fonte: Bicalho, Machado e Gerscovich (2015, p. 303)

Embora seja possível determinar experimentalmente a função de permeabilidade não saturada de um solo, esse processo é bastante complexo, dispendioso e longo (GERSCOVICH; GUEDES, 2004; GERSCOVICH; SAYÃO, 2002). Modelos matemáticos foram criados para permitir o ajuste de dados obtidos a partir da curva de retenção e estabelecimento da função de permeabilidade não saturada, ou seja: determinar a relação existente entre permeabilidade e

sucção através de equações analíticas, experimentais ou estatísticas (BROOKS; COREY, 1966; FREDLUND; XING; HUANG, 1994; van GENUCHTEN, 1980; MARINHO, 2005). Este trabalho utilizou o modelo de van Genuchten (1980) diante da simplicidade e eficiência demonstrada a questões de fluxo.

2.10 DURABILIDADE DE MATERIAIS

Técnicas e materiais comumente utilizados na Engenharia Civil frequentemente possuem avaliação de qualidade e desempenho normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Inovações, por outro lado, vão sendo testadas experimentalmente a partir dos conhecimentos científicos publicados, com o intuito de desenvolver melhorias continuamente e conseguir comprovar sua viabilidade técnico-econômica (SILVA, 2002). O desenvolvimento de novos materiais e investigação de sua aplicabilidade deve levar em consideração aspectos como custo, logística, trabalhabilidade, segurança e, principalmente, durabilidade (SANTANA *et al.*, 2014; SILVA, 2002) pois a estimativa de vida útil é essencial para a avaliação da viabilidade de utilização.

Neste trabalho será adotado o conceito de durabilidade apresentado por John (1987, p. 7), em que se relaciona à capacidade de “manter o seu desempenho acima dos níveis mínimos especificados, de maneira a atender as exigências dos usuários, em cada situação específica”. Assim, o foco é a variação do desempenho ao longo do tempo em relação à aplicação desejada, ou seja, as alterações das características e propriedades com o tempo; e não os processos de degradação física ou química sofridos isoladamente.

Esse critério de avaliação permite a correlação entre ensaios experimentais realizados e as necessidades de utilização, a partir da maior ou menor importância em cada caso, além da comparação de resultados entre materiais diferentes destinados a um mesmo uso. Vale salientar que a consideração de uma “durabilidade intrínseca” deveria ser, no mínimo, relativa, pois é completamente dependente dos agentes degradantes atuantes (JOHN, 1987).

A durabilidade pode ser investigada a partir de métodos que exponham o material às condições de uso ao longo do tempo, a partir de métodos de envelhecimento natural, ensaios em uso ou envelhecimento acelerado, onde a comparação do desempenho antes e depois permitem avaliar a degradação sofrida, e, consequentemente, sua durabilidade (SANTANA *et al.*, 2014; SILVA, 2002).

Os ensaios de envelhecimento natural implicam na exposição às condições de uso real, a partir da disposição em bancadas com inclinação de 30° voltadas para o norte magnético, com

o intuito de maximizar a incidência solar. Embora permitam aproximar a análise real da degradação sofrida, é um processo bastante lento, requerendo longos períodos de espera (SILVA, 2002).

Os ensaios em uso são mais eficientes que os de envelhecimento natural pois possibilitam uma avaliação sistêmica do desempenho, a partir das interações reais que ocorrem nas condições de exposição no local. No entanto, também demandam muito tempo e englobam maiores custos de implementação e monitoramento (SILVA, 2002).

Já os ensaios de envelhecimento acelerados possuem a grande vantagem da rapidez, simulando a passagem de tempo a partir da exposição do material aos seus principais agentes de degradação atuantes. Por outro lado, a investigação fica sujeita a resultados imprecisos, pois é possível que ocorram mecanismos paralelos durante os ensaios divergentes das condições reais, em função de condições diferenciadas. O uso de ciclos de molhagem e secagem é uma das formas mais comuns de obter tal simulação (SILVA, 2002).

Santana *et al.* (2014) estudaram os efeitos do envelhecimento natural por um ano de compósitos formados por pó de coco em matriz cimentícia. Foram comparados cinco tipos de compósitos sujeitos ao envelhecimento interno, em laboratório com temperatura controlada, e externo, ao ar livre sujeito às intempéries naturais. Embora a interação entre o material vegetal e a matriz cimentícia seja muito divergente daquela que ocorre com o solo, pode-se destacar que se percebeu modificações na porosidade, absorção de água, módulo de ruptura, módulo de elasticidade e tenacidade dos compósitos ao longo do tempo.

No estudo (SANTANA *et al.*, 2014), os compósitos processados (que passaram por adições químicas em sua formação) demonstraram melhoria das propriedades mecânicas com o envelhecimento, especialmente em condições internas. Já o compósito formado *in natura*, sem processamento do pó de coco, apresentou queda de desempenho mecânico e uma leve tendência de melhoria das propriedades físicas (aumento da densidade e diminuição da absorção de água e porosidade), mais efetiva em condições externas. O envelhecimento natural teve maior efeito nas propriedades físicas a partir da exposição a intempéries (sol, chuva e vento), assim como encontrado por Brasileiro (2013).

Em pesquisa similar, Brasileiro (2013) afirma que a realização de tratamentos químicos no pó de coco tem como objetivo melhorar a compatibilidade com a matriz cimentícia, aspecto que acaba por melhorar a durabilidade do compósito. A presença de pó de coco, em qualquer constituição (com tratamento ou não), promove redução da densidade e aumento da porosidade dos compostos cimentícios, reduzindo significativamente as propriedades mecânicas, em

especial a resistência à compressão, inversamente proporcional à porosidade (SANTANA *et al.*, 2014).

O estudo de durabilidade de um material deve levar em consideração dois aspectos principais: quais os agentes agressivos relevantes a cada aplicação e quais os mecanismos de degradação que acarretam. Para tal, é necessário considerar sua composição química e microestrutura, além da possível interação entre os agentes existentes (SILVA, 2002). A maioria das pesquisas atuais de durabilidade das fibras vegetais tem se concentrado nas aplicações de matrizes cimentícias, tendo em vista o relevante ataque alcalino às fibras, que com a elevação da temperatura ocasiona considerável aceleração da degradação (SAVASTANO JR., 2000). Para aplicações em solos, cabem estudos específicos.

2.10.1 Ciclos secagem-molhagem no contexto geotécnico

Na geotecnia, a água é um importante fator de degradação. Sua força de queda pode provocar erosões e sua movimentação interna pode levar a carreamento de finos e criação de caminhos preferenciais de passagem ao longo do tempo, aumentando a condutividade hidráulica à água. Solos argilosos expostos às intempéries estão sujeitos às variações climáticas que promovem contração e expansão, o que favorece a criação de fissuras e, conseqüentemente, promove aumento significativo de permeabilidade (MACIEL, 2003).

Entende-se que perda de umidade decorrente da evaporação ocorre das camadas mais superficiais para as mais profundas, de forma que as áreas mais secas começam a contrair e criar forças de tensão, as quais desenvolvem sucção irregularmente distribuída e acabam criando fissuras (KODIKARA; BARBOUR; FREDLUND, 2002; TANG *et al.*, 2010a). O mecanismo da fissuração e o comportamento dos solos submetidos a esses ciclos ainda precisam ser mais investigados para permitir uma melhor compreensão do processo.

Embora alguns locais sejam certamente mais afetados que outros, a variação de umidade ao longo do tempo é algo presente na natureza e consequência das frequentes mudanças de temperatura e precipitações. O aquecimento global traz à tona ainda a possibilidade de variações mais acentuadas e, conseqüentemente, preocupantes. Em geral, quanto maior o número de ciclos de contração e expansão a que um solo é submetido, maior o risco de falhas em seu desempenho. Por outro lado, variações de maior intensidade implicam em menor quantidade de ciclos necessários para causar problemas (BAMGBOPA, 2016).

Em solos expansivos, muitos estudos constataram que ciclos molhagem-secagem podem propiciar grande acúmulo irreversível de deformação (expansão ou contração) ou

mudanças substanciais de textura (ALONSO *et al.*, 2005; CUISINIER; MASROURI, 2005). As deformações volumétricas irreversíveis não dependem apenas do tipo de solo, mas especialmente das condições de compactação iniciais e consequente variação de trajetos de tensão e hidratação a que o solo é submetido (CUI; YAHIA-AISSA; DELAGE, 2002; NOWAMOOZ; MASROURI, 2009). Sabe-se, ainda, que a influência do primeiro ciclo secagem-molhagem na estrutura de um solo expansivo é muito mais significativa, e tende a decrescer nos ciclos subsequentes (BASMA *et al.*, 1996; LEIJ; GHEZZEHEI; OR, 2002).

Segundo Zeng, Lu e Zhao (2012, *apud* HOSSAIN; LING-WEI; SONG, 2015) e Zhou, Xu e Hu (2013, *apud* HOSSAIN; LING-WEI; SONG, 2015), a coesão e a tensão cisalhante de solos expansivos diminuem com o aumento do número de ciclos a que o solo é submetido, mas o ângulo de atrito se mantém estabilizado. Consequentemente, a estabilidade de taludes e o fator de segurança também decrescem a partir do efeito cíclico extremo.

O comportamento hidráulico-mecânico dos solos é bastante influenciado por ciclos secagem-molhagem. Além de alterações de textura e arranjo, muitos estudos demonstram que múltiplos ciclos promovem expansões volumétricas irreversíveis no solo (BASMA *et al.*, 1996; PIRES; BACCHI; REICHARDT, 2005; NOWAMOOZ; MASROURI, 2009; CHEN; NG, 2013; TANG *et al.*, 2016), o que, consequentemente, causa redução de densidade e resistência. Vale salientar que as mudanças na estrutura dependem bastante da taxa de evaporação/infiltração e da profundidade do perfil (LI; VELDE; ZHANG, 2004), assim como do estado inicial do solo (TANG *et al.*, 2016).

Adicionalmente, a alta capacidade de absorção de água das fibras vegetais promove variações dimensionais com variação de umidade (SAVASTANO JR.; PIMENTEL, 2000). Em matrizes cerâmicas, este fator representa uma incompatibilidade física em que repetidos ciclos de secagem e molhagem irão, paulatinamente, introduzir tensões e gerar microfissurações levando ao mecanismo de dano progressivo, o qual compromete a ligação fibra-matriz, e pode afetar a resistência mecânica e ductilidade do compósito (SAVASTANO JR.; PIMENTEL, 2000; SILVA, 2002). A compatibilidade ou incompatibilidade química também pode ser objeto de investigação em compósitos de solos reforçados com fibras em situações de aplicações para geotecnia ambiental, como na utilização como agente de remediação ambiental ou áreas sujeitas a percolantes quimicamente ativos.

A ocorrência de fissuração provoca a destruição das forças coesivas entre as partículas do solo. Mesmo com seu fechamento superficial posterior, não é possível restabelecê-las, e há um inevitável aumento de porosidade, o que reflete numa maior condutividade hidráulica (ANDERSON; HUBBARD; KNEALE, 1982). O tamanho (espessura, comprimento e

profundidade), tortuosidade, distribuição e conectividade das fissuras existente acabam por governar a velocidade de percolação de fluidos no perfil do solo (CHERTKOV, 2000; CHERTKOV; RAVINA, 1999; HORGAN; YOUNG, 2000; TANG *et al.*, 2010a).

O aumento do número de ciclos promove, em geral, aumento do índice de fissuração da superfície e profundidade das fissuras (TANG *et al.*, 2011a), assim como o número e conectividade entre as fissuras (LU *et al.*, 2002, *apud* TANG *et al.*, 2016). Além de criar zonas frágeis, destaca-se que as fissuras promovem variabilidade espacial das propriedades do solo (TANG *et al.*, 2016).

Chen e Lu (2015) investigaram uma argila vermelha de alta plasticidade e índice de vazios submetida a cinco ciclos S-M. Foram moldadas amostras compactadas a cinco diferentes valores de umidades, duas abaixo e duas acima da umidade ótima, com grau de compactação de 75%. Foram utilizados dois métodos de secagem na estufa: a 34°C e a 105°C, onde os corpos de prova eram mantidos até o grau de umidade ficar menor que 1%. A molhagem foi feita de forma gradativa até que a amostra atingisse a quantidade gravimétrica perdida na secagem. Através de manipulação de imagens registradas no processo foi possível obter um índice de fissuração de cada amostra a cada ciclo, em relação a sua área superficial total.

Os autores (CHEN; LU, 2015) concluíram que o índice de fissuração aumentou significativamente nos dois primeiros ciclos e sofreu um aumento suave nos três ciclos subsequentes, para as duas condições de secagem empregadas. As amostras compactadas na umidade ótima apresentaram menos formação de fissuras que as demais, aumentando o índice de fissuração com o distanciamento da umidade ótima. Embora ambas as temperaturas de secagem tenham apresentado resultados similares quanto ao comportamento em relação à umidade de compactação, a secagem a 105°C propiciou um maior aparecimento de fissuras nas amostras.

Bamgbopa (2016) encontrou resultados similares ao estudar a contração e fissuração em amostras compactadas de solo argiloso puro e com adição de 5% de bentonita (em massa), todas com plasticidade intermediária e submetidas a quatro ciclos de secagem-molhagem utilizando dois métodos de secagem distintos: fonte de vento controlado (mais lenta) e estufa a 60°C (mais rápida). Embora a investigação tenha sido feita em laboratório, tentou-se simular condições de campo realizando a molhagem gradativa até atingir a quantidade gravimétrica de água perdida na secagem, com tempo (24h) para absorver e equalizar a umidade.

O autor fez quantificação das fissuras ocorridas a partir de registros fotográficos e processamento de imagens, chegando à conclusão de que amostras com maior índice de plasticidade (no caso, as amostras com bentonita adicionada) possuem maior percentual de

fissuras na superfície em relação à área superficial total, independentemente do método de secagem empregado. Similar ao encontrado por Chen e Lu (2015), percebeu-se, para todos os casos, aumento significativo de fissuras depois dos dois primeiros ciclos de secagem, com uma tendência gradual de equilíbrio, ou seja: a fissuração aumenta com a quantidade de ciclos, mas em uma relação cada vez menos significativa com a repetição (BAMGBOPA, 2016).

Kodikara, Barbour e Fredlund (2002) também acreditam que há uma tendência à reorganização estrutural das amostras ao longo da repetição cíclica, em que muitas das fissuras criadas na secagem são fechadas (parcial ou totalmente, a depender principalmente de suas dimensões iniciais) na molhagem, revelando uma tendência do solo de atingir uma configuração mais estável ao longo do tempo. Há a possibilidade, ainda, que a repetição cíclica acabe criando, eventualmente, uma estrutura melhorada e mais estável do solo, capaz de resistir a situações mais severas que as iniciais (BAMGBOPA, 2016; KODIKARA; BARBOUR; FREDLUND, 2002)

Resultados similares foram encontrados também em argilas não compactadas. Os efeitos de ciclos secagem-molhagem na fissuração de argilas em estado de lama foram estudados por Tang *et al.* (2011a). Quatro amostras lamacentas foram preparadas em laboratório para passarem por cinco ciclos molhagem-secagem, monitorando a taxa de evaporação e a evolução das fissuras. A partir de processamento de imagem foi possível verificar que os três primeiros ciclos foram responsáveis por aumentos consideráveis na umidade de fissuração, no índice de fissuras na superfície e suas espessuras, atingindo um equilíbrio posterior. O aumento relativo da superfície fissurada levou à redução do volume de contração dos poros durante a secagem e a uma maior porosidade, o que causou aumento do volume das amostras. A repetição dos ciclos levou também a uma reestruturação das amostras: outrora homogêneas, passaram a revelar estruturas agregadas/floculadas com poros aparentes.

Pires *et al.* (2008) encontraram aumento significativo de porosidade em solos argilosos submetidos a ciclos secagem-molhagem, especialmente nos macroporos. Segundo Zemeny *et al.* (2009, *apud* TANG *et al.*, 2016), a sequência dos ciclos promove uma reconstrução contínua da estrutura do solo, com progressivo aumento do volume de poros e diâmetro médio do conjunto, podendo mesmo ocasionar floculação ou cimentação em solos com estrutura inicialmente dispersa (TANG *et al.*, 2011a). Esses efeitos podem reduzir significativamente os pontos de contato efetivo entre partículas de solo e comprometer a resistência e estabilidade da estrutura (TANG *et al.*, 2016).

Solos compactados comumente apresentam uma estrutura floculada, e seu comportamento mecânico é fortemente influenciado pelo contato entre os flocos formados

(face-aresta). Entretanto, a saturação promove a hidratação da argila e quebra dos grandes agregados, de forma que flocos menores e partículas de argila acabam preenchendo os poros existentes entre flocos maiores (TANG *et al.*, 2015). Assim, a saturação é capaz de transformar a estrutura floculada em mais dispersa, mas é possível que a floculação promovida pelo processo de secagem restaure a estrutura inicial (LI; VELDE; ZHANG, 2004).

Muitos estudos mostraram que solos submetidos a ciclos de secagem-molhagem sofrem alterações em suas características de resistência ao cisalhamento. Geralmente a resistência ao cisalhamento de um solo é maior durante o percurso de secagem do que durante o umedecimento, em razão dos efeitos da histerese (NISHIMURA; FREDLUND, 2002; GOH; RAHARDJO; LEONG, 2014). Goh, Rahardjo e Leong (2014) verificaram que essa divergência é mais significativa no primeiro ciclo secagem-molhagem do que nos subsequentes.

Hossain Md, Ling-wei e Song (2016) investigaram os efeitos de zero, um, dois, quatro e oito ciclos secagem-molhagem na resistência ao cisalhamento de solo residual não perturbado da China. A secagem das amostras foi feita em estufa a uma temperatura constante de $40 \pm 2^\circ\text{C}$ até atingirem 20% de grau de umidade. A saturação foi feita com água destilada após permanecer em dessecador à vácuo por cerca de 2h, passando por posterior submersão por 24h. A resistência ao cisalhamento saturada foi mensurada através de ensaios triaxiais adensados drenados (CD) com tensões confinantes de 50, 100, 200 e 300 kPa, e deformação axial até 20%.

Os autores encontraram valores de tensão desviadora máximas em cada caso, com uma tendência de leve redução ou estabilização posterior. É interessante notar que o valor máximo da tensão desviadora diminuiu com a sequência de ciclos executados até atingir uma constância no 4º ciclo, e a redução mais significativa ocorreu no 1º ciclo (em relação à amostra que não passou por nenhum ciclo). Tal comportamento também foi observado para a tensão de cisalhamento saturada, a coesão e o ângulo de atrito. A tensão desviadora e a rigidez inicial das amostras aumentaram com o aumento da tensão confinante, mas diminuíram com a repetição dos ciclos (HOSSAIN MD; LING-WEI; SONG, 2016).

Dependente do estado inicial do solo, a redução da tensão de cisalhamento com a sequência de ciclos secagem-molhagem pode ser interpretada como consequência de mudanças no arranjo das partículas e distribuição dos grãos, diminuição do volume dos poros e índice de vazios, ou em razão de microfissuras e fissuras criadas no processo (HOSSAIN MD, LING-WEI E SONG, 2016).

Wang *et al.* (2016) utilização de micropenetrômetros permitiu verificar que a resistência à penetração de argilas siltosas tende a decrescer com a repetição dos ciclos, e que a redução entre o 1º e 2º ciclos é bem mais expressiva que entre o 2º e 3º. Depois do 3º ciclo, há uma

alteração no padrão da curva de penetração, que passa do típico mono-pico para multi-pico, o que significa que os ciclos acabaram criando mais defeitos na microestrutura do solo e intensificaram a heterogeneidade da resistência ao longo do perfil. Foram feitas aferições a diferentes teores de umidade, e os autores concluíram que mesmo com grande perda de água inicial, a resistência à penetração só se torna significativa após um valor crítico, a partir do qual há aumento exponencial da resistência à penetração do solo com a diminuição da umidade, e decréscimo exponencial com o aumento da profundidade (WANG *et al.*, 2016). Esses resultados demonstram a forte influência da sucção no comportamento mecânico do solo.

Por outro lado, Tang *et al.* (2016) utilizaram micropenetrômetros em solo argiloso compactado de alta plasticidade da China e observaram aumento da resistência à penetração no solo após o 2º ciclo de secagem, em relação ao 1º. Após o 3º ciclo, por outro lado, houve redução. Segundo os autores, embora a saturação promova inchamento irreversível e diminuição da densidade do solo, a quebra dos agregados provoca uma melhor ligação partículas-agregados, o que pode contrabalancear os efeitos negativos do aumento volumétrico e favorecer um aumento de resistência do solo. Para argila lamacenta de baixa plasticidade em estado natural (sem compactação), a resistência passa a decrescer com a ocorrência dos ciclos, em especial para as camadas mais superficiais – as quais demonstraram ser mais sensíveis do que as camadas mais profundas do perfil. A variação mais significativa ocorreu entre o 1º e 2º ciclos.

Basma *et al.* (1996), Liu e Yin (2010), e Yang *et al.* (2014, *apud* TANG *et al.*, 2016) demonstraram uma tendência de estabilização do comportamento hidromecânico do solo após 3 a 5 ciclos secagem-molhagem. Nowamooz e Masrouri (2009) apresentam ainda que o efeito inicial da compactação no comportamento hidromecânico do solo se torna insignificante depois de aproximadamente 3 ciclos, o que não foi observado por Tang *et al.* (2016) ao compararem a resistência à penetração de amostras compactadas e não compactadas após 3 ciclos. No entanto, esses últimos utilizaram solos distintos na comparação, de diferentes composições minerais e distribuição granulométrica, o que impossibilitou uma real averiguação desse aspecto.

Chen e Ng (2013) realizaram uma série de ensaios de compressão isotrópica em argila compactada submetida a ciclos S-M e concluíram que o comportamento hidromecânico do solo tem bastante influência da história de exposição a essas variações cíclicas. Wan *et al.* (2015, *apud* HOSSAIN; LING-WEI; SONG, 2015) encontraram que a condutividade hidráulica cresce com o aumento de ciclos secagem-molhagem em camadas de cobertura de argila compactada.

Albrecht e Benson (2001) demonstraram que ciclos molhagem-secagem propiciaram grande aumento de condutividade hidráulica à água em amostras de solo argiloso compactadas

na umidade ótima, mas não tanto para as compactadas no ramo seco. As amostras foram compactadas a diferentes forças de compactação antes de serem submetidas à saturação em permeâmetro, e deixadas para secagem ao ar por aproximadamente 14 dias.

Os ciclos eram repetidos e as amostras em que eram visualizadas fissuras durante a secagem eram submetidas subsequentemente a ensaios de condutividade hidráulica (à água). O estudo indicou que as amostras com considerável quantidade de minerais argílicos sofrem grande redução volumétrica em razão de sua alta atração à água/umidade. Depois da secagem resultante em fissuras, as amostras apresentaram aumento significativo da condutividade hidráulica, a qual permaneceu a mesma nos ciclos subsequentes. É interessante notar que o aumento mais significativo da deformação de contração, assim como da condutividade hidráulica, aconteceu logo após o primeiro ciclo de secagem, indicando que um único episódio de ressecamento já é suficiente para alterar a estrutura do solo de forma significativa. As fissuras formadas durante a secagem não conseguiram se fechar ao longo dos processos de saturação a que foram submetidas no permeâmetro (ALBRECHT; BENSON, 2001).

Bamgbopa (2016) acredita que os métodos de secagem e saturação utilizados por Albrecht e Benson (2001) não foram representativos por não reproduzirem condições de campo e superestimaram os efeitos das taxas de ressecamento, o que tem grande impacto no processo de formação de fissuras.

Anderson, Hubbard e Kneale (1982) estudaram os efeitos da contração do solo na sucção e estabilidade de talude vulnerável a variações climáticas localizado na Inglaterra, através de instrumentos instalados no local. Perceberam que as fissuras mais significativas aconteceram durante o verão, mas chuvas intensas posteriores possibilitaram reduzir suas profundidades, contribuindo para um processo de “cicatrização” que continuou por aproximadamente seis meses, quando finalmente conseguiram se fechar (depois de um episódio de grande aguaceiro). Os resultados experimentais indicaram um aumento da permeabilidade do solo à água e variação de densidade do solo.

As variações de sucção aferidas pelos autores sugerem, ainda, que as fissuras de secagem criaram uma maior superfície de contato do solo com a atmosfera, o que aumentou as taxas de evaporação. As variações de densidade indicam que as fissuras fechadas permanecem como pequenas descontinuidades do solo e potenciais zonas frágeis. Vale salientar que devido à profundidade de instalação dos tensiômetros utilizados, só foi possível avaliar os efeitos mais superficiais da fissuração (ANDERSON; HUBBARD; KNEALE, 1982).

Albright *et al.* (2006) investigaram, por um período de dois a quatro anos, a eficiência de infiltração de água, em lisímetros¹ de grandes dimensões, em camadas de cobertura de aterros sanitários compostas de solo argiloso compactado submetidas a condições climáticas diferentes. Eles verificaram que a drenagem aumentou consideravelmente para locais de clima quente e úmido, enquanto nos locais de clima quente e árido ou frio e úmido, não houve alteração. Segundo os autores, os processos de intemperismo devido às variações climáticas (ciclos secos e úmidos) afetaram a integridade da argila e provocaram mudanças estruturais através da formação de fissuras e de caminhos preferenciais de fluxo, responsáveis pelo aumento da permeabilidade à água.

O balanço hídrico desenvolvido por Albright *et al.* (2004) para solo submetido a clima úmido indica criação de caminhos de fluxo preferenciais no solo após período de grande seca no local estudado. Eles constataram que antes da seca as taxas de infiltração eram relativamente constantes, e após esse período a infiltração cresceu consideravelmente e não mais retornou aos valores iniciais.

Melchior *et al.* (2010) realizaram 18 anos de monitoramento da infiltração de água em lisímetros de grandes dimensões na Alemanha, com objetivo de investigar a estrutura das camadas de cobertura ao longo do tempo e o impacto nas taxas de infiltração proveniente de modificações que ocorressem. Foi verificado bom desempenho das camadas de argila compactada nos primeiros anos, no entanto, após um verão intenso que provocou sucção de 40 kPa na camada compactada, iniciou-se um processo de formação de fissuras que resultou em aumento da condutividade hidráulica do solo. Posteriormente, sucções acima de 80 kPa ocasionaram taxas de infiltração ainda maiores até atingir o máximo de 42% de infiltração em relação ao total pluviométrico precipitado. Os autores concluíram que a formação de fissuras provenientes de períodos muito secos, atrelada à ação de raízes de vegetação presente na superfície, foram os fatores que contribuíram para o aumento da condutividade hidráulica à água, em razão da criação de caminhos preferenciais de fluxo na camada.

As camadas de cobertura utilizadas na geotecnia ambiental, seja em aterros sanitários, seja em barreiras verticais, possuem fluxo essencialmente multifásico (líquido + gás), frequentemente envolvendo água, ar (oxigênio + gás carbônico + nitrogênio), vapor d'água e outros gases provenientes da contenção, como metano. Hettiaratchi *et al.* (2007) descrevem um modelo matemático unidirecional (vertical) de fluxo de gás em aterros sanitários no qual se verifica que a movimentação ocorre a partir do gradiente de pressão existente entre o aterro e a

¹ Lisímetro é um tanque inserido no solo, preenchido com o mesmo solo do local e vegetação. É utilizado para medir a evapotranspiração de referência (ET_o) ou de determinada cultura vegetal (ET_c).

superfície externa, e depende da permeabilidade do solo ao gás e de características do meio, como porosidade e presença de microrganismos metanotróficos.

Tendo em vista a inviabilidade de controle da pressão em toda a área do aterro, a seleção de parâmetros apropriados do material utilizado nas camadas de cobertura é a principal forma de garantir a permeabilidade adequada e atividade metanotrófica no solo (LOPES, 2011). A utilização de materiais cujo comportamento ao longo do tempo seja mais previsível é, então, essencial para permitir uma estimativa mais precisa da realidade local, razão pela qual o estudo do efeito dos ciclos secagem-molhagem é tão relevante.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Trata-se de uma pesquisa exploratória quanto ao seu propósito, quantitativa quanto à abordagem, e experimental quanto à coleta de dados.

3.1 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Foi utilizado na pesquisa solo predominantemente argiloso de uma jazida proveniente da Formação Barreiras, situada na Região Metropolitana do Recife, estado de Pernambuco, Brasil. A jazida localiza-se nas proximidades do aterro de resíduos sólidos urbanos da Muribeca em Jaboatão dos Guararapes, tendo sido explorada para obtenção de material constituinte da camada de cobertura do referido aterro. O solo foi coletado a partir de amostras deformadas do horizonte B da jazida, tendo sido utilizado também na pesquisa de Oliveira Jr. (2018).

A preparação do solo em laboratório consistiu em secagem ao ar e posterior destorroamento para realização da caracterização geotécnica. A Tabela 5 mostra suas propriedades físicas, a Tabela 6, as propriedades químicas, e a Figura 14, a curva de distribuição granulométrica com e sem defloculante. A caracterização realizada indica que o solo possui textura fina e plasticidade média, com aproximadamente 62% de finos ($< 0,074$ mm, ou seja, passante pela peneira 200) e índice de atividade $< 0,75$, sendo considerado uma argila inativa. Pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o material é classificado como argila inorgânica de baixa a média plasticidade (CL).

Tabela 5 – Propriedades físicas do solo

Propriedade física do solo	Valor
Massa específica dos grãos (g/cm^3)	2,62
Limite de Liquidez (%)	49,3
Limite de Plasticidade (%)	31,4
Índice de Plasticidade	17,9
Classificação SUCS	CL
Pedregulho (%)	1
Areia (%)	37
Silte (%)	22
Argila (%)	40
Índice de atividade	0,45

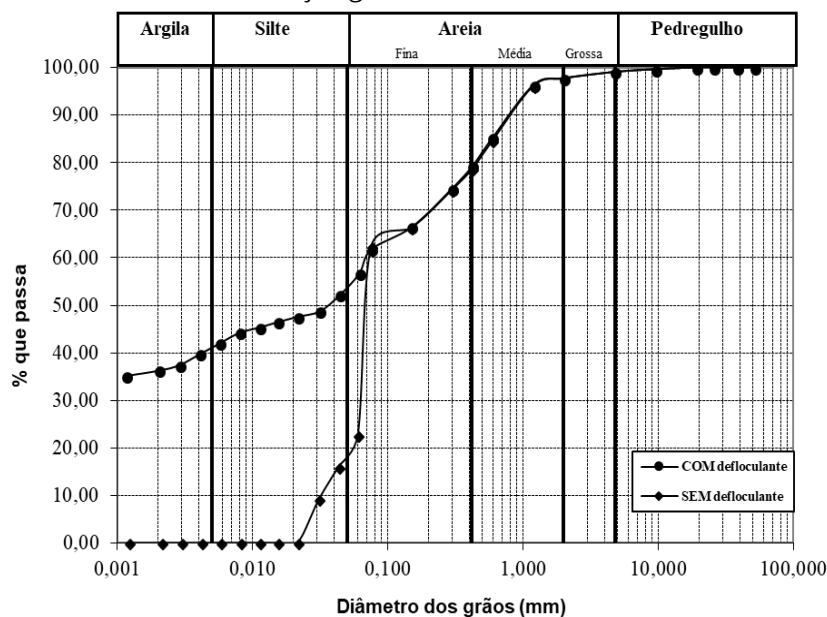
Fonte: Oliveira Jr. (2018, p. 54)

Tabela 6 – Propriedades químicas do solo

Propriedade química do solo	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
CO (g/kg)	2,62
MO (g/kg)	4,09
N (g/kg)	0,2
Relação C/N	13,1
Fe (mg/kg)	41,98

Fonte: Oliveira Jr. (2018, p. 54)

Figura 14 – Curvas de distribuição granulométrica do solo com e sem defloculante



Fonte: Oliveira Jr. (2018, p. 53)

As fibras de coco utilizadas foram cedidas já beneficiadas por grupo produtivo situado no estado do Ceará que recebe apoio e orientação da Embrapa Agroindústria Tropical de Fortaleza – CE, como pode ser visualizado na Figura 15.

A caracterização dos resíduos fibrosos da casca do coco foi realizada a partir da composição gravimétrica. O fardo total recebido possuía aproximadamente 385 g de peso total, tendo sido inicialmente removido quaisquer dejetos existentes (conjunto de resíduo da casca de coco não integralmente beneficiado, cerca de 10 g) e peneirado todo o pó (cerca de 72 g), tendo

em vista que sua tendência de acumular-se ao fundo poderia resultar em demonstração gravimétrica imprecisa a partir da coleta aleatória de amostras (ver Figura 15).

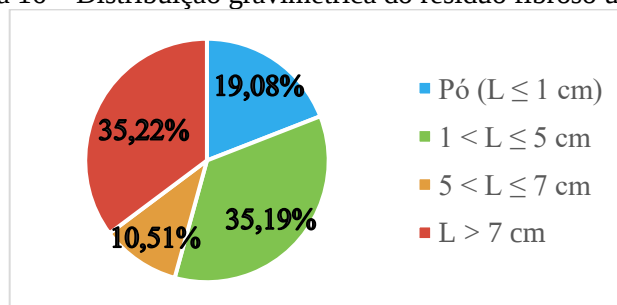
Figura 15 – Processo de separação gravimétrica do resíduo fibroso



Fonte: A autora (2020)

Do material restante (aproximadamente 303 g), composto majoritariamente por fibras, foram coletadas amostras aleatórias de forma a resultar em cerca de 10% do peso total das fibras para caracterização gravimétrica. Foram caracterizadas cerca de 31 g de fibras, classificadas, com auxílio de uma régua, por tamanho da seguinte forma: pó ($L \leq 1$ cm), $1 < L \leq 5$ cm, $5 < L \leq 7$ cm e $L > 7$ cm, sendo L o comprimento da fibra. Cada fração classificada foi pesada em balança com precisão de 0,01 g e teve seu percentual de peso calculado em relação ao total do fardo. Como resultado, obteve-se que o somatório das frações de pó e fibras de tamanhos até 5 cm correspondeu a aproximadamente 54% do material (Figura 16).

Figura 16 – Distribuição gravimétrica do resíduo fibroso utilizado



Fonte: A autora (2020)

3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DO COMPÓSITO

Tomou-se como base o estudo de Oliveira Jr. (2018) para a utilização de mistura com teor de 1% de fibra de coco em relação ao peso de solo seco, percentual que obteve melhores resultados de resistência ao cisalhamento mantendo ainda condutividade à água na mesma

ordem de grandeza, sem decréscimo significativo. Foi utilizado como parâmetro de comparação, ainda, corpos de prova de solo puro compactados.

Os corpos de prova foram preparados a partir de disposição em bandeja metálica do solo em umidade higroscópica, sofrendo adição gradativa e randômica de água e fibras (quando fosse o caso), com constante mistura manual visando a homogeneização. Estes processos foram repetidos até que todo o conteúdo de água e fibra (se aplicável) fosse incorporado à matriz e o conjunto atingisse o teor de umidade ótima.

Foram moldados 14 corpos de prova (CPs) cilíndricos com área de 78,54 cm² e altura de 12,7 cm, 7 de 'solo puro' e 7 da mistura 'solo-fibra', a partir da compactação na umidade ótima com energia Proctor normal utilizando os valores de densidades secas máximas e teores de umidade ótima obtidos em ensaio de compactação realizado conforme NBR 7182 (ABNT, 1988) por Oliveira Jr. (2018), o qual estudou o mesmo solo e resíduo de coco proveniente da mesma indústria de beneficiamento (ver Figura 17). As curvas de compactação e das misturas estudadas por Oliveira Jr. são mostradas na Figura 18 para os diferentes percentuais de incremento estudados pelo autor (0% - solo puro, 0,5%, 1% - utilizado nesta pesquisa, e 2%). Os valores utilizados para moldagem dos CPs de 'solo puro' e 'solo-fibra' são mostrados na Tabela 7.

Figura 17 – Preparação de CP 'solo-fibra'



(a) Homogeneização

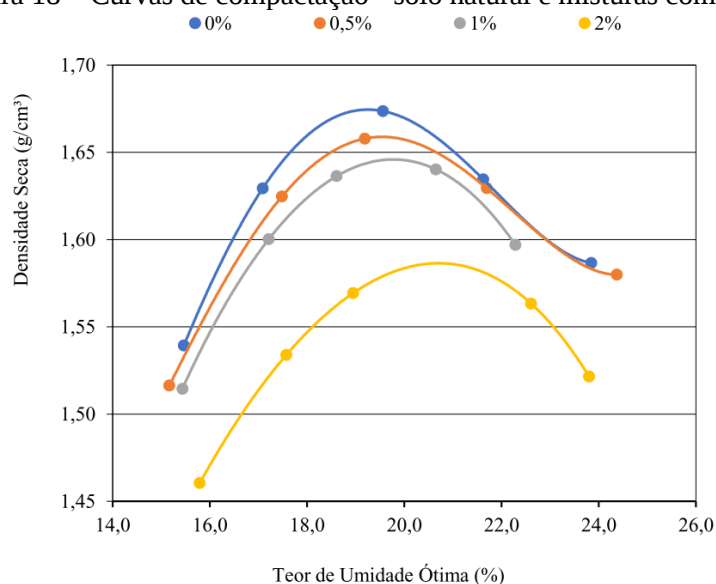
(b) Moldagem



(c) CP moldado

Fonte: A autora (2020)

Figura 18 – Curvas de compactação - solo natural e misturas com fibra



Fonte: Oliveira Jr. (2018, p. 70)

Tabela 7 – Parâmetros considerados para moldagem dos CPs

Teor de fibra	Teor de umidade ótima w_{ot} (%)	Densidade seca máxima $\gamma_{máx}$ (g/cm³)
Solo puro, 0%	19,2	1,680
Solo-fibra, 1%	19,6	1,643

Fonte: Oliveira Jr. (2018)

Um CP de cada tipo ('solo puro' e 'solo-fibra') foi destinado exclusivamente à moldagem de anéis para realização dos ensaios de sucção (cada CP proporcionou a moldagem de quatro anéis), conforme descrito no item 3.3.2. Com o intuito de reduzir o tempo de saturação dos CPs e minimizar a possibilidade de fissuração ao longo dos ciclos molhagem-secagem, optou-se por trabalhar com CPs de menor altura. Para tal, a parte superior dos CPs também foi utilizada para moldagem de anéis para execução do ensaio de sucção com papel filtro, conforme descrito no item 3.3.2 e mostrado na Figura 19.

Cada CP possuía altura suficiente para garantir a extração de até dois anéis em sua parte superior, mas especialmente nos casos da mistura (solo-fibra) nem sempre esse quantitativo foi obtido. Devido à disposição irregular das fibras ao longo do material, por vezes não foi possível obter anel integralmente preenchido, sendo necessário desprezar a parte danificada e fazer nova cravação. De qualquer forma, após a extração dos anéis possíveis em cada caso, a nova superfície superior recebeu tratamento de forma a deixá-la o mais retilínea possível e paralela à superfície inferior, na medida do possível, conforme mostrado na Figura 20.

Figura 19 – Rebaixamento de CP e moldagem de anel para ensaio de sucção



Fonte: A autora (2020)

Figura 20 – CPs de solo-fibra após redução de altura



Fonte: A autora (2020)

Trabalhou-se, então, com 6 CPs de ‘solo puro’ e 6 da mistura (‘solo-fibra’), com alturas variando entre 6,0 e 7,3 cm, totalizando 12 CPs submetidos aos ciclos de molhagem-secagem, além de 16 anéis para realização dos ensaios de sucção (item 3.3.2). A variação de altura dos CPs se deu devido à dificuldade de estabelecer corte em local padrão, especialmente nas misturas (‘solo-fibra’), tendo em vista as diferentes disposições das fibras em cada caso, as quais têm tendência à aglomeração e, quando aglomeradas, dificultam a separação sem comprometer a integridade do restante do compósito. Ademais, entende-se que pequena diferença de altura entre os CPs não seria um problema, tendo em vista que ambos os ensaios de condutividade hidráulica (ar e água – itens 3.3.3.1 e 3.3.3.2, respectivamente) consideram a altura do CP ensaiado nos cálculos e essa pequena variação não resultaria em comportamento divergente do fluido percolado. Quanto aos CPs que passariam por saturação por capilaridade (item 3.3.1), considerou-se que essa pequena variação de altura também não deveria influenciar significativamente no tempo ou comportamento durante os ciclos.

3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental encontra-se resumido na Tabela 8.

Tabela 8 – Resumo do programa experimental

Ensaio	Metodologia	Quantidade de ensaios executados
Sucção – papel filtro	Chandler e Gutierrez (1986), Chandler, Crilly e Montgomery-Smith (1992) e Marinho (1994)	Vários pontos de 4 conjuntos de anéis
Condutividade vertical ao ar	Lopes (2011), Maciel (2003) e Mariano (2008), com adaptações.	26, com 46 determinações cada
Condutividade vertical à água	ASTM D5084-10 (ASTM, 2010) NBR 14545 (ABNT, 2000)	30, com 1 determinação cada
Cisalhamento direto	ASTM D3080-04 (ASTM, 2004)	4 conjuntos de 3 pontos cada

Fonte: A autora (2020)

3.3.1 Ciclos secagem-molhagem

Os ciclos de secagem- molhagem foram assim executados: seis CPs passaram por cinco ciclos, e os outros seis, por dez ciclos, sendo cada um dos grupos composto por três CPs de cada tipo ('solo' e 'solo-fibra'). A secagem foi realizada de forma gradual para evitar a formação de fissuras e, conseqüentemente, caminhos preferencias de passagem de fluidos. Assim, todos os CP foram submetidos ao seguinte processo de secagem, nesta ordem, a cada ciclo:

- a) 24h de secagem ao ar;
- b) 24h de secagem em estufa à 50°C;
- c) 24h de secagem em estufa à 65°C;
- d) 24h de secagem em estufa à 80°C;
- e) 24h de secagem em estufa à 105°C.

A molhagem (saturação) foi realizada no permeâmetro para quatro CPs (os quais seriam ensaiados quanto à condutividade hidráulica), conforme descrito em 3.3.3.2, mas o longo tempo necessário para o processo impossibilitou a execução também para os outros oito CPs. Optou-se, então, pela realização da saturação por capilaridade em conjunto para os demais CPs, conforme seguinte metodologia (ver Figura 21):

- a) os CPs foram colocados em bandejas profundas, sobre pedra porosa e papel filtro, respectivamente;
- b) as bandejas receberam adição gradativa de água – sem atingir a base dos CPs, para evitar dispersão do solo na água;
- c) foi fixado um “rabicho” de fita adesiva tipo crepe no papel filtro de cada CP para permitir a respectiva identificação, e agilizar o processo de saturação ao propiciar um “atalho” para o fluxo da água entre a bandeja e o papel filtro sob a amostra;
- d) as bandejas foram envolvidas por camadas de plástico-filme (PVC), de forma a evitar a evaporação de líquidos;
- e) os CPs permaneceram na bandeja pelo tempo necessário para total saturação por capilaridade, com adição de água quando necessário;
- f) cada processo de saturação levou em torno de 3 dias.

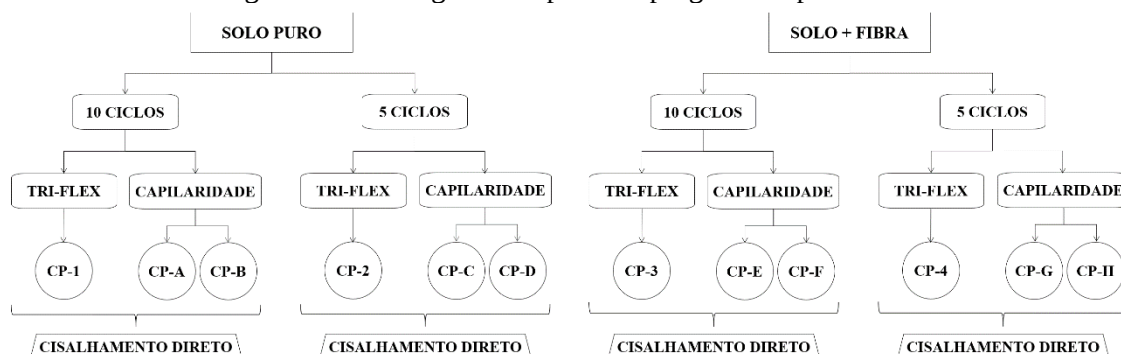
Figura 21 – Processo de saturação por capilaridade



Fonte: A autora (2020)

Tem-se ciência que esse processo de saturação utilizado, por não possibilitar o confinamento lateral, poderia fragilizar as amostras e favorecer fissuração. No entanto, esses CPs somente passaram pelos ciclos de secagem-molhagem para análise de sua influência na resistência ao cisalhamento (ver item 3.3.4), de forma que comprometimento mais superficial poderia ser desprezado no momento de montagem da caixa de cisalhamento. A influência dos ciclos na condutividade hidráulica não foi avaliada para esses CPs, apenas para aqueles que sofreram saturação através do permeâmetro (Tri-flex - ver item 3.3.2). Na Figura 22 é possível visualizar fluxograma demonstrativo resumido do programa experimental referente à investigação da influência dos ciclos de molhagem-secagem, indicando a forma de saturação empregada em cada CP.

Figura 22 – Fluxograma de parte do programa experimental



Fonte: A autora (2020)

3.3.2 Ensaios para determinação da curva de retenção de água e estimativa da condutividade hidráulica não saturada

As curvas características do ‘solo puro’ e da mistura ‘solo-fibra’ foram determinadas através do ensaio de papel filtro, realizado a partir das diretrizes de Chandler e Gutierrez (1986) e Marinho (1994). Buscou-se avaliar a influência da adição de fibras de coco na retenção de água do solo estudado, assim como estimar a condutividade hidráulica não saturada, a capacidade de campo, o ponto de entrada de ar e os teores de umidade residual e de saturação para ambos.

As amostras foram extraídas a partir dos corpos de prova moldados na umidade ótima, conforme mencionado no item 3.2. Com auxílio de faca e tesoura, 16 anéis metálicos com 40 cm² de área e 2 cm de altura foram cravados na superfície dos CPs (ver Figura 19 e Figura 23) – 8 do ‘solo puro’ e 8 da ‘mistura’. Utilizou-se papel filtro modelo Whatman nº 42, sendo metade dos anéis utilizados para construção das curvas de retenção no ciclo de secagem, e a outra metade, no ciclo de umedecimento, com o intuito de verificar a ocorrência de histerese. A cada variação de aproximadamente 3% da umidade gravimétrica das amostras foram colocados papéis filtros em contato direto com o conteúdo dos anéis, a fim de determinar a sucção matricial referente à quantidade de água presente em cada caso.

Os conjuntos amostra-papéis foram envolvidos por camadas de plástico-filme (PVC) e papel alumínio e conservadas em caixa de isopor por 7 dias (período de equalização). Após esse período, os papéis filtros de cada amostra foram retirados com auxílio de pinça metálica e imediatamente colocados em balança de precisão de 0,0001g para determinação do peso úmido do papel. Em seguida, os papéis foram colocados em cápsulas para secagem em estufa à 100°C por 24 horas. Após as 24 horas, as cápsulas foram removidas da estufa e colocadas em um

dessecador com sílica para em seguida pesar os papéis filtros, novamente em balança de precisão, para determinar o peso seco do papel filtro.

Figura 23 – Anel de sucção moldado



Fonte: A autora (2020)

Esses procedimentos foram repetidos até as amostras atingirem teor de umidade gravimétrica tido como constante. A sucção matricial correspondente aos diferentes teores de umidade das amostras foi calculada a partir do teor de umidade dos papéis filtros, utilizando as Equações (7) e (8), propostas por Chandler, Crilly e Montgomery-Smith (1992).

$$\psi = 10^{6,05-2,48 \cdot \log(w_p)}, \text{ para } w_p > 47\% \quad (7)$$

$$\psi = 10^{4,84-0,0622 \cdot w_p}, \text{ para } w_p \leq 47\% \quad (8)$$

Onde:

w_p : umidade gravimétrica do papel filtro (%).

ψ : sucção (kPa).

As curvas de retenção de água foram plotadas tomando a sucção matricial como abscissa e a umidade volumétrica como ordenada. A relação entre umidade gravimétrica e volumétrica foi obtida através dos índices físicos mostrados nas Equações (9) e (10). Para melhor definição das curvas, foram realizados os ajustes propostos por van Genuchten (1980), a partir da Equação (11).

$$S = \frac{w \cdot d_g}{e} \quad (9)$$

$$\theta = \frac{S \cdot e}{1+e} \quad (10)$$

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot \psi^n)^m]} ; \text{ onde } m = 1 - \frac{1}{n} \quad (11)$$

Onde:

S: grau de saturação (%).

w: umidade gravimétrica obtida (%).

d_g : densidade dos grãos (g/cm^3).

e: índice de vazios.

θ : umidade volumétrica (%).

θ_{res} : teor de umidade volumétrica residual, obtido experimentalmente (%).

θ_{sat} : teor de umidade volumétrica de saturação, obtido experimentalmente (%).

ψ : sucção (kPa).

α e n : parâmetros de ajuste da curva.

Os ajustes das curvas de retenção foram realizados utilizando o *software* Excel. A partir de valores experimentais de θ_{res} e θ_{sat} , e de uma estimativa inicial dos parâmetros α e n do modelo de van Genuchten (1980), foi calculado o quadrado do desvio entre cada valor de umidade volumétrica experimental e o respectivo valor de umidade volumétrica do modelo, correspondente à mesma sucção atuante: $(\theta_{\text{experimental}} - \theta_{\text{modelo}})^2$. A partir da soma dos quadrados dos desvios, utilizou-se a Equação (12) para calcular o coeficiente de determinação (R^2) da curva ajustada através do modelo de van Genuchten (1980) para os valores estimados inicialmente de α e n , em relação aos valores experimentais de umidade volumétrica.

$$R^2 = 1 - \frac{SQD}{N.S^2} \quad (12)$$

Onde:

R^2 : coeficiente de determinação.

SQD: soma dos quadrados dos desvios.

N: número de medições experimentais de θ .

S^2 : variância dos valores de θ obtidos experimentalmente.

Os valores dos parâmetros de ajuste da curva (α e n) foram otimizados a partir de métodos iterativos utilizando a ferramenta Solver do *software* Excel. Assim, foram obtidas as combinações dos parâmetros que proporcionaram os valores estimados de θ_{modelo} mais próximos possíveis dos valores calculados de $\theta_{\text{experimental}}$, resultando na menor soma dos quadrados dos desvios para o conjunto de dados, e, conseqüentemente, no maior coeficiente de determinação da curva de ajuste de van Genuchten (R^2).

A partir das curvas de retenção ajustadas, foram obtidos graficamente os valores referentes ao ponto de entrada de ar e o teor de umidade referente a capacidade de campo (θ_{cc}), definida como a máxima umidade que consegue ser retida por um meio poroso sem gerar percolação, a qual pode ser entendida como correspondente a sucção de 33 kPa para solos argilosos (OTTONI, 2005).

A condutividade não saturada relativa à água foi determinada a partir do modelo de van Genuchten (1980), conforme as Equações (13) e (14), tendo em vista que os resultados obtidos através deste método têm apresentando estimativas satisfatórias para modelagem do fluxo de água em solos. O coeficiente de permeabilidade relativo do solo ao ar foi calculado a partir da Equações (15) e (16), sendo o coeficiente relativo à água o valor complementar, calculado através da Equação (17) (van GENUCHTEN, 1980).

$$k(S_\theta) = k_{sat} * S_\theta^{0,5} * \left[1 - \left(1 - S_\theta^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (13)$$

$$S_\theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (14)$$

$$K_{rar} = 1 - \left\{ S_e^{0,5} * \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \right\} \quad (15)$$

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad (16)$$

$$K_{rw} = S_e^{0,5} * \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (17)$$

Onde:

$k(S_\theta)$: condutividade hidráulica correspondente a S_θ (m/s).

S_θ : grau de saturação corresponde a θ (%).

θ : teor de umidade volumétrica para o qual se deseja determinar a condutividade hidráulica não saturada (%).

k_{sat} : condutividade hidráulica saturada (m/s).

m : parâmetro de ajuste calculado conforme Equação (11) (dependente da distribuição dos poros no solo)

K_{rar} : coeficiente de permeabilidade relativa do solo ao ar (adimensional).

S_e : saturação efetiva (%).

S : grau de saturação (%).

S_r : grau de saturação na umidade residual (%).

K_{rw} : coeficiente de permeabilidade relativa do solo à água (adimensional).

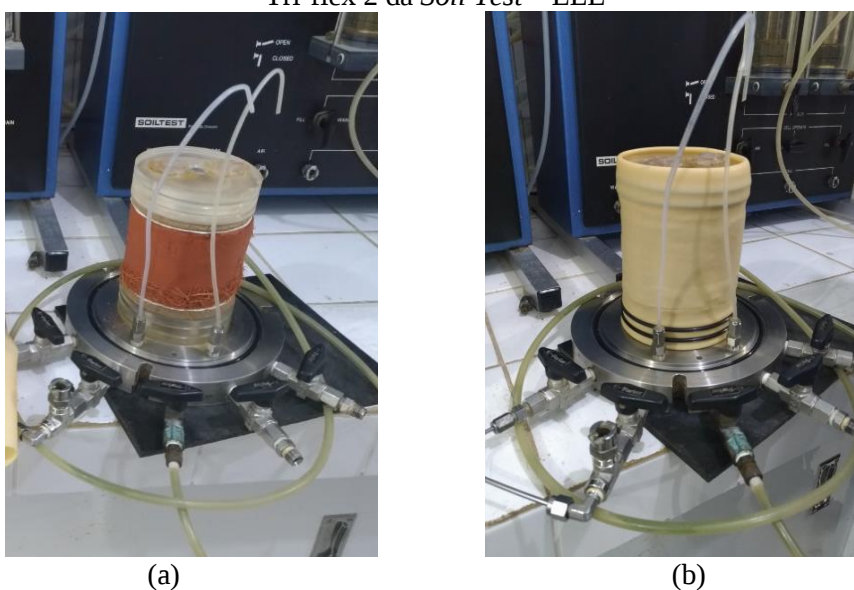
3.3.3 Ensaios de condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica foi medida utilizando um permeâmetro de parede flexível modelo Tri-flex 2 da *Soil Test – ELE* e amostras com dimensões de 10 cm de diâmetro e altura variando entre 6,0 e 7,3 cm, compactadas nos respectivos teores de umidade ótima e densidade seca. Foram mensuradas as condutividades verticais ao ar e à água de 4 CPs, 2 de ‘solo puro’ e 2 da mistura ‘solo-fibra’, conforme mostrado no fluxograma da Figura 22.

Cada amostra foi montada na célula do equipamento na seguinte sequência da base ao topo: base de acrílico da célula (local de entrada do percolante), pedra porosa, papel filtro, corpo de prova, papel filtro, pedra porosa, e tampa de acrílico “*top cap*” (ver Figura 24a). O conjunto foi, então, envolvido por membrana flexível, fixada através de elásticos de borracha na base e no topo de acrílico (ver Figura 24b). As mangueiras de drenagem foram conectadas ao “*top cap*” com auxílio de silicone para devida fixação e vedação. Utilizou-se as mesmas pedras porosas em todos os ensaios, inclusive na mesma sequência, de forma a minimizar a influência dessa variável.

A célula do equipamento foi isolada com a instalação de tampa acrílica, e o ambiente externo à amostra foi preenchido com água potável até total preenchimento para possibilitar o confinamento do CP (ver Figura 24c), sendo verificada a inexistência de bolhas de ar na superfície.

Figura 24 – Montagem de CP para realização de ensaio de condutividade hidráulica no equipamento Tri-flex 2 da *Soil Test – ELE*





(c)

Fonte: A autora (2020)

As amostras que passaram pelos ensaios de condutividade hidráulica, foram inseridas no equipamento após o processo de secagem descrito em 3.3.1, para realização do ensaio de permeabilidade ao ar em estado seco, conforme item 3.3.3.1. Em seguida, sofreram saturação para realização do ensaio de permeabilidade saturada à água, conforme 3.3.3.2.

3.3.3.1 Condutividade vertical ao ar

Os ensaios foram realizados tomando como base as metodologias utilizadas por Lopes (2011), Maciel (2003) e Mariano (2008), com algumas modificações. As amostras secas foram submetidas a fluxos de ar verticais ascendentes com aumento gradativo da pressão de confinamento e do gradiente de pressão aplicado. O confinamento lateral foi feito com água, por ser um fluido incompressível, e os fluxos de ar foram medidos com auxílio de rotâmetros.

No laboratório estavam disponíveis apenas 3 escalas de rotâmetros: 1 a 10 L/h, 1 a 12 L/h e 1 a 30 L/h. Diante da necessidade verificada de abranger valores mais elevados, foram adquiridos também os rotâmetros de 20 a 250 L/h e 50 a 600 L/h (ver Figura 25). Em razão do período de espera necessário até a aquisição dos novos equipamentos, o primeiro ciclo dos ensaios de condutividade hidráulica não contou com realização da verificação em relação ao ar, apenas à água. O segundo ciclo em diante foi sempre realizado na seguinte sequência: secagem (descrita em 3.3.1), condutividade ao ar (CP seco), saturação, condutividade à água (CP saturado).

Figura 25 – Rotômetros utilizados para aferição do fluxo de ar



Fonte: A autora (2020)

Frisa-se que os CPs de ‘solo puro’ passaram pelo 1º ciclo de saturação (ensaio de condutividade hidráulica à água) após passagem pelo processo de secagem. Já os CPs de ‘solo-fibra’ foram ensaiados pela primeira vez sem passar por secagem, com a finalidade de verificar se um único processo de secagem já poderia trazer consequências relevantes à condutividade à água, independente da repetição dos ciclos. A condutividade à água do ‘solo puro’ saturado sem passar por secagem prévia já havia sido mensurado por Oliveira (2018) e serviria de parâmetro de comparação.

Em cada ensaio, foram aplicadas quatro pressões de confinamento, na seguinte sequência: 10, 20, 30 e 40 kPa. Para cada pressão de confinamento foram aplicados gradientes também crescentes, partindo de 2 kPa até o valor ‘pressão de confinamento - 2 kPa’, com intervalo de 2 kPa. Entende-se por gradiente de pressão o valor correspondente à diferença entre a pressão de entrada (P_E , na base da amostra) e a de saída (P_S , no topo), sendo a saída do sistema mantida livre (pressão atmosférica = 1 atm), ou seja: $P_S = 101,325$ kPa. Assim, para pressão de confinamento de 10 kPa, foram ensaiados gradientes de 2, 4, 6 e 8 kPa; para confinamento de 20 kPa, foram ensaiados gradientes de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 e 18 kPa; e assim por diante.

As leituras nos rotômetros foram realizadas após a estabilização do fluxo em cada caso. Em casos de estabilização em que a esfera de medição permanecesse em movimento constante, foi tirada a média dos valores extremos do intervalo de movimentação. Os valores de vazão aferidos foram convertidos em velocidade para possibilitar os cálculos subsequentes.

Os coeficientes de permeabilidade ao ar intrínsecos (em situação de solo seco) foram calculados para cada gradiente de pressão através da Equação (4), a qual considera o efeito da compressibilidade do fluido. Embora as pressões empregadas no estudo fossem baixas, através

da Equação (5) percebeu-se que a utilização da expressão para fluidos incompressíveis (3) levaria a erros progressivamente maiores a depender do gradiente aplicado, até erros na ordem de 15% para gradientes de pressão de 38 kPa. O coeficiente de condutividade hidráulica ao ar para cada gradiente aplicado foi calculado aplicando a Equação (18). O mesmo valor seria obtido a partir da utilização da Equação (19), a qual foi utilizada para realizar a conferência dos resultados.

$$k_a = \frac{K_a * \rho * g}{\mu} \quad (18)$$

$$k_a = \frac{2 * L * P_S * v * \rho * g}{P_E^2 - P_S^2} \quad (19)$$

Onde:

k_a : coeficiente de condutividade hidráulica ao ar (m/s) – “permeabilidade ao ar”.

ρ : densidade do ar = 1,185 kg/m³.

g : aceleração da gravidade = 9,81 m/s².

μ : viscosidade dinâmica do ar = 1,837 x 10⁻⁵ (kg/m).s (t = 25°C).

L : comprimento de percolação (altura) da amostra de solo (m).

P_S : pressão de saída da amostra = pressão atmosférica = 101,325 kPa.

v : velocidade aparente de fluxo (m/s), aferida através de rotâmetro.

P_E : pressão de entrada da amostra (kPa).

3.3.3.2 Condutividade vertical à água

Os ensaios de condutividade foram realizados de acordo com os procedimentos estabelecidos nas normas ASTM D5084-10 (ASTM, 2010) e NBR 14545 (ABNT, 2000). Após realização do ensaio de condutividade vertical ao ar, o CP era mantido no permeâmetro para sofrer saturação. A saturação foi realizada seguindo os seguintes estágios, em ordem:

- a) aplicação de 70 kPa de confinamento e 50 kPa no topo e base;
- b) aplicação de 120 kPa de confinamento e 100 kPa no topo e base;
- c) aplicação de 120 kPa de confinamento, 50 kPa no topo e 100 kPa na base para promover a circulação de água na amostra;
- d) aplicação de 120 kPa de confinamento e 100 kPa no topo e base.

Os dois primeiros estágios eram mantidos por alguns minutos cada, pois o solo seco tendia a absorver grande quantidade de água rapidamente até atingir um alto grau de saturação. O 3º estágio era mantido por algumas horas, pois a circulação de água favorecia a chegada de

água em todas as áreas da amostra. O último estágio era deixado ao menos de um dia para o outro, de forma a garantir a total saturação do CP.

Antes de iniciar o ensaio, eram feitas duas verificações da saturação do CP através da comparação de volume de água ao entrar pela base e sair pelo topo em um gradiente de pressão constante de 30 kPa. Caso esses valores divergissem, seria necessário manter a circulação de água por mais um tempo até que os volumes de entrada e saída coincidissem. Quando constatada a saturação do corpo de prova, era então realizado o ensaio de condutividade hidráulica vertical à água.

Os ensaios foram realizados com aplicação de tensão confinante de 120 kPa na parede da membrana flexível (lateral), 100 kPa na base e 50 kPa no topo, gerando um gradiente hidráulico de 50 kPa para percolação da água na direção vertical e sentido ascendente das amostras. Em seguida foram realizadas as medições de tempo para percolação de um mesmo volume de água. Os ensaios foram repetidos até que fossem obtidos ao menos três valores com $\pm 5\%$ um do outro (mínimo de três execuções para cada amostra). Considerou-se a média das 3 últimas medições para obtenção do coeficiente de condutividade hidráulica saturado das amostras.

Os coeficientes de permeabilidade saturada à água foram calculados em cada ensaios através da Equação (20), a qual considera fluido incompressível.

$$k_h = \frac{h * V_p}{A_b * t * \Delta p} \quad (20)$$

Onde:

k_w : coeficiente de permeabilidade à água (m/s).

h : altura (de percolação) do corpo de prova (m).

V_p : volume percolado (m³).

A_b : área da base do corpo de prova (m²).

t : tempo de percolação (s).

Δp : gradiente de pressão aplicado (m).

3.3.4 Ensaio de cisalhamento direto

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram obtidos através do ensaio de cisalhamento direto, conforme descrito na norma ASTM D3080-04 (ASTM, 2004). Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados posteriormente à realização dos ciclos molhagem-secagem (ver Figura 22), e teve o intuito de investigar a influência do envelhecimento das

amostras nas curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal, deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal e nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, intercepto de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ). Tomou-se como parâmetro de comparação os resultados obtidos por Oliveira Jr. (2018), o qual ensaiou amostras que não passaram por ciclos de envelhecimento.

O equipamento utilizado foi uma prensa de cisalhamento direto cujo sistema de aplicação de tensão normal era constituído de pesos em pendural. Os extensômetros utilizados para realizar as leituras dos deslocamentos verticais e horizontais tinham sensibilidade de 0,01 mm e a força horizontal foi lida através de um anel dinamométrico de constante de 0,16 kgf div⁻¹ e capacidade de 500 kgf.

Os ensaios foram conduzidos em condições não inundadas, com o intuito de avaliar o comportamento não saturado, com aplicação de tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, as quais foram mantidas até a estabilização dos deslocamentos verticais. A compressão foi mantida até ser verificada 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.

Tem-se conhecimento que velocidade de cisalhamento empregada foi muito elevada em relação às normalmente utilizadas para argilas, possibilitando a formação de poropressões durante o ensaio: poropressões positivas podem causar redução da resistência do material, ao passo que negativas (sucção), aumento (GERSCOVICH, 2010). Entretanto, objetivou-se manter a mesma velocidade utilizada por Oliveira Jr. (2018) para permitir uma comparação mais aproximada dos resultados, sem a criação de novas variáveis de análise.

Cada amostra foi moldada a partir de cada um dos 12 CPs que passaram pelos ciclos molhagem-secagem (item 3.3.1). As caixas metálicas com 25,81 cm² de área e 4 cm de altura foram cravadas na superfície dos respectivos CPs, com auxílio de faca e tesoura (ver Figura 26), de forma que as 3 amostras do mesmo tipo ('solo puro' ou 'solo-fibra') e com mesmo número de ciclos ('5' ou '10') fossem agrupadas para realização dos ensaios, sendo cada amostra atrelada a um valor de tensão normal aplicada (ver fluxograma da Figura 22).

Figura 26 – Moldagem de amostra para realização de ensaio de cisalhamento direto



Fonte: A autora (2020)

A moldagem das caixas foi realizada quando o CP estava com teor de umidade próximo da ótima, após período de espera para equalização da umidade em todo o volume. Nos casos em que o ensaio de cisalhamento direto não pôde ser realizado subsequentemente à moldagem, a amostra foi envolvida por camadas de plástico-filme (PVC) e papel alumínio, e conservada em caixa de isopor até o momento de execução do ensaio, com o intuito de minimizar a perda de umidade para o meio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões da pesquisa desenvolvida. Inicialmente será abordado o efeito isolado da passagem pelos ciclos secagem-molhagem na integridade visual dos CPs, considerando as duas formas de saturação empregadas (por capilaridade e através do permeâmetro). Em seguida, serão apresentados os resultados e discussões dos ensaios de laboratório realizados referentes à (i) curva de retenção de água, (ii) condutividade hidráulica não saturada, (iii) condutividade ao ar, (iv) condutividade à água, e (v) resistência ao cisalhamento.

4.1 CICLOS SECAGEM-MOLHAGEM

A utilização de dois métodos diversos para efetuar a saturação do ciclo de envelhecimento acelerado acabou criando uma variável na análise. Embora ambos os métodos propiciem um fluxo ascendente de água, na saturação por capilaridade esse fluxo é mais lento e não há confinamento lateral, o que fez com que o aumento gradativo do peso das amostras com o acréscimo de água, em especial na região mais inferior – mais afetada pela presença de água – levasse a certo “desmoronamento” do solo: o que pode ter desagregado de forma irreal as amostras, já que em situação de campo o solo se encontra lateralmente confinado. Esse processo não ocorreu nos CPs saturados através do permeâmetro, os quais contaram com pressão de confinamento lateral.

No entanto, considerou-se que essa variável não teve grande influência, tendo em vista que os CPs saturados por capilaridade não seriam avaliados quanto à condutividade hidráulica, e sim apenas quanto a resistência ao cisalhamento. Entendeu-se que certa desagregação mais superficial não teria influência na parte mais interna do CP, a qual seria utilizada para montagem da caixa de cisalhamento.

Ainda assim, a utilização desses métodos distintos possibilitou uma análise extra: todos os CPs de ‘solo puro’ saturados por capilaridade apresentaram formação de fissuras significativas já a partir do 1º ciclo de saturação, enquanto os CPs de ‘solo-fibra’ se mantiveram visualmente íntegros até o 10º ciclo (ver Figura 27 para comparação). Em contrapartida, todos os CPs saturados no permeâmetro (‘solo puro’ e ‘solo-fibra’) mantiveram sua integridade visual ao longo de todos os ensaios, sem presença de fissuras aparentes (ver Figura 28).

Figura 27 – CPs saturados por capilaridade em diversos ciclos



a) CPs 'solo puro' após 2º ciclo de saturação



b) CPs 'solo puro' após 3º ciclo de secagem



c) CPs 'solo puro' durante 3º ciclo de saturação



d) CPs 'solo puro' após 5º ciclo de saturação



e) CPs 'solo-fibra' após 2º ciclo de saturação



f) CPs 'solo-fibra' após 3º ciclo de secagem



g) CPs 'solo-fibra' durante 3º ciclo de saturação



h) CPs 'solo-fibra' após 5º ciclo de saturação

Fonte: A autora (2020)

Figura 28 – CPs após 7º ciclo de saturação no permeâmetro (invertidos em relação ao sentido de execução dos ensaios)



Fonte: A autora (2020)

É possível perceber que a presença de fibras dificultou a desagregação provocada pelo acréscimo de peso de água em situação sem confinamento lateral (saturação por capilaridade) e garantiu maior integridade das amostras. Além da grande presença de fissuras visíveis nas Figura 27a, 26c e 26d, os CPs de ‘solo puro’ apresentaram também um “embarrigamento” lateral proveniente do sobrepeso da água em níveis mais baixos, conforme pode ser visualizado na Figura 27b. Constatou-se, ainda, que os efeitos de desagregação das amostras de ‘solo puro’ foram mais evidentes nos CPs de maior altura, reforçando a ideia de que o aumento de peso da amostra em situação sem confinamento lateral propicia a fragilidade do solo.

As amostras de ‘solo-fibra’ não demonstraram presença de fissuras ou “embarrigamento” ao longo dos ciclos secagem-molhagem independente da forma de saturação empregada, apenas pequeno carreamento de finos nas proximidades do contato com o papel filtro e pedra porosa, o que também foi observado nos CPs de ‘solo puro’. Acredita-se que essa linha de erosão pode ter sido efeito da elevação acidental do nível de água além da altura da pedra porosa em algum momento da saturação, o que provocou o contato direto das amostras com a água, facilitando o carreamento. Outrossim, as pedras porosas utilizadas possuíam pequena variação de espessura, aumentando a possibilidade de carreamento nos CPs depositados sobre pedras mais delgada.

Por outro lado, esse tipo de carreamento também foi observado nos CPs saturados através do permeâmetro, embora em menor escala (ver Figura 28). É interessante observar que os CPs da Figura 28 encontram-se invertidos, ou seja, a linha de fragilização também coincidiu com a base na situação de saturação de um fluxo ascendente, embora bem menos evidente na amostra de ‘solo-fibra’. Não se descarta a hipótese de que a compactação pode ter sido insuficiente na parte perimetral inferior, devido à própria dificuldade de acesso do pilão, mas ainda assim, a visível diferença entre os CPs com e sem fibra corroboram o efeito benéfico da inclusão de fibra ao solo para evitar o carreamento de finos. As fibras acabaram unificando a

amostra e dificultando sua desagregação devido ao efeito da água em todos os casos estudados. Tal comportamento pode ser comparado com o efeito de raízes nos solos, muito estudado e comprovado o ganho de resistência com o acréscimo destas.

Os “rabichos” fixados junto aos CPs mostraram-se bem úteis por permitir um registro permanente durante todo o programa experimental tanto da identificação do CP, quanto do seu peso seco, facilitando o monitoramento durante os processos de secagem. E muito embora fosse constituído de material menos permeável que o papel filtro (para impedir sua desintegração com a presença da água), após certo tempo submersos atingiram a saturação e passaram a contribuir com a saturação – inicialmente do papel filtro e posteriormente do CP.

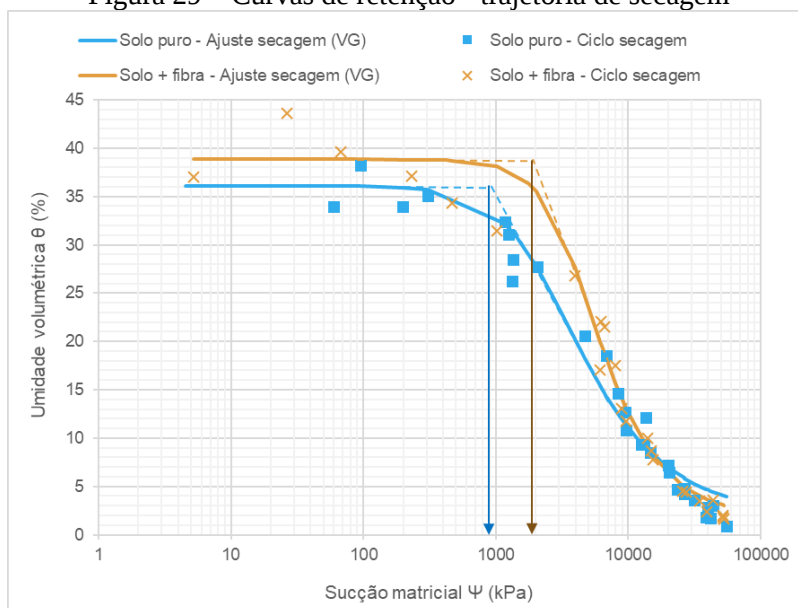
Em que pese a análise visual não ter sido o foco do trabalho, foi possível perceber que ainda que o primeiro ciclo já tenha ocasionado fissuras significativas nos CPs de ‘solo puro’ saturados por capilaridade, elas tenderam a aumentar suavemente com os ciclos subsequentes. Essa tendência foi verificada por Bamgbopa (2016), Chen e Lu (2015) e Albrecht e Benson (2001), por exemplo.

A crítica realizada por Bamgbopa (2016) ao trabalho de Albrecht e Benson (2001), por superestimarem os efeitos das taxas de ressecamento a partir de metodologia que não reproduzia condições de campo, pode ser realizada para o presente trabalho, tendo em vista a exposição a condições extremas (até 105°C), embora de forma gradativa. Mas como a realização dos ensaios de condutividade hidráulica máxima ao ar exigia tal condição (seca), foi necessário reproduzi-la também para os CPs que não seriam testados quanto à condutividade hidráulica como forma de minimizar as variáveis atuantes. Ainda assim, a presença das fibras conseguiu minimizar os efeitos negativos do processo – ao menos para fissuras visuais.

4.2 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

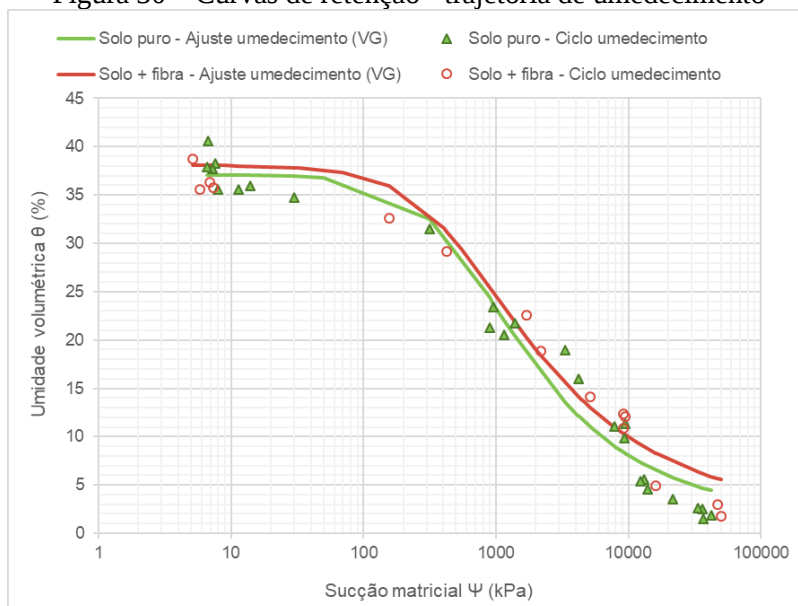
A Figura 29 apresenta os dados experimentais (pontos) obtidos para retenção de água do ‘solo puro’ e da mistura ‘solo-fibra’ em termos da sucção matricial e da umidade volumétrica nas trajetórias de secagem, e a Figura 30, de umedecimento, cada qual com suas respectivas curvas de ajuste. Os ajustes foram realizados utilizando os conjuntos de parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) que resultaram em maiores coeficientes de determinação (R^2), apresentados na Tabela 9. Ressalta-se que os altos coeficientes de determinação obtidos indicam mais de 97% dos dados experimentais podem ser explicados por este modelo numérico. A Figura 31 apresenta as curvas de ajuste do ‘solo puro’ e do ‘solo-fibra’ para ambas as trajetórias compiladas, para melhor comparação.

Figura 29 – Curvas de retenção - trajetória de secagem



Fonte: A autora (2020)

Figura 30 – Curvas de retenção - trajetória de umedecimento



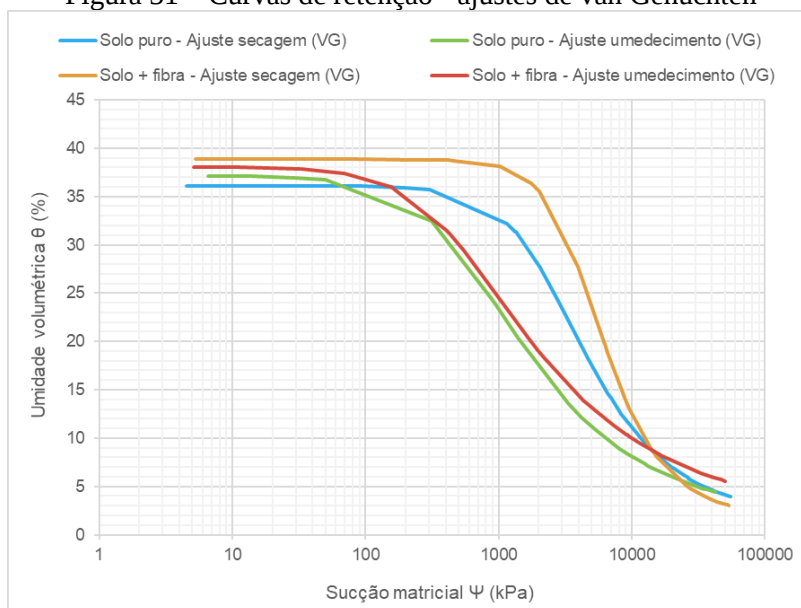
Fonte: A autora (2020)

Tabela 9 – Parâmetros da equação de van Genuchten e coeficientes de determinação (R^2) obtidos nos ajustes das curvas de retenção de água

Curva	a	n	m	R^2
Solo puro – secagem	$4,46 \times 10^{-4}$	1,852	0,460	0,9722
Solo puro – umedecimento	$1,95 \times 10^{-3}$	1,569	0,362	0,9726
Solo-fibra – secagem	$2,39 \times 10^{-4}$	2,349	0,574	0,9726
Solo-fibra – umedecimento	$2,20 \times 10^{-3}$	1,479	0,324	0,9701

Fonte: A autora (2020)

Figura 31 – Curvas de retenção - ajustes de van Genuchten



Fonte: A autora (2020)

As curvas apresentam formato unimodal bastante similares, quando avaliadas dentro do mesmo ciclo. Farias *et al.* (2011) apontam que mesmo com o aumento da porosidade ocasionada com o incremento de fibras à matriz argilosa, a retenção de água é comandada pelos microporos, pois a compactação realizada homogeneiza os poros e reduz os macroporos da mistura. Assim, a retenção de água não deve ser tão influenciada pela adição de fibras.

É possível perceber que as curvas da mistura com fibra estão localizadas acima das curvas de solo natural em ambas as trajetórias estudadas, indicando que a presença de fibras favoreceu a retenção de água para um mesmo nível de sucção. Apenas para sucções maiores que 15000 kPa, no ciclo de secagem, a curva ‘solo-fibra’ ultrapassa a curva ‘solo puro’, região em que a retenção desse último seria superior. Entretanto, tendo em vista que o próprio papel filtro Whatman nº 42 está mais suscetível a imprecisões para valores de sucções menores que 10 kPa e maiores que 29000 kPa (MARINHO, 2005) além das possibilidades de erro operacional diante da rápida perda de umidade do papel para o ambiente, os pontos localizados nas partes iniciais e finais da curva estão mais sujeitos a variações.

As curvas do ciclo de molhagem são praticamente paralelas, com diferença de apenas 1% (de umidade volumétrica) entre elas, aproximadamente, com especial proximidade para sucções entre 150 e 300 kPa. As curvas de ajuste chegam a se distanciar um pouco mais (cerca de 2% de diferença) nas sucções maiores que 4000 kPa, mas é possível perceber que os dados experimentais obtidos (pontos indicados nos gráficos) são bastante similares, de forma que

pode-se concluir que para o ciclo de molhagem a influência da inclusão da fibra é menor do que no ciclo de secagem.

Adicionalmente, Oliveira (2004) aponta que é comum que haja diferenças entre a curva de calibração do método – no caso, de Chandler, Crilly e Montgomery-Smith (1992), e o lote do papel utilizado, recomendando que seja obtida uma curva de calibração para cada lote ou verificação da validade da calibração em alguns pontos da curva, ambos procedimentos que não foram realizados e ocasionaram na necessidade de descartar pontos obtidos que divergiam muito da tendência majoritária para obtenção de curvas de ajuste com altos coeficientes de determinação. Assim, trechos de curvas muito próximos não permitem uma análise muito precisa.

Ambas as curvas ‘solo-fibra’ apresentaram aumento da umidade de saturação, em relação à sua correspondente curva ‘solo puro’, inclusive com pequenos aumentos do trecho de saturação das curvas, qual seja o intervalo aproximadamente constante antes do ponto de entrada de ar. O incremento de fibras ao solo aumentou o índice de vazios e proporcionou uma maior capacidade de armazenamento de água, conforme Oliveira Jr. (2018) já havia verificado. Tendo em vista, ainda, que a curva de retenção de água é especialmente influenciada pela estrutura do solo compactado (VANAPALLI; FREDLUND; PUFAHL, 1999), tanto a umidade de compactação quanto o percentual de acréscimo de fibra são determinantes para garantir a adesão solo-fibra e influenciarão, também, na condutividade hidráulica da mistura.

Os parâmetros obtidos através das curvas de retenção de água são mostrados na Tabela 10. O ‘solo puro’ apresentou sucção no ponto de entrada de ar na ordem de 900 kPa, enquanto o ‘solo-fibra’, foi na ordem de 1900 kPa. Oliveira Jr. (2018) obteve valores de 900 e 1125 kPa, respectivamente, para o mesmo ‘solo puro’ tratado neste trabalho e mistura com incorporação do mesmo percentual de fibras (1%), com coeficientes de determinação respectivos de 0,9847 e 0,9866. Essa diferença de valores para a mistura pode indicar que a adesão solo-fibra neste caso superou àquela ocorrida no estudo do mencionado autor.

Tabela 10 – Parâmetros obtidos através das curvas de retenção de água

Curva	Ψ entrada de ar (kPa)	θ_{sat} (%)	θ_{res} (%)	θ_{cc} (%)
Solo puro – secagem	900	36,10	1,68	36,09
Solo puro – umedecimento	-	37,11	1,53	36,94
Solo-fibra – secagem	1900	38,84	1,86	38,84
Solo-fibra – umedecimento	-	38,08	1,73	37,84

Fonte: A autora (2020)

Vale salientar que as fibras utilizadas neste trabalho, embora originárias do mesmo grupo produtivo de Oliveira Jr. (2018), são provenientes de lotes diferentes e relativamente espaçadas temporalmente, o que certamente traz variações nas suas propriedades, por ser a fibra de coco uma matéria orgânica dependente de suas condições de cultivo, armazenamento e coleta. Ademais, a distribuição gravimétrica das fibras utilizadas neste estudo diverge bastante daquela do referido autor: enquanto apenas cerca de 54% das fibras possuíam comprimento menor que 5 cm (19% menor que 1 cm), mais de 97% das fibras de Oliveira Jr. (2018) eram menores que 5 cm (aproximadamente 16% até 1 cm).

Embora os pedaços de fibra sobressalentes aos anéis moldados para o ensaio de sucção fossem aparados, fibras mais longas tendem a ser mais calibrosas e com maior área superficial, o que certamente influencia em suas propriedades de retenção. A coincidência de valor de sucção do ponto de entrada de ar para o ‘solo puro’ e distanciamento no caso do ‘solo-fibra’ demonstram essa situação, não obstante esse intervalo do gráfico ser de rápido declínio para ambos os casos e haver pontos do ‘solo-fibra’ bastante próximos da curva ‘solo puro’, o que indica que pequenas variações de propriedades da fibra podem resultar em valores de sucção no ponto de entrada de ar bastante diversos.

A umidade volumétrica residual foi muito similar para todos os casos estudados, com leve aumento nas misturas com fibra em relação ao solo natural no mesmo ciclo (secagem/umedecimento), o que, segundo Rosário *et al.* (2011), pode ser devido à energia superficial predominantemente polar das fibras vegetais e sua maior afinidade com a água, o que aumentaria a retenção. Por outro lado, o aumento de porosidade ocasionado pelo acréscimo das fibras facilita a saída de água dos vazios, justificando o aumento pouco significativo observado.

Encontrou-se valores de umidade de capacidade de campo (θ_{cc}), estimada para teor de sucção de 33 kPa, maiores para as curvas com fibras, tanto nos ciclos de secagem quanto de umedecimento, o que reflete diretamente na capacidade de armazenamento de água do solo. Esses resultados demonstram que a adição de fibras de coco em solo argiloso favorece a maior retenção e armazenamento de água pelo solo, tanto em razão das propriedades polares da fibra, tanto pelo aumento de volume disponível para armazenamento diante do maior índice de vazios proporcionado. Os valores encontrados são condizentes com os achados de Oliveira Jr. (2018).

Tais características indicam que o incremento de fibras de coco torna o solo mais adequado para aplicações onde esteja sujeito a ciclos de secagem e molhagem, como camadas de cobertura tanto de aterros sanitários quanto de barreiras de contenção de contaminantes. A utilização de camadas de cobertura com maior capacidade de retenção e armazenamento de

água possibilita a menor geração de percolado, pois maior percentual de água da chuva tenderá a ficar retida após a infiltração, como também a redução da emissão de gases gerados, já que o aumento da umidade da camada é responsável por reduzir a permeabilidade ao ar e gases – relacionam-se de forma inversa nas condições não saturadas.

Em um aterro sanitário, os lixiviados são formados nas camadas de resíduos quando seu teor de umidade supera sua capacidade de campo e há criação de percolado (EL-FADEL *et al.*, 2002; MONTEIRO, 2003). Os valores mais elevados da capacidade de campo obtidos com adição de fibras de coco possibilitam a retenção do lixiviado pela mistura, tanto em camadas intermediárias, quanto em camada de cobertura final. Entretanto, o volume de lixiviados existente vai depender da quantidade de águas pluviais infiltradas no aterro, sendo a redução da infiltração de água e da liberação incontrolada de gases tóxicos (biogás/gases de efeito estufa – GEE) as mais importantes funções da camada de cobertura final.

Ainda nos sistemas de extração forçada de biogás, a captação de CH₄ nunca corresponde à totalidade produzida no aterro, em especial porque a operação normalmente só se torna economicamente viável em períodos de grandes produções, que corresponde a menos da metade do tempo total de geração do aterro (HUBER-HUMER; GEBERT; HILGER, 2008). Nesses casos, a quantidade não capturada varia de acordo com as características das camadas de cobertura e é necessário utilizar materiais que aperfeiçoem a captação. Ainda quando a extração forçada não é utilizada, a camada de cobertura deve, necessariamente, minimizar ao máximo as emissões (LOPES, 2011).

4.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NÃO SATURADA

A condutividade hidráulica (à água) não saturada foi estimada a partir do modelo de van Genuchten (1980) – Equações (13) e (14), utilizando os parâmetros apresentados na Tabela 9 e valores médios da condutividade hidráulica máxima à água (saturada) da Tabela 13 para ambas as trajetórias de secagem e umedecimento. Considerou-se a média ponderada dos valores médios da Tabela 13 como valor máximo diante da quantidade de ciclos secagem-molhagem realizados para cada CP, obtendo $2,6 \times 10^{-8}$ m/s para as curvas de ‘solo puro’, e $2,4 \times 10^{-8}$ m/s para as curvas de ‘solo-fibra’. As equações de condutividade hidráulica não saturada para ‘solo puro’ nas trajetórias de secagem e umedecimento são apresentadas como Equações (21) e (22), respectivamente; e Equações (23) e (24) para ‘solo-fibra’, , nessa mesma ordem. A Figura 32 apresenta as curvas ajustadas a partir das equações mencionadas.

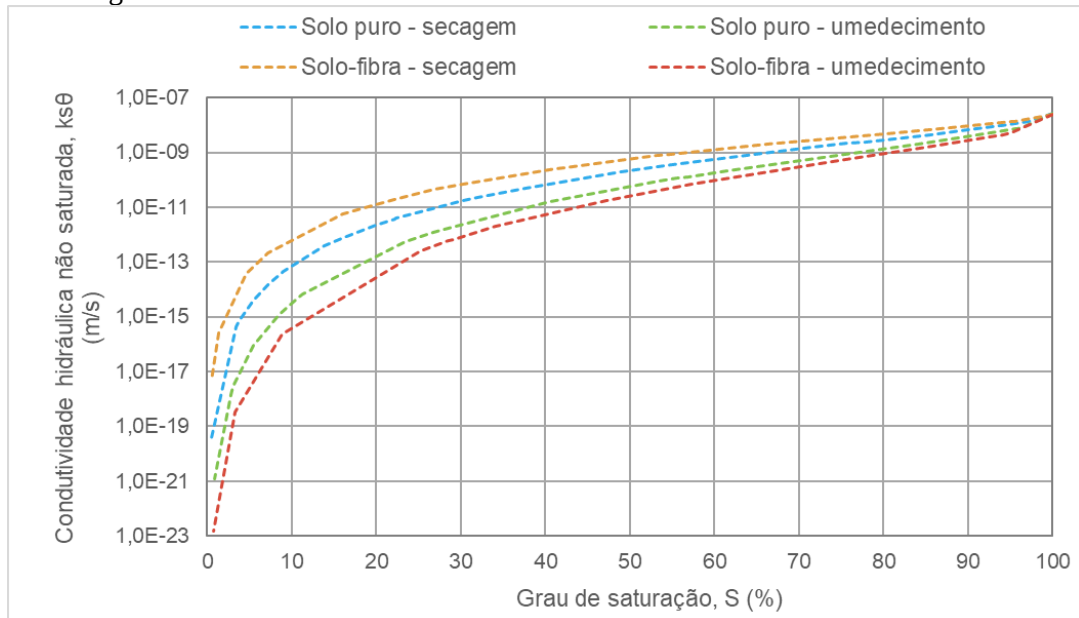
$$k(S_\theta) = 2,6 \times 10^{-8} * S_\theta^{0,5} \left[1 - \left(1 - S_\theta^{\frac{1}{0,460}} \right)^{0,460} \right]^2 \quad (21)$$

$$k(S_\theta) = 2,6 \times 10^{-8} * S_\theta^{0,5} \left[1 - \left(1 - S_\theta^{\frac{1}{0,362}} \right)^{0,362} \right]^2 \quad (22)$$

$$k(S_\theta) = 2,4 \times 10^{-8} * S_\theta^{0,5} \left[1 - \left(1 - S_\theta^{\frac{1}{0,574}} \right)^{0,574} \right]^2 \quad (23)$$

$$k(S_\theta) = 2,4 \times 10^{-8} * S_\theta^{0,5} \left[1 - \left(1 - S_\theta^{\frac{1}{0,324}} \right)^{0,324} \right]^2 \quad (24)$$

Figura 32 – Condutividade hidráulica não saturada - modelo de van Genuchten



Fonte: A autora (2020)

As curvas apresentaram traçados bastante parecidos, e muito embora possuam os valores máximos muito próximos ($S = 100\%$), notam-se claras diferenças na taxa de variação da condutividade hidráulica com a mudança do grau de saturação. Interessante observar que as curvas com fibras demonstraram comportamentos opostos: na trajetória de secagem demonstraram maior condutividade hidráulica à água em relação às demais curvas, e na de umedecimento, menor. Na trajetória de secagem, o ‘solo-fibra’ apresentou variação da permeabilidade na ordem de 10^{-17} a 10^{-8} m/s, enquanto na de umedecimento, de 10^{-23} a 10^{-8} m/s. O ‘solo puro’ se manteve em posições intermediárias, variando entre 10^{-20} e 10^{-8} m/s na trajetória de secagem, e de 10^{-21} a 10^{-8} m/s no umedecimento.

Esse comportamento de extremos do ‘solo-fibra’ demonstra o efeito da retenção de água das fibras. Sabe-se que a condutividade hidráulica a determinado fluido cresce com o aumento

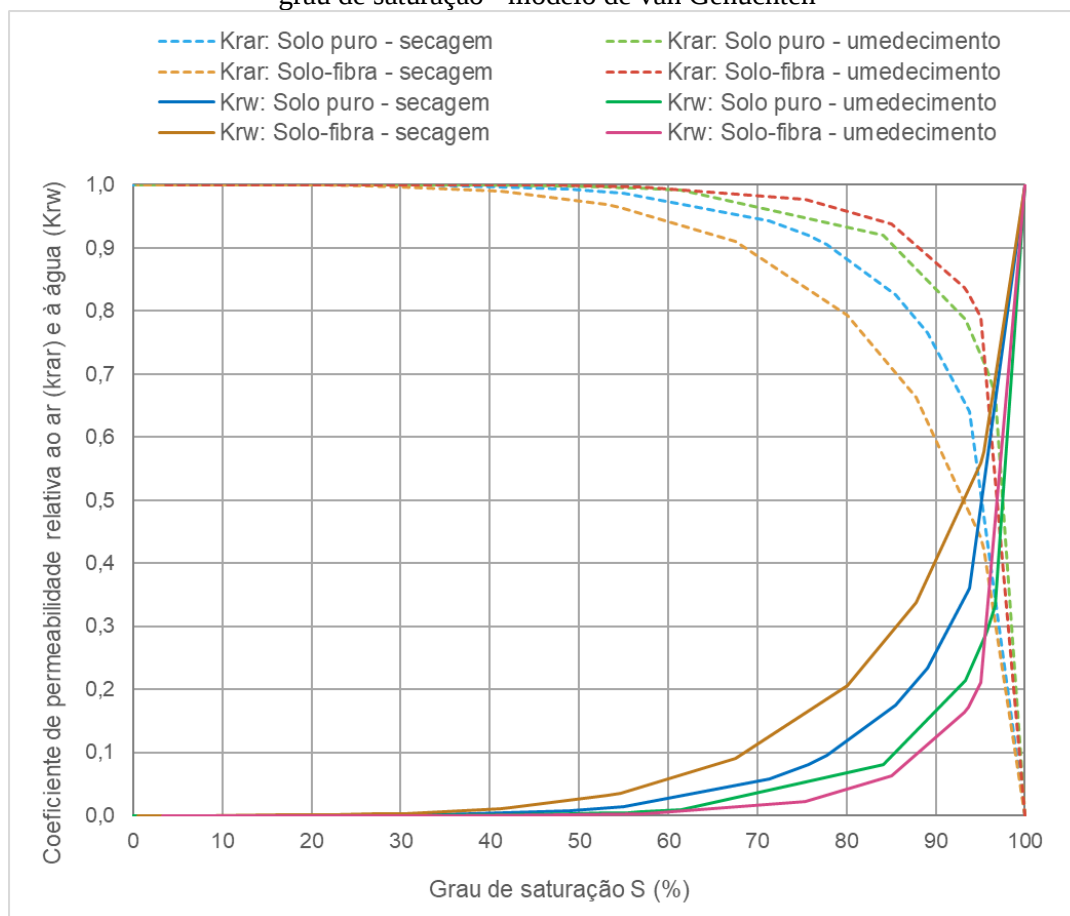
de sua presença no meio em razão das interconexões de trajetos que se tornam disponíveis, e vice-versa. Na trajetória ciclo de secagem, partindo da saturação, a maior capacidade de retenção da mistura promove uma perda de água mais lenta: deixa mais água disponível no meio e facilita sua percolação entre os vazios. Por outro lado, partindo da situação seca, a demanda por água das fibras acaba priorizando a incorporação própria da água que vai sendo disponibilizada, ao invés do preenchimento dos vazios da mistura, ou seja, a água adquirida não fica “livre”, o que reduz o volume disponível para o fluxo e dificulta a condutividade hidráulica.

Assim, a incorporação de fibras no solo argiloso promoveu uma mudança de grau de saturação mais suave tanto durante a secagem quanto no umedecimento. Conforme mencionado, essa característica é bastante interessante para aplicações sujeitas a grandes variações de umidade, como camadas de cobertura de aterros sanitários ou barreiras verticais para contenção de contaminação ambiental.

O modelo de van Genuchten (1980) permitiu ainda, utilizando também os parâmetros apresentados na Tabela 9, estimar a variação do coeficiente de permeabilidade relativa do solo ao ar – Equações (15) e (16) – e à água – Equações (16) e (17) – em função do grau da saturação, plotados em conjunto na Figura 33. As curvas apresentam traçados bem similares, revelando um comportamento espelhado em relação ao ar e à água entre as curvas de mesmo tipo (solo puro/solo-fibra) e trajetória (secagem/ umedecimento). As fórmulas do próprio modelo já preveem o espelhamento, tendo em vista que um coeficiente é tido como complementar ao outro, considerando que sejam os únicos fluidos presentes no solo.

Observando as curvas tracejadas dos modelos teóricos obtidos (Figura 33), referentes à permeabilidade relativa do solo ao ar (K_{rar}), há indicação de que para o solo seco até um grau de saturação de quase 40%, o fluxo de ar é praticamente exclusivo nas amostras, com pouca possibilidade de percolação da água. Com o aumento da umidade, há gradativo aumento da permeabilidade à água e consequente declínio da permeabilidade ao ar, com taxas de variação progressivamente crescentes. Por volta de aproximadamente 90% de saturação percebe-se uma mudança brusca dos coeficientes até atingir os extremos, em especial para o trecho acima de 95%.

Figura 33 – Coeficiente de permeabilidade relativa do solo ao ar (K_{rar}) e à água (K_{rw}) em função do grau de saturação - modelo de van Genuchten



Embora haja certa diferenciação nos traçados, é possível distinguir o comportamento geral das curvas em três partes. A primeira, para $S < 60\%$, onde as permeabilidades são praticamente constantes, com pequena variação mais perceptível na amostra ‘solo-fibra’ no ciclo de secagem. No segundo intervalo, para $60\% < S < 90\%$, tem-se um lento decréscimo da permeabilidade ao ar e aumento da permeabilidade à água com o aumento da saturação. E finalmente, para $S > 90\%$ as permeabilidades ao ar e à água passam por drásticas modificações com pequenos incrementos de água no solo.

Ressalta-se que as curvas obtidas nesse item foram provenientes de modelos teóricos de ajuste (VAN GENUCHTEN, 1980), com todas as limitações que lhe cabem. Ainda assim, investigações experimentais da variação da permeabilidade ao ar em função do grau de saturação comprovam a estimativa realizada (LOISEAU; CUI; DELAGE, 2002; LOPES, 2011; MACIEL, 2003; MACIEL; JUCÁ, 2000; MARIANO, 2008).

Infere-se que mesmo uma pequena redução do grau de saturação de um solo inicialmente saturado é capaz de causar grandes mudanças do coeficiente de permeabilidade à

água, o que não ocorre com a permeabilidade ao ar no caso de pequeno aumento do grau de saturação de solo inicialmente seco. Em situação de baixo grau de saturação a incorporação de água pelo solo é bastante rápida devido à alta sucção existente, mas a água não consegue traçar caminhos contínuos que permitam sua movimentação e fica retida junto às partículas, em pontos isolados.

Nos modelos investigados percebe-se certa diferenciação entre as amostras. As curvas ‘solo-fibra – secagem’ descrevem redução da permeabilidade relativa ao ar já a partir do grau de saturação de 40% e com taxa de variação bem superior às demais amostras, o que demonstra afinidade muito maior com a água que tanto favorece o fluxo de água quanto dificulta a passagem de ar. No entanto, as interseções entre as permeabilidades relativas ao ar e à água são muito próximas para todas as amostras: por volta de 93% de saturação para ‘solo-fibra – secagem’; 95% para ‘solo puro – secagem’; 97% para ‘solo-fibra – umedecimento’; e 98% para ‘solo puro – umedecimento’. Isso indica que apesar da amostra ‘solo-fibra – secagem’ possuir uma variação maior ao longo dos graus de saturação intermediários, o comportamento das quatro situações estudadas se torna bastante similar nas proximidades da saturação.

De qualquer forma, quanto maior a taxa de variação das curvas de K_{rar} , maior a afinidade da amostra com água, o que prejudica a permeabilidade ao ar em condições não saturadas (e vice-versa). Os resultados são coerentes com as curvas de condutividade hidráulica (à água) não saturada obtidas (Figura 32), com a mesma ordem de apresentação das curvas já comentada anteriormente. Por outro lado, comparando as permeabilidades relativas (Figura 33) tem-se que a adição de fibras proporciona maior percolação de água ao longo da trajetória de secagem, enquanto favorece o fluxo de ar no umedecimento – em relação ao solo natural. O solo puro apresenta a mesma tendência de maior retenção de água no ciclo de secagem (do que no de umedecimento), mas o acréscimo de fibras potencializou essa característica.

Durante o umedecimento, o fluxo de ar consegue se manter de forma contínua até maiores graus de saturação e a permeabilidade relativa ao ar sofre quedas mais bruscas apenas nas proximidades da saturação, quando comparado com a trajetória de secagem. Vale salientar, entretanto, que no umedecimento o incremento de fibras proporcionou maior permeabilidade relativa ao ar apenas para $60\% < S < 95\%$: para valores menores o ar flui igualmente por ambas, e para maiores, a mistura com fibra mantém uma maior permeabilidade relativa à água.

O modelo de van Genuchten (1980) trouxe uma estimativa do comportamento não saturado do ‘solo puro’ e mistura ‘solo-fibra’ quanto ao fluxo de água e ar, porém, é necessário dar continuidade aos estudos para validar as estimativas teóricas a partir de investigações empíricas e comprovar as aplicações práticas da mistura. Esse tipo de avaliação é importante

para a definição do grau de umidade que deve ser mantida camada de cobertura de forma que reduza ao máximo a infiltração de águas das chuvas, para que não aumente o volume de lixiviado gerado, enquanto impede a saída de gases internos produzidos na decomposição da matéria orgânica. Vale salientar, ainda, que outros gases podem apresentar comportamento diverso ao constatado para o ar, em razão da menor ou maior afinidade química e biológica que pode apresentar com o solo e/ou com as fibras de coco.

4.4 CONDUTIVIDADE AO AR

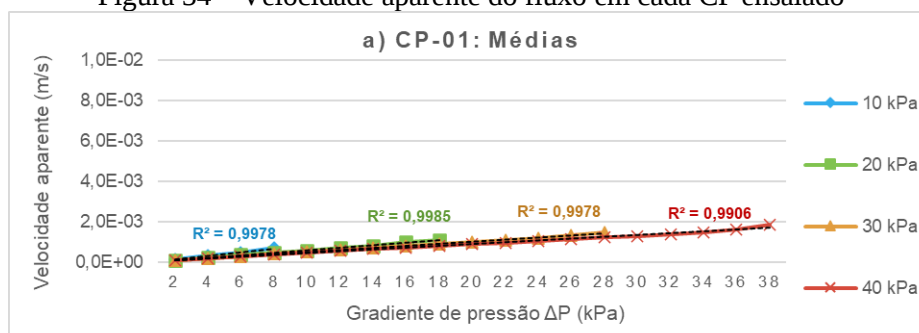
Os ensaios de condutividade ao ar foram realizados verificando inicialmente a (i) validação da Lei de Darcy, e posteriormente analisando a permeabilidade em função (ii) da pressão de confinamento, e (iii) dos ciclos secagem-molhagem.

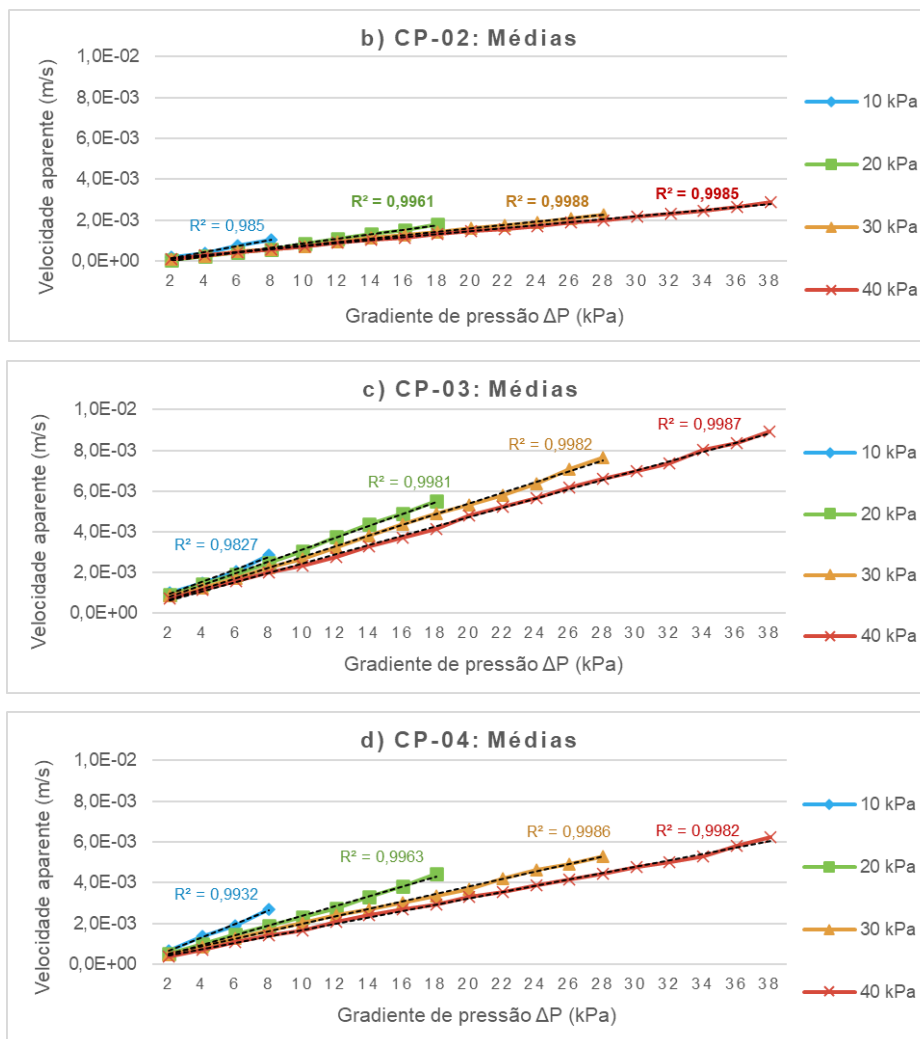
4.4.1 Validação da Lei de Darcy

A Lei de Darcy foi validada pela conferência da relação entre a velocidade aparente de fluxo (v) e o gradiente de pressão (ΔP) aplicado em cada caso. Em todos os ensaios realizados constatou-se proporcionalidade evidente entre os parâmetros, com correlações lineares em que $R^2 > 0,98$ em todos os casos. As correlações muito fortes encontradas comprovam que a metodologia utilizada é confiável para determinação do k_a para o solo e a mistura em questão.

A Figura 34 mostra os valores médios de velocidade do fluxo para cada gradiente aplicado ao longo dos ensaios de condutividade hidráulica ao ar realizados em cada um dos CPs (CP-01: 9 ensaios; CP-02: 4 ensaios; CP-03: 9 ensaios; CP-04: 4 ensaios), com indicação das respectivas linhas de tendência linear e coeficientes de correlação. Por considerar valores médios dos ensaios realizados, essa avaliação não leva em consideração o efeito dos ciclos secagem-molhagem.

Figura 34 – Velocidade aparente do fluxo em cada CP ensaiado





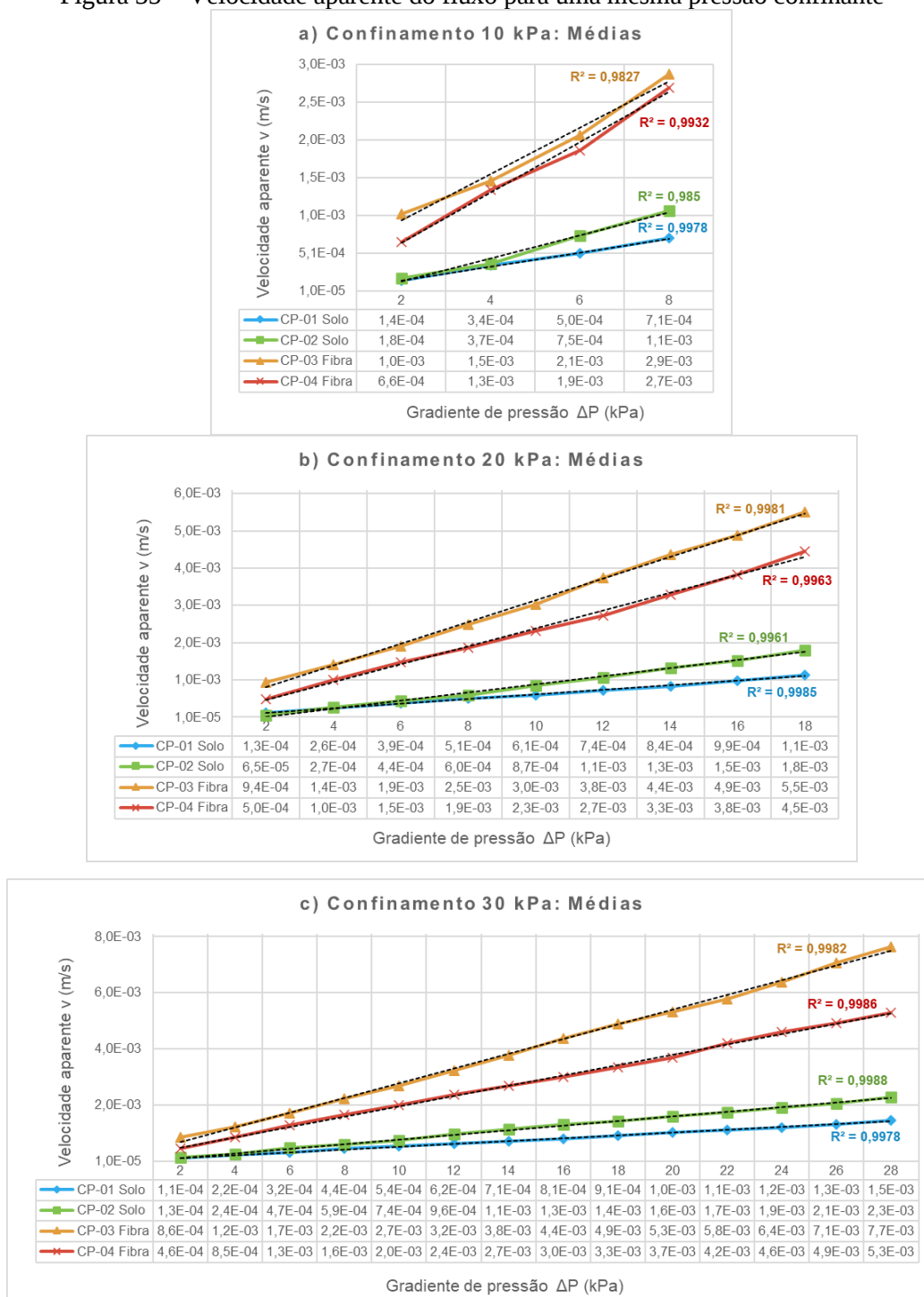
Fonte: A autora (2020)

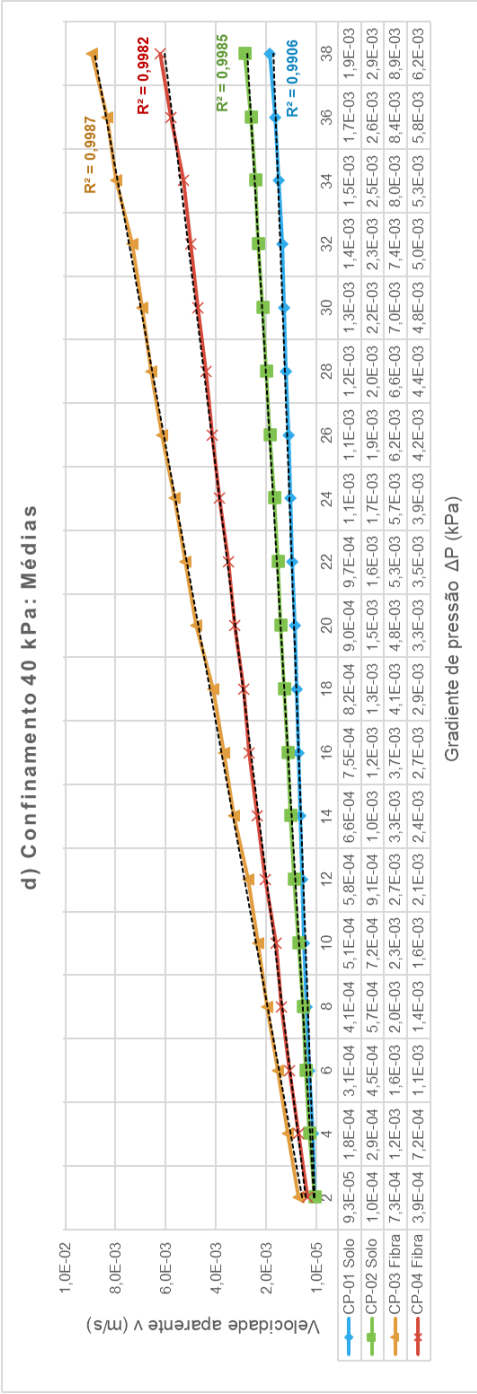
É interessante notar que para todos os CPs, independente se com ou sem fibra, a proporcionalidade entre a velocidade aparente de fluxo e o gradiente de pressão aplicada se torna mais suave com o aumento da pressão confinante, em razão da maior dificuldade para passagem do ar que o aumento do confinamento lateral promove. O declínio do ângulo de inclinação da reta de correlação linear demonstra esse aspecto, podendo mesmo indicar uma mudança na estrutura do solo com o aumento de contenção.

A Figura 35 permite comparar os valores médios das velocidades aparentes entre os CPs ensaiados, tomando como parâmetro a pressão confinante atuante em cada etapa do ensaio, também com indicação das respectivas linhas de tendência linear e coeficientes de correlação. Embora o aumento da pressão de confinamento promova, para um mesmo gradiente de pressão aplicado, uma redução da velocidade de fluxo do fluido, é possível perceber que, para um mesmo confinamento, os CPs ‘solo-fibra’ (CP-03 e CP-04) sempre apresentam velocidade aparente maior do que os CPs ‘solo puro’ (CP-01 e CP-02), atrelado a uma linha de tendência

com maior gradiente. Esses aspectos indicam que o acréscimo de fibra promove uma maior facilidade de passagem do ar nos CPs com fibra, aspecto que refletirá em sua condutividade hidráulica e será mais discutido nos próximos tópicos.

Figura 35 – Velocidade aparente do fluxo para uma mesma pressão confinante





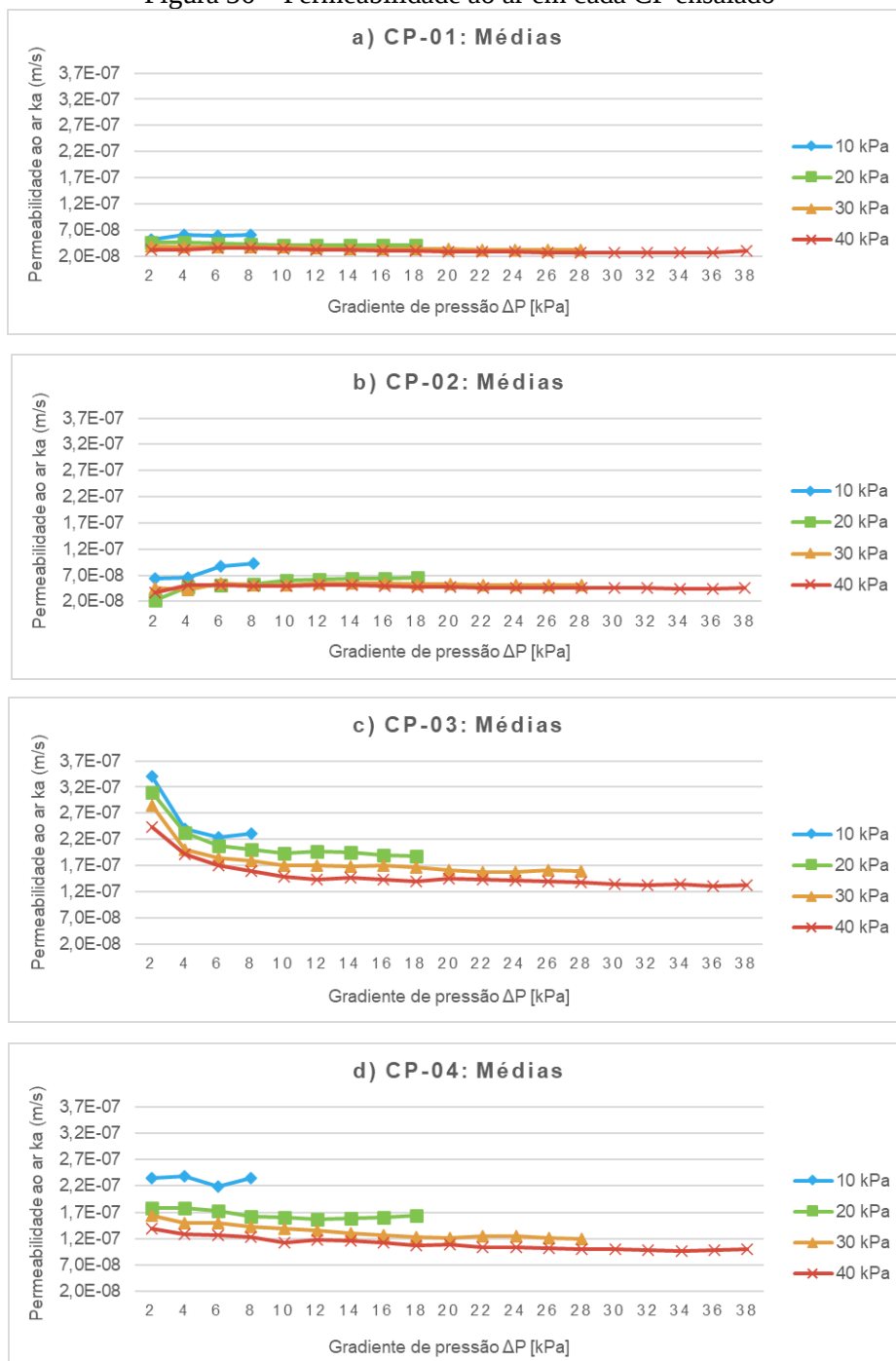
Fonte: A autora (2020)

4.4.2 Permeabilidade em função da pressão de confinamento

Ainda avaliando a média dos valores de permeabilidade obtidos para cada gradiente de pressão aplicado, a Figura 36 mostra os resultados em cada um dos CPs isoladamente, e a Figura 37 toma como parâmetro a pressão confinante atuante em cada etapa do ensaio. Essas análises também não levam em consideração o efeito dos ciclos secagem-molhagem nas amostras, mas permite avaliar o efeito do aumento da pressão de confinamento na permeabilidade ao ar em

cada CP isoladamente, além da comparação do comportamento entre eles a partir de um mesmo confinamento.

Figura 36 – Permeabilidade ao ar em cada CP ensaiado



Fonte: A autora (2020)

De modo geral, o comportamento condissse com o esperado: o aumento da pressão de confinamento, além de promover redução da velocidade aparente de fluxo (ver Figura 34), diminuiu também a condutividade hidráulica da amostra, em razão da diminuição dos espaços

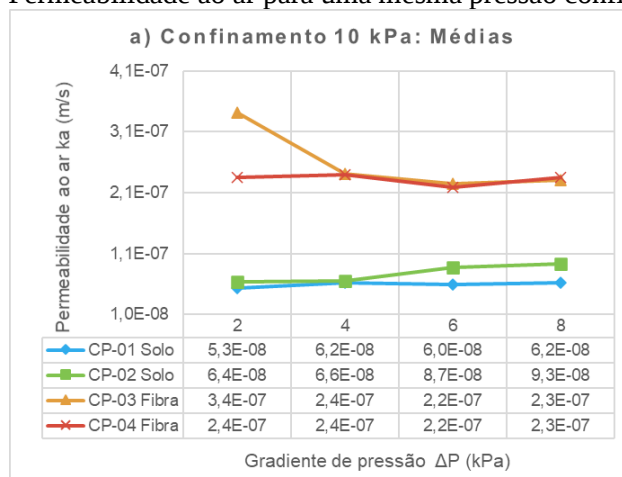
disponíveis para passagem do fluido com a compressão. É interessante notar que, com exceção do CP-03 ‘solo-fibra’ (Figura 36c), o confinamento de 10kPa resultou em valores de permeabilidade mais destoantes em relação aos demais confinamentos. Acredita-se que isso tenha se dado devido a um comportamento mais “livre” do fluido no solo que, com baixo confinamento, permitiu a percolação nas variadas direções, facilitando a criação de caminhos preferenciais de fluxo. Com o aumento da compressão lateral a partir de 20kPa, no entanto, percebe-se uma tendência similar para os demais confinamentos, apenas com redução da permeabilidade. Por essa razão, os resultados para confinamento de 10kPa não serão considerados na análise geral, apenas em casos específicos em que sejam mencionados.

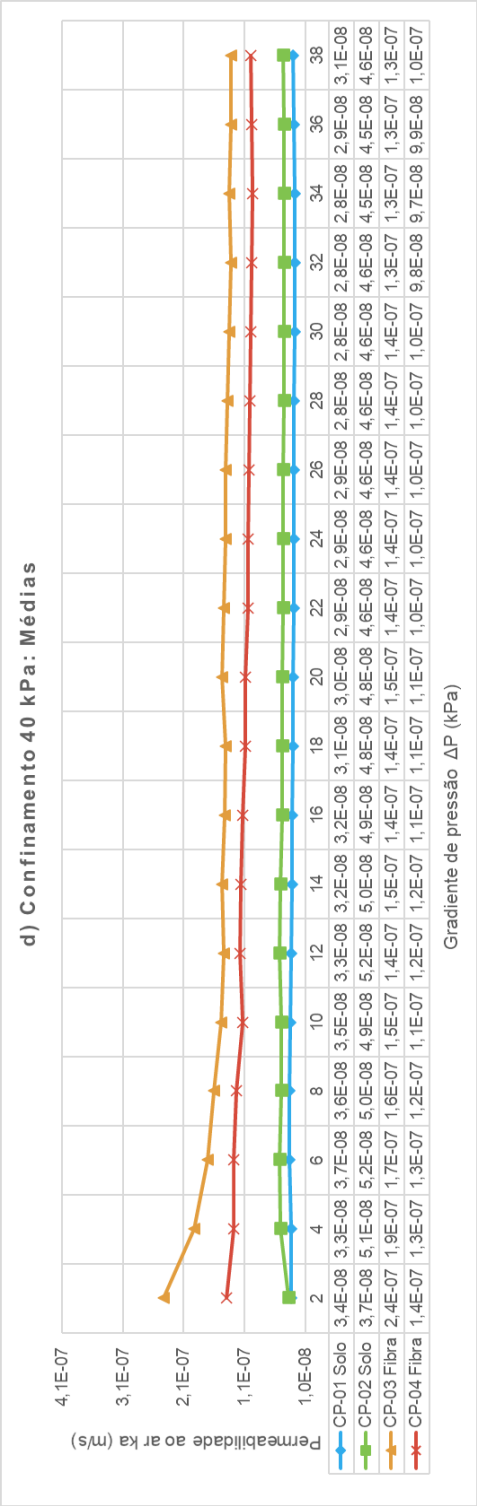
O CP-03, amostra de maior permeabilidade, apresentou comportamento similar para todas as pressões de confinamento, indicando que talvez a disposição das fibras nesse caso já tenha garantido caminhos preferenciais de percolação, sofrendo menor influência da compressão lateral aplicada.

É interessante notar que a permeabilidade média tem uma tendência de leve decréscimo com o aumento do gradiente de pressão atuante até a quase estabilização, o que pode ser visualizado também na Figura 37. Ou seja, para um mesmo CP, o gradiente de pressão aplicado tem menos influência na permeabilidade ao ar do que a pressão confinante, tendo em vista que esta pode causar alterações estruturais nos caminhos de passagem do fluido.

O CP-02 ‘solo puro’ (Figura 36b), por outro lado, tem indicativos de crescimento anteriormente ao decréscimo, especialmente perceptível na linha de 20kPa de confinamento (verde). Porém, vale salientar que o intervalo de variação percebido é muito pequeno (de 3,6 a 6,9 x 10⁻⁸ m/s no caso do confinamento de 20kPa) e sujeito a imprecisões experimentais, de forma que pode ser considerado como constante para fins de análise geral.

Figura 37 – Permeabilidade ao ar para uma mesma pressão confinante atuante





Fonte: A autora (2020)

Conforme mencionado anteriormente, a maior velocidade do fluxo percebida nos CPs ‘solo-fibra’ reflete em maiores valores de permeabilidade ao ar (em condições secas), com diferença de quase uma ordem de grandeza (10 vezes) em alguns casos. Assim, podemos afirmar que a inclusão de fibras de coco promoveu aumento da permeabilidade do solo seco ao

ar. Adicionalmente, a Tabela 11 traz os valores mínimos, máximos e médios da condutividade (k_a) e da permeabilidade intrínseca (K_a) ao ar calculados em cada etapa dos ensaios realizados.

Tabela 11 – Valores da condutividade e da permeabilidade intrínseca ao ar

Amostra	Pressão conf. (kPa)	k_a (m/s)			K_a (m ²)		
		Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
CP-01 (9)	10	$1,9 \times 10^{-8}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$5,9 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^{-14}$	$2,0 \times 10^{-13}$	$9,3 \times 10^{-14}$
	20	$1,8 \times 10^{-8}$	$9,6 \times 10^{-8}$	$4,4 \times 10^{-8}$	$2,8 \times 10^{-14}$	$1,5 \times 10^{-13}$	$6,9 \times 10^{-14}$
	30	$1,3 \times 10^{-8}$	$7,8 \times 10^{-8}$	$3,6 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-14}$	$1,2 \times 10^{-13}$	$5,6 \times 10^{-14}$
	40	$3,2 \times 10^{-9}$	$7,8 \times 10^{-8}$	$3,1 \times 10^{-8}$	$5,1 \times 10^{-15}$	$1,2 \times 10^{-13}$	$4,9 \times 10^{-14}$
CP-02 (4)	10	$3,2 \times 10^{-8}$	$1,7 \times 10^{-7}$	$7,8 \times 10^{-8}$	$5,1 \times 10^{-14}$	$2,7 \times 10^{-13}$	$1,2 \times 10^{-13}$
	20	$1,7 \times 10^{-8}$	$9,5 \times 10^{-8}$	$5,5 \times 10^{-8}$	$2,6 \times 10^{-14}$	$1,5 \times 10^{-13}$	$8,7 \times 10^{-14}$
	30	$1,3 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$5,2 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-14}$	$1,8 \times 10^{-13}$	$8,2 \times 10^{-14}$
	40	$1,9 \times 10^{-8}$	$1,7 \times 10^{-7}$	$4,8 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^{-14}$	$2,7 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-14}$
CP-03 (9)	10	$1,4 \times 10^{-7}$	$5,0 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-13}$	$7,8 \times 10^{-13}$	$4,1 \times 10^{-13}$
	20	$1,1 \times 10^{-7}$	$5,0 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-13}$	$7,8 \times 10^{-13}$	$3,4 \times 10^{-13}$
	30	$1,0 \times 10^{-7}$	$4,3 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-13}$	$6,9 \times 10^{-13}$	$2,8 \times 10^{-13}$
	40	$1,1 \times 10^{-7}$	$3,1 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-13}$	$4,9 \times 10^{-13}$	$2,4 \times 10^{-13}$
CP-04 (4)	10	$1,5 \times 10^{-7}$	$3,5 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-7}$	$2,4 \times 10^{-13}$	$5,5 \times 10^{-13}$	$3,7 \times 10^{-13}$
	20	$1,1 \times 10^{-7}$	$2,4 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-13}$	$3,8 \times 10^{-13}$	$2,6 \times 10^{-13}$
	30	$1,0 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-13}$	$3,1 \times 10^{-13}$	$2,1 \times 10^{-13}$
	40	$8,0 \times 10^{-8}$	$1,6 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-13}$	$2,5 \times 10^{-13}$	$1,8 \times 10^{-13}$

Fonte: A autora (2020)

Vale salientar que embora o estudo experimental tenha revelado que o acréscimo de fibra causou o aumento da condutividade ao ar, esses resultados dizem respeito à condição de permeabilidade máxima, ou seja, com o solo seco. Com o aumento de umidade do solo, e consequente preenchimento de vazios com água, o fluxo de ar fica comprometido e sofre diminuição, numa relação quase que inversa à variação da condutividade à água com o grau de saturação do solo. A partir do modelo de van Genuchten (1980), a estimativa do comportamento hidráulico não saturado do ‘solo puro’ e do ‘solo-fibra’ foi abordada no item 4.3.

4.4.3 Permeabilidade em função dos ciclos secagem-molhagem

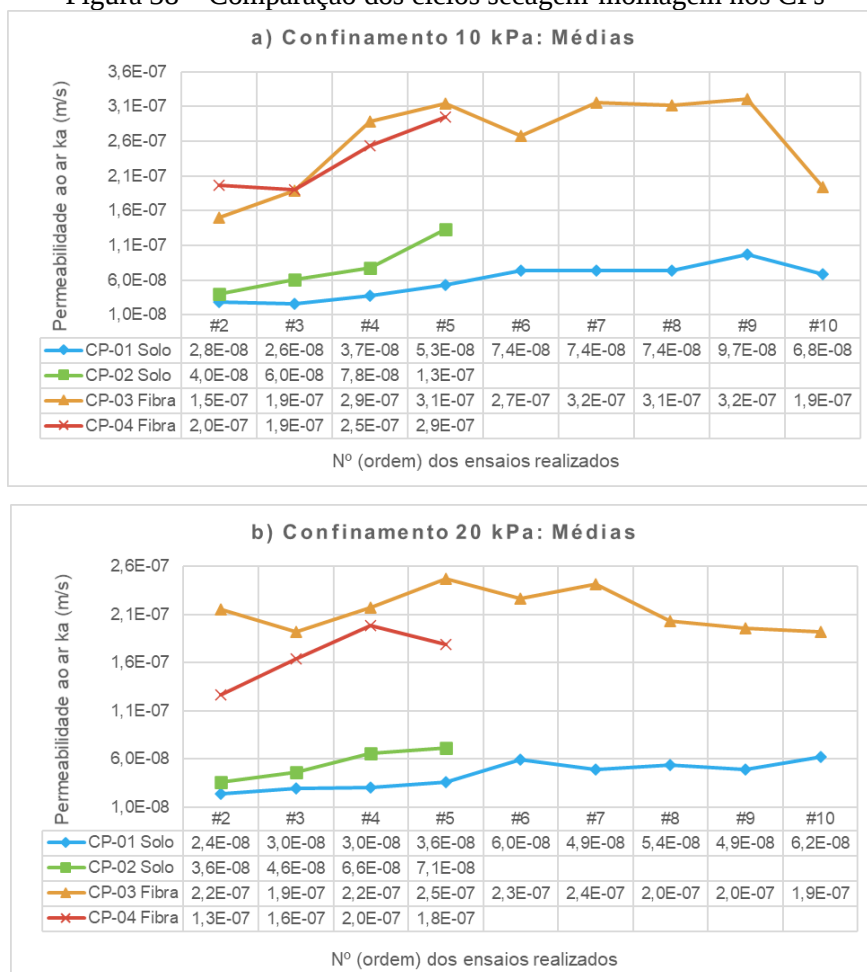
A avaliação da influência dos ciclos secagem-molhagem envolve uma comparação evolutiva do comportamento das amostras ao longo dos ensaios realizados. Tendo em vista que cada ensaio possuía etapas distintas independentes, correspondente às quatro pressões de confinamento aplicadas em cada amostra, far-se-á a análise levando em consideração essa

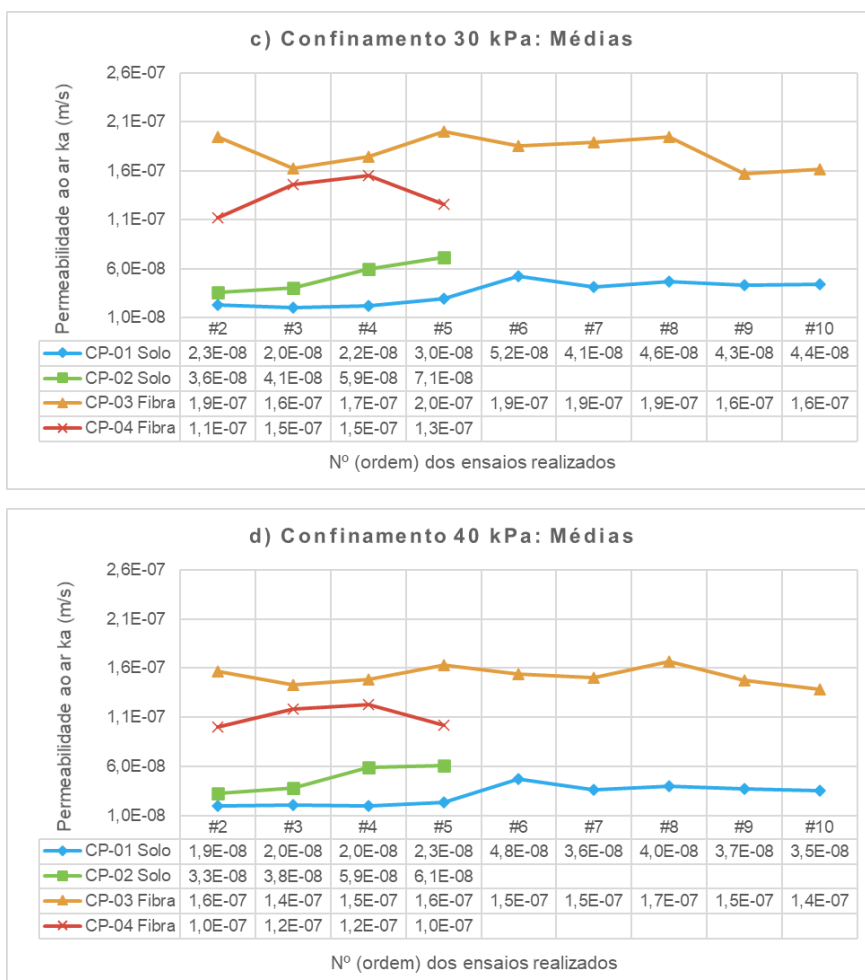
variável. Inicialmente, será feita uma explanação geral comparativa entre os diferentes CPs, seguida de avaliação da influência dos ciclos secagem-molhagem em cada CP individualmente.

4.4.3.1 Comparação entre os CPs ensaiados

Considerando que para uma mesma pressão confinante aplicada os valores de permeabilidade não sofreram muita variação, tomou-se como parâmetro as médias obtidas em cada fase de confinamento, para todos os gradientes de pressão aplicados nessa etapa. Assim, é possível estabelecer uma visão geral do comportamento de cada CP ao longo dos ciclos secagem-molhagem, permitindo, ainda, a comparação entre as amostras. A Figura 38 traz esses resultados.

Figura 38 – Comparação dos ciclos secagem-molhagem nos CPs





Fonte: A autora (2020)

Os gráficos demonstram uma leve tendência de aumento da permeabilidade do solo puro ao longo dos ensaios, mais perceptível nos primeiros confinamentos (10kPa – Figura 38a e 20kPa – Figura 38b). No entanto, a variação percebida é muito sutil em todos os casos, não indicando muita influência dos ciclos na permeabilidade ao ar. Vale ressaltar que diante do tempo necessário até a aquisição dos rotâmetros necessários para realização dos ensaios, o primeiro ciclo secagem-molhagem foi realizado sem possibilidade de aferição da velocidade de fluxo do ar, de forma que o ensaio de permeabilidade ao ar só foi realizado após a segunda secagem.

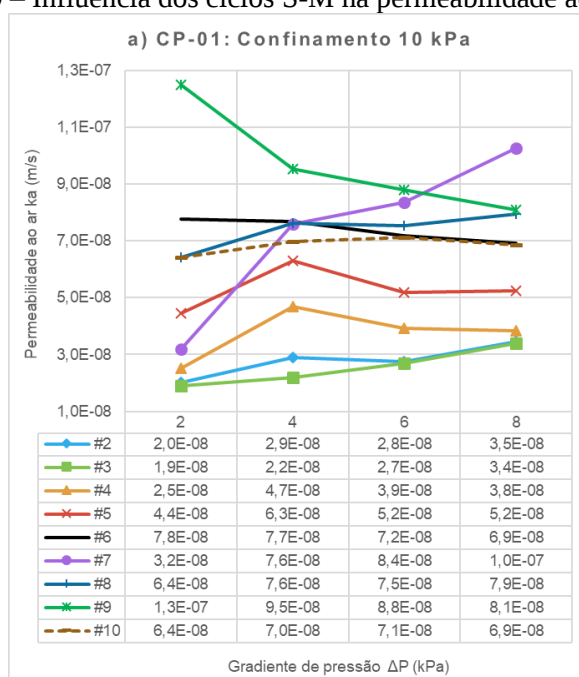
A análise por médias, por outro lado, pode esconder aspectos importantes do comportamento do solo, razão pela qual será feita explanação mais detalhada de cada CP considerando os valores calculados para cada gradiente de pressão aplicado.

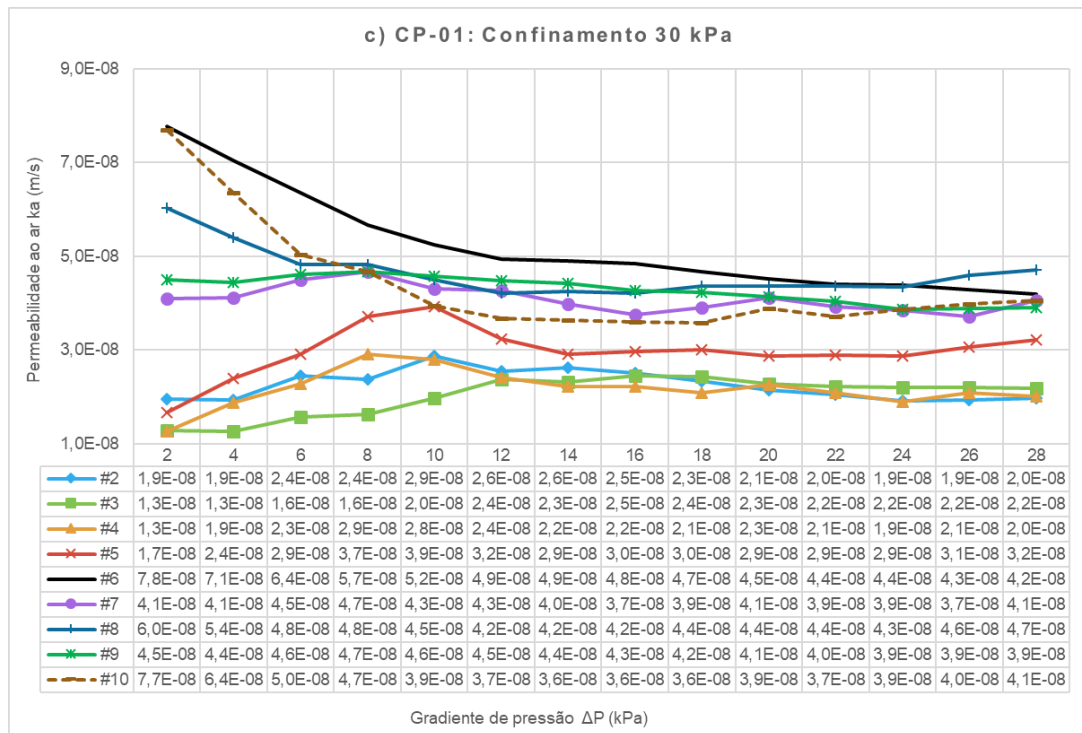
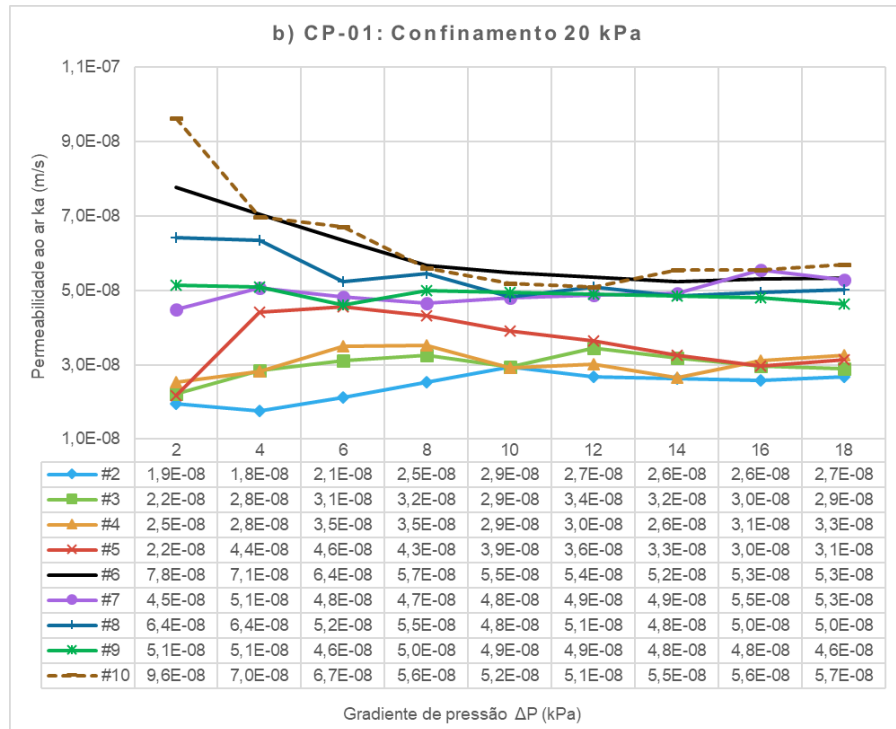
4.4.3.2 CP-01 ‘solo puro’

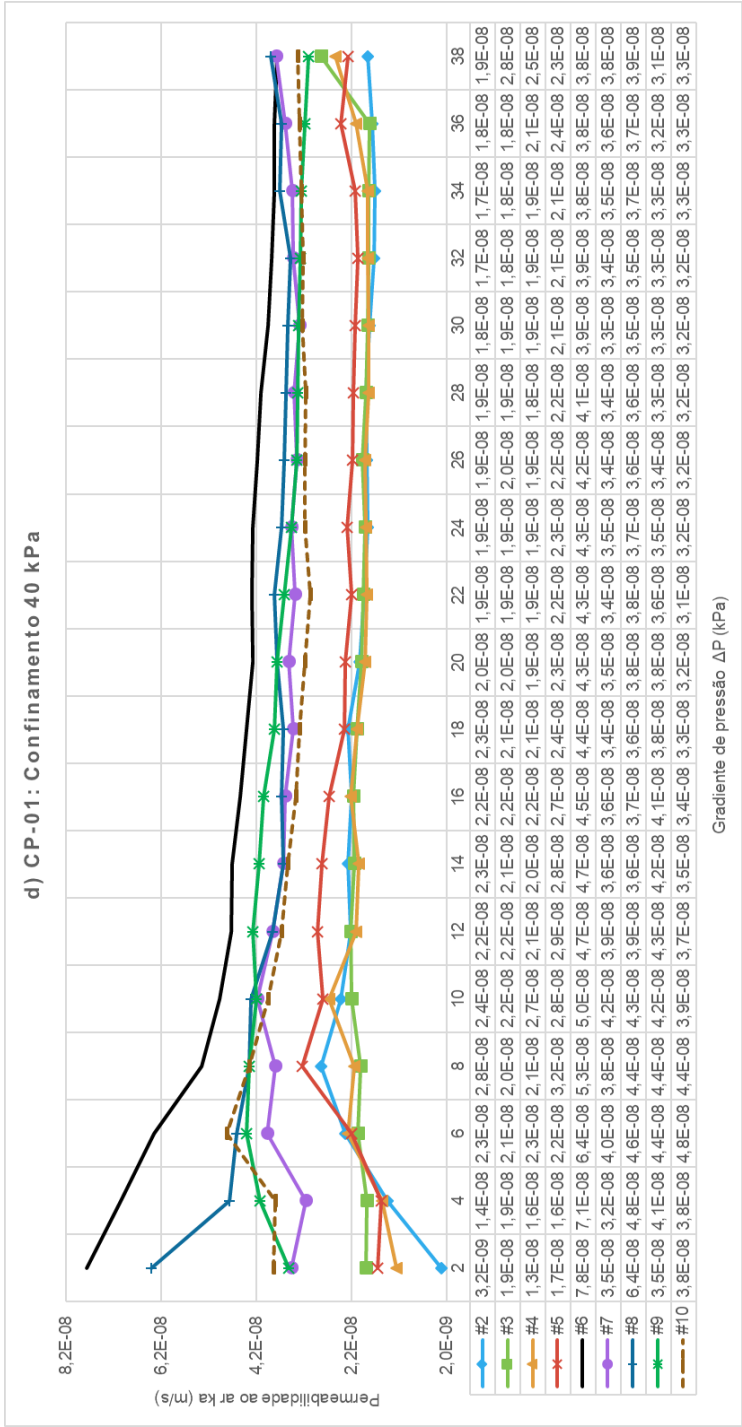
A Figura 39 traz os resultados calculados da permeabilidade ao ar do CP-01 em cada um dos ensaios realizados, numerados por ordem de execução (#2, #3, #4, etc.), detalhando cada pressão confinante empregada. É possível verificar que embora não haja uma relação evidente entre a ordem do ensaio (nº de ciclos secagem-molhagem que a amostra foi submetida) e condutividade hidráulica ao ar, há uma clara tendência de localização dos ensaios #2, #3, #4 e #5 na extremidade inferior dos gráficos, para todos os confinamentos laterais, inclusive. A partir do ensaio #6, cuja permeabilidade atingiu os máximos valores nos maiores confinamentos (30kPa – Figura 39c, e 40kPa – Figura 39d), os resultados se mantiveram na extremidade mais superior, sugerindo que a passagem pelos ciclos tem efeito na permeabilidade ao ar, mas de uma forma não diretamente proporcional à quantidade.

Cabe destacar, ainda, que as variações percebidas entre os ensaios não são muito significativas, especialmente para maiores gradientes de pressão aplicados, situação em que o solo apresenta uma tendência à estabilidade da permeabilidade em cada uma das etapas do ensaio. Ou seja, pode-se supor que a permeabilidade permaneça relativamente constante até certo tempo (“envelhecimento” equivalente a 5 ciclos secagem-molhagem, nesse caso), a partir do qual sofre um leve aumento, mantendo-se relativamente constante mais uma vez até o período considerado neste estudo (“envelhecimento” equivalente a 10 ciclos secagem-molhagem).

Figura 39 – Influência dos ciclos S-M na permeabilidade ao ar: CP-01







Fonte: A autora (2020)

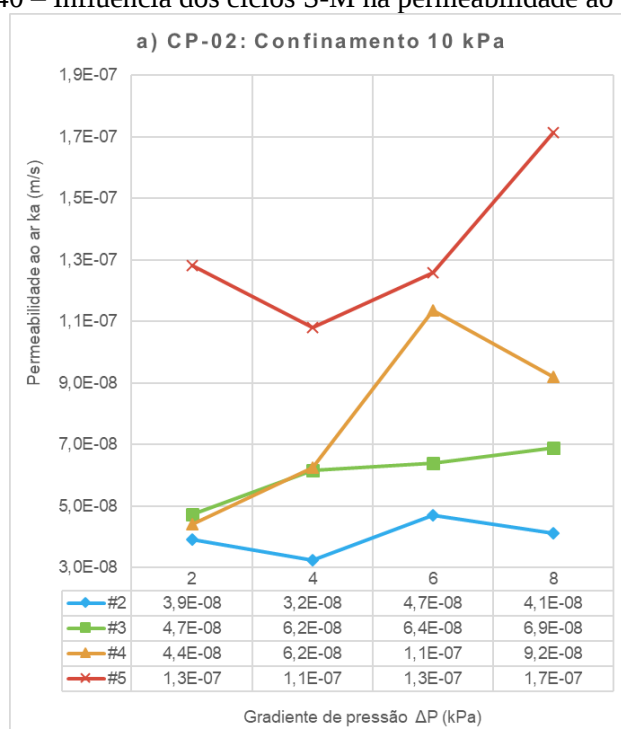
4.4.3.3 CP-02 ‘solo puro’

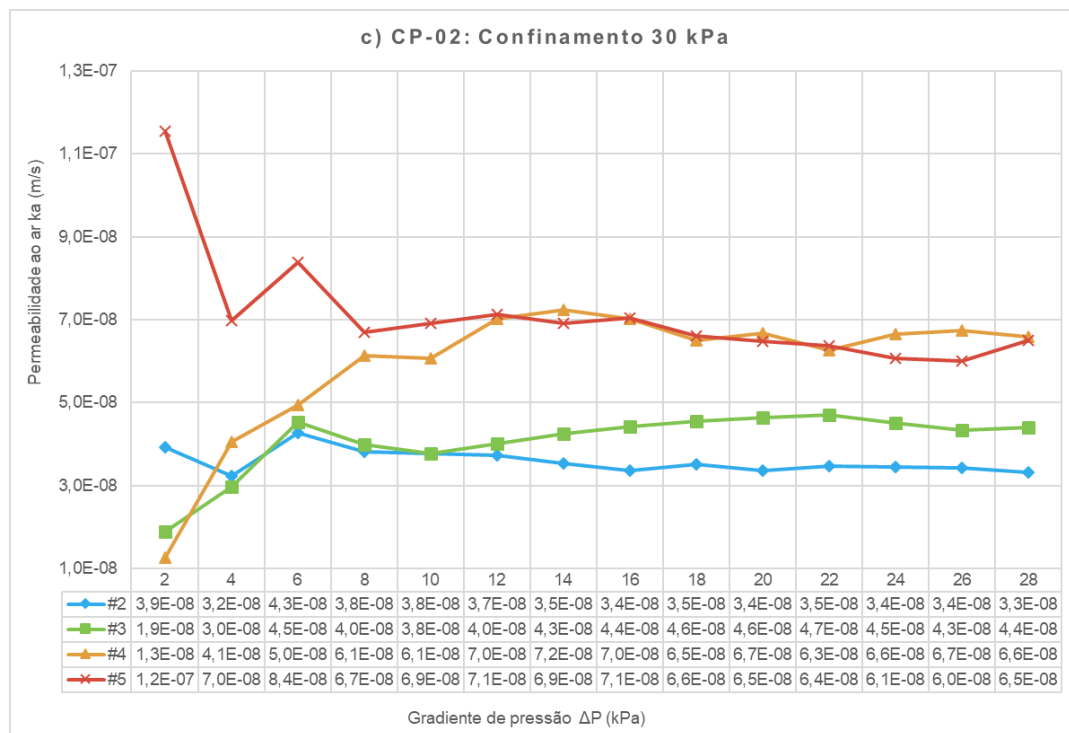
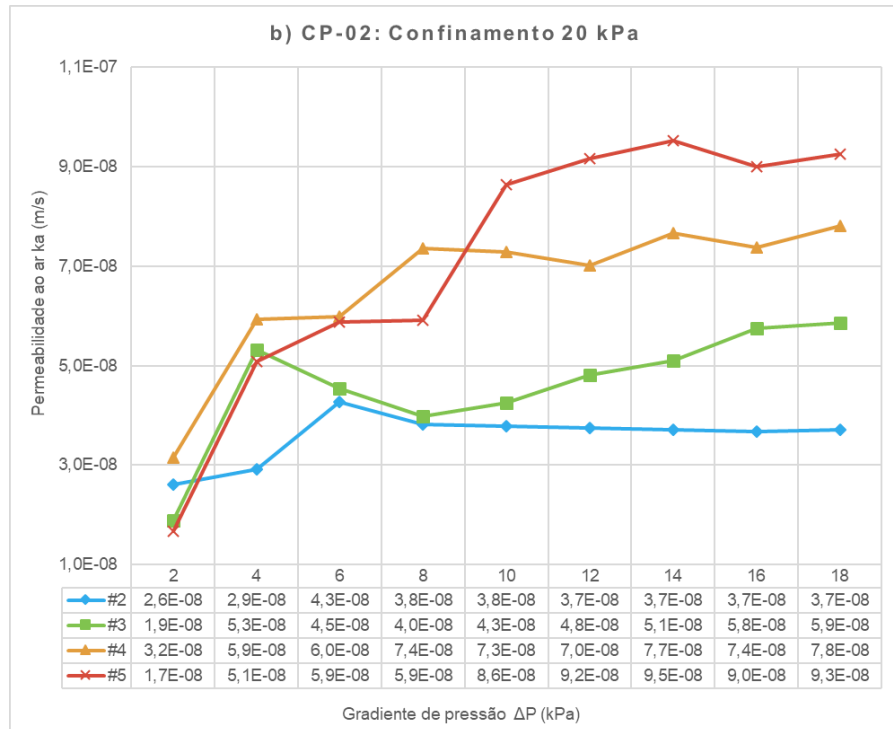
A Figura 40 mostra os valores da permeabilidade ao ar do CP-02 em cada um dos ensaios realizados, também numerados por ordem de execução, detalhando cada pressão confinante empregada. Este CP apresenta uma relação mais evidente entre a ordem do ensaio e a permeabilidade ao ar, revelando uma tendência de aumento de permeabilidade com o nº de

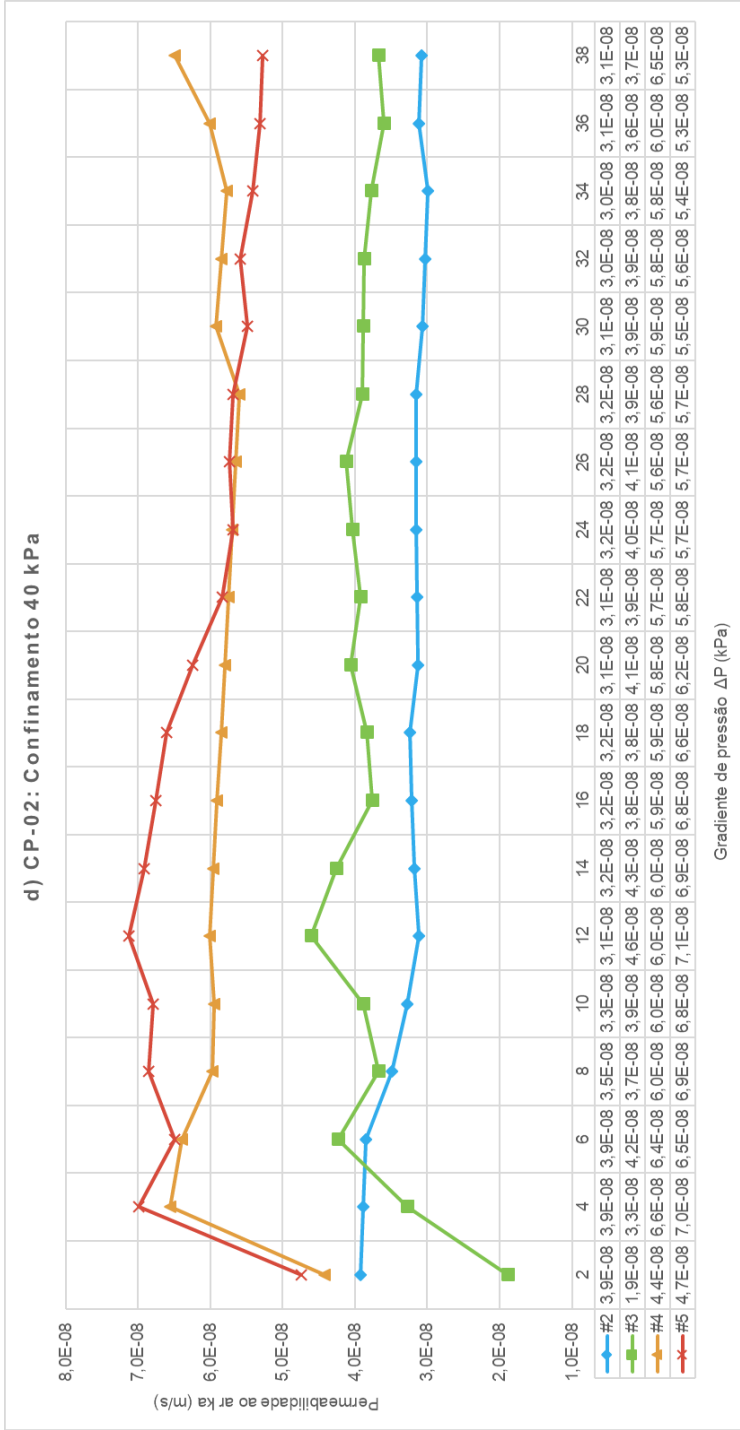
ciclos secagem-molhagem. No entanto, as variações percebidas entre os ensaios também não são muito significativas para esse CP.

Nesse caso, há uma separação mais evidente entre os ensaios #3 e #4 sugerindo que o tempo de “envelhecimento” em que houve a divisão entre patamares de permeabilidade relativamente constantes foi equivalente a 3 ciclos secagem-molhagem, dentro de um período total considerado de 5 ciclos. Diante do observado no CP-01, é possível que houvesse ainda o estabelecimento de novo intervalo de estabilidade com a execução de ciclos adicionais, situação não constatada neste trabalho.

Figura 40 – Influência dos ciclos S-M na permeabilidade ao ar: CP-02







Fonte: A autora (2020)

4.4.3.4 CP-03 ‘solo-fibra’

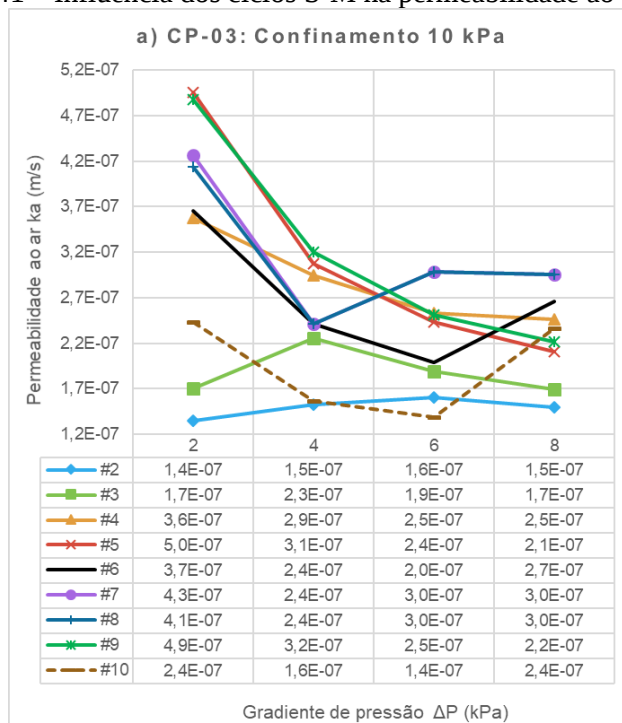
Os valores da permeabilidade ao ar do CP-03 em cada um dos ensaios realizados são indicados na Figura 41, também numerados por ordem de execução, a partir de cada confinamento realizado. Não é possível verificar qualquer relação entre a permeabilidade ao ar e o nº de ciclos secagem-molhagem a que foi submetido, revelando um comportamento muito

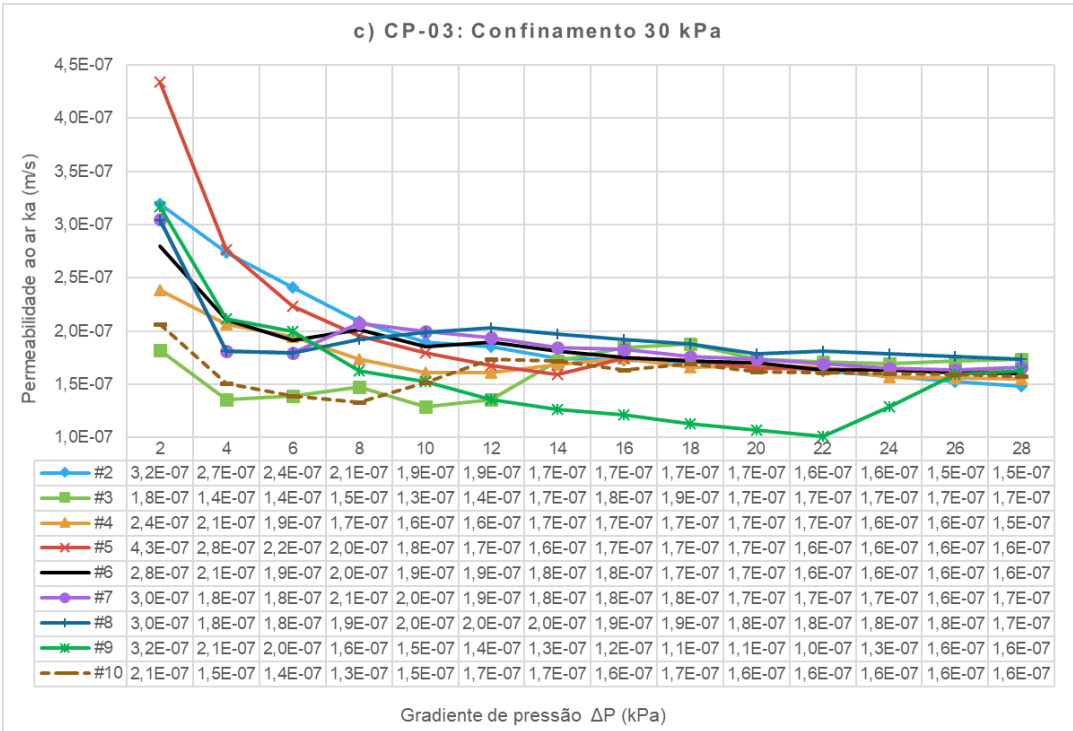
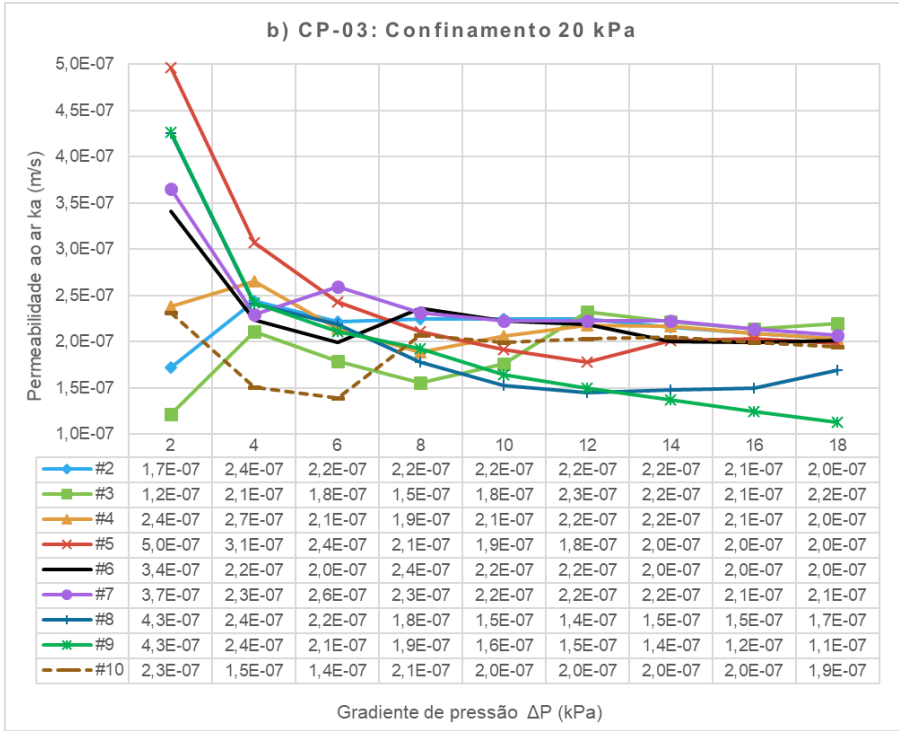
mais arbitrário do que as amostras de solo puro, mas com tendência à constância com o aumento do gradiente de pressão aplicado, mais evidente nas maiores pressões confinantes (30kPa – Figura 41c, e 40kPa – Figura 41d).

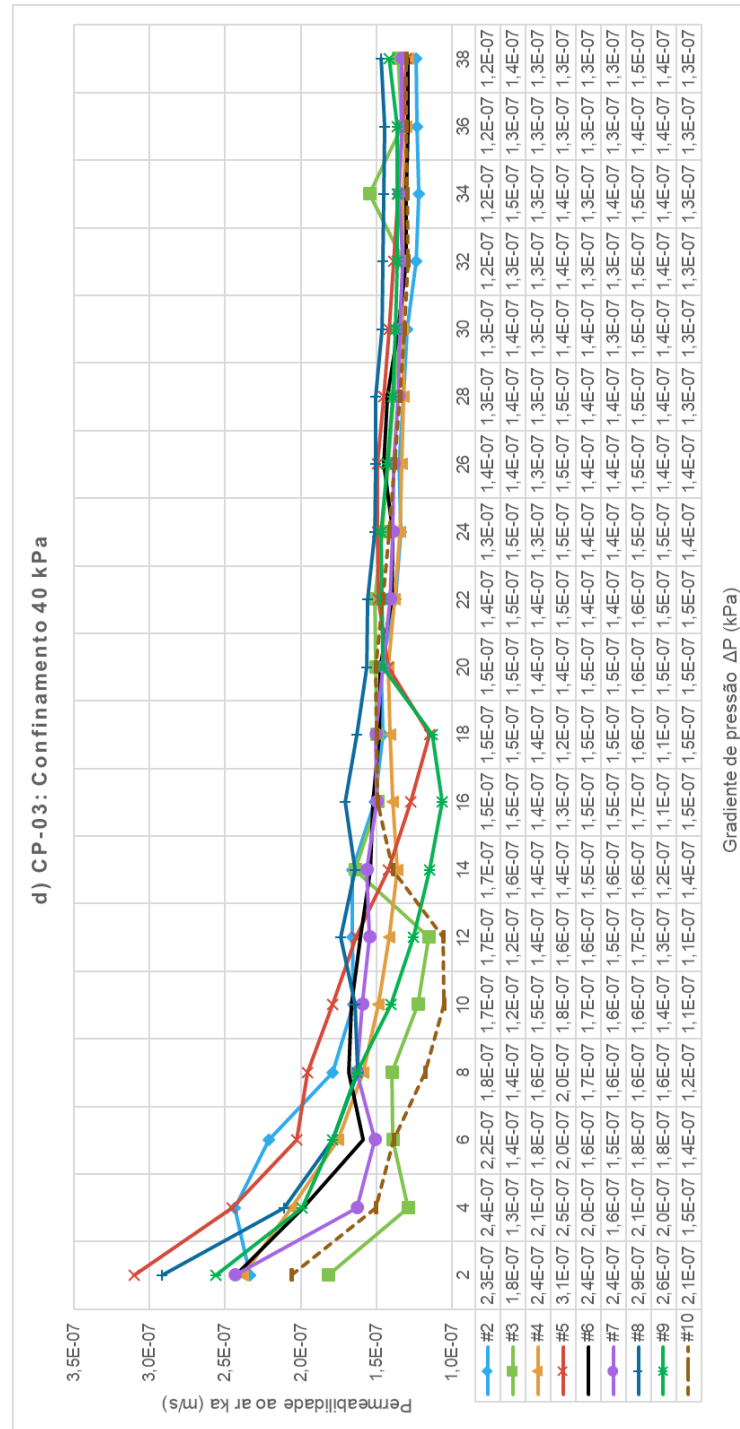
As variações percebidas entre os ensaios são ainda menos expressivas quando se considera mudanças dentro da mesma ordem de grandeza, resultando em faixas pequenas de intervalo de permeabilidade relativamente estável, com pouca variação entre cada ensaio realizado. Não foi percebida influência dos ciclos secagem-molhagem nessa amostra, o que indica uma maior durabilidade de suas propriedades iniciais do que as amostras de solo puro (CP-01 e CP-02).

Contudo, muitos ensaios dessa amostra apresentaram grande variação de condutividade hidráulica, com valores muito elevados para os menores gradientes de pressão, e reduzindo com o aumento do Δp aplicado, até uma relativa estabilidade (especialmente nos confinamentos de 30kPa e 40kPa – Figura 41c e 34d, respectivamente). Os altos valores encontrados para os gradientes iniciais podem ser provenientes de dificuldades experimentais de aferição do equipamento, e por isso não serão considerados na análise.

Figura 41 – Influência dos ciclos S-M na permeabilidade ao ar: CP-03







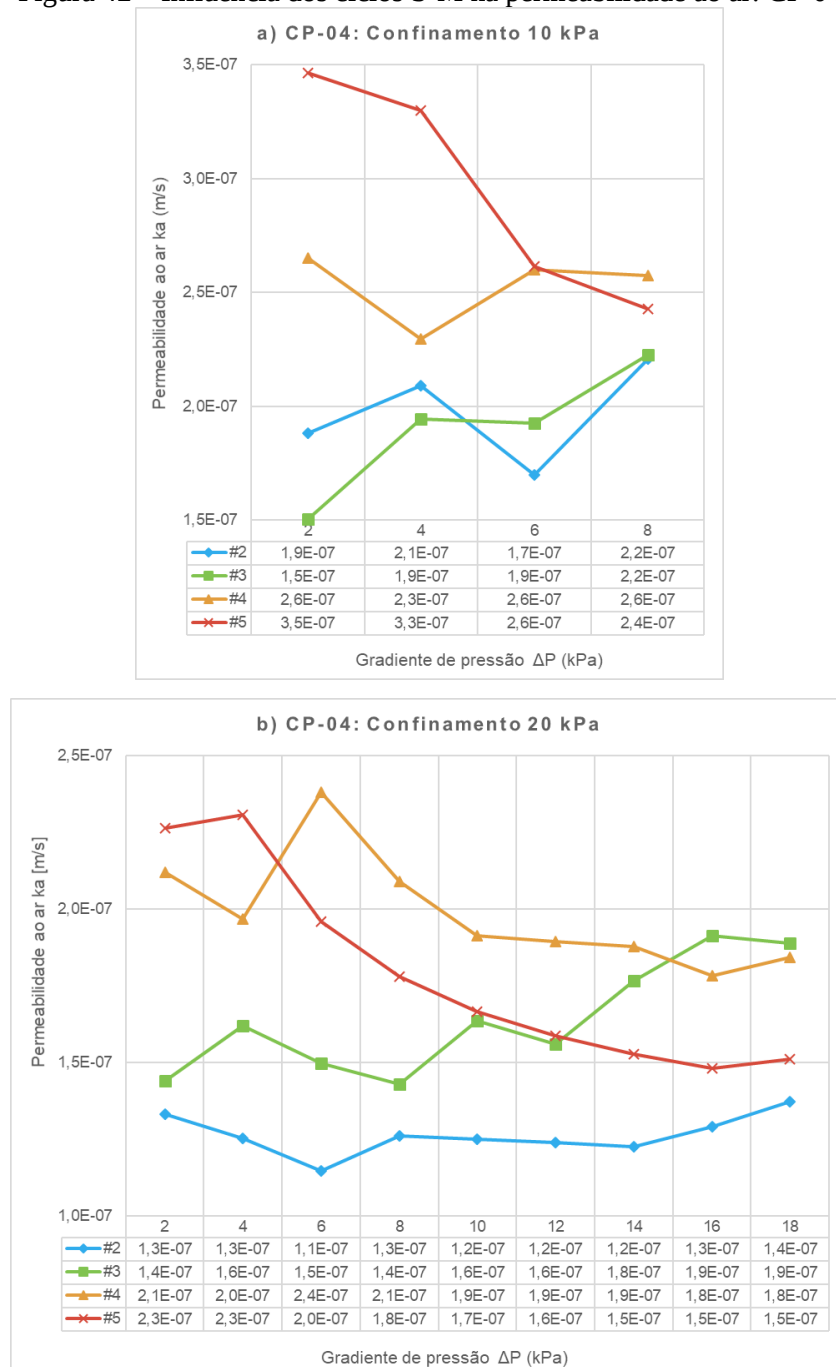
Fonte: A autora (2020)

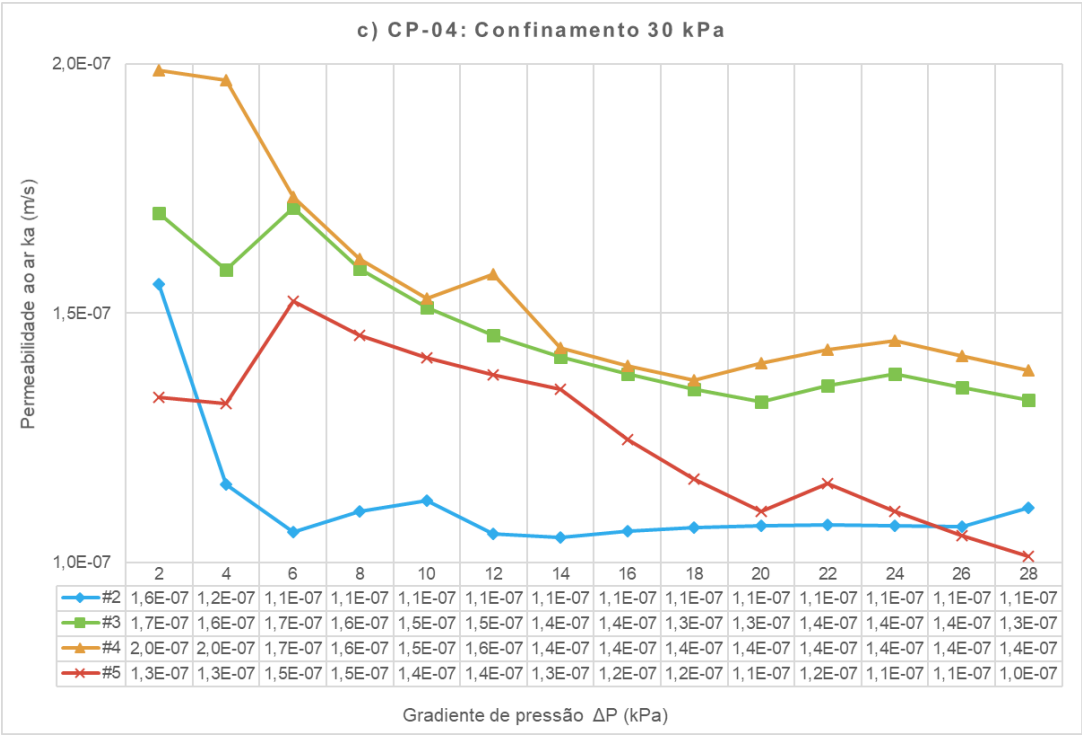
4.4.3.5 CP-04 ‘solo-fibra’

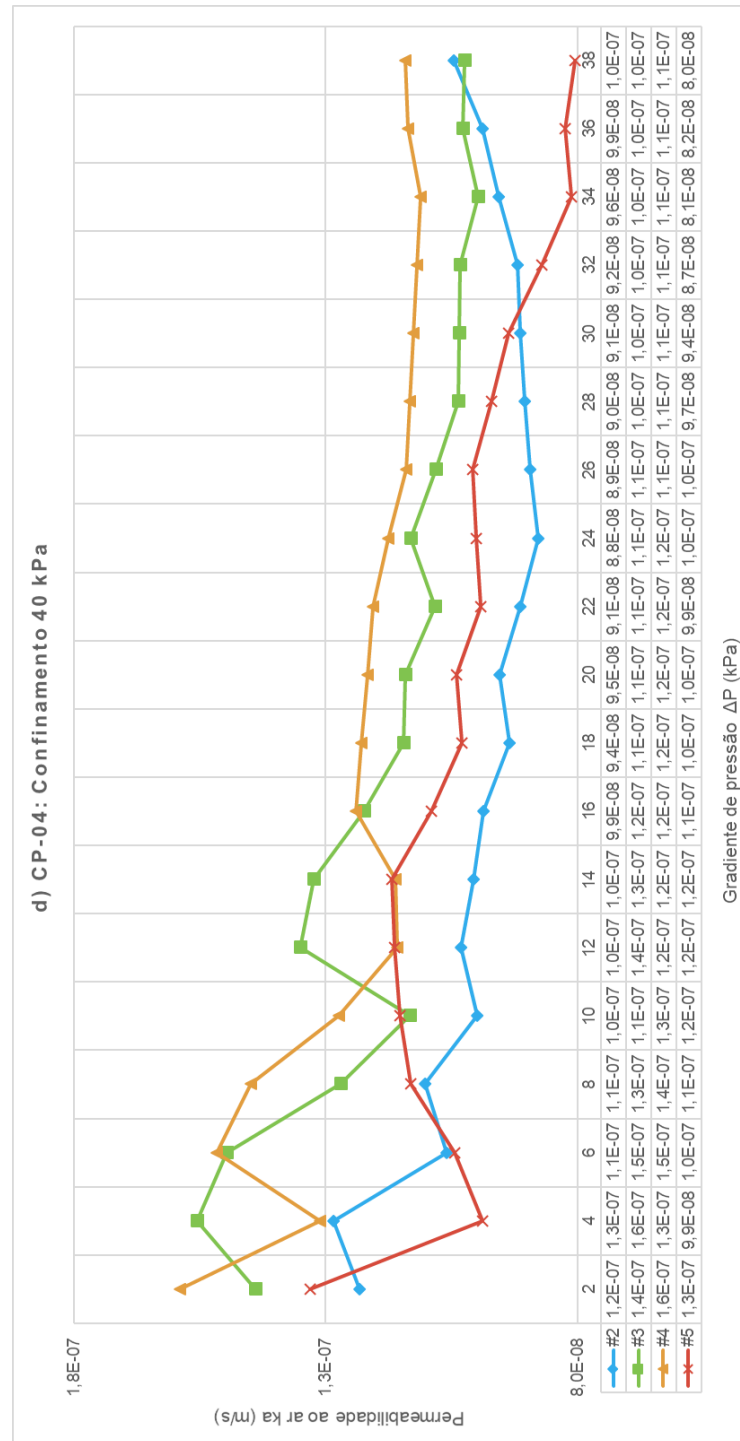
Os resultados dos ensaios de permeabilidade ao ar realizados no CP-04 são ordenados na Figura 42, também isolando as etapas de confinamento aplicadas. Assim como no CP-03, não é possível relacionar a condutividade hidráulica ao ar com o nº de ciclos secagem-molhagem executados, também com tendência à faixa de estabilidade com o aumento do

gradiente de pressão aplicado – mais visível nos gráficos de maiores pressões confinantes (30kPa e 40kPa – Figura 42c e 42d, respectivamente). As variações entre os ensaios também são reduzidas, com estabelecimento de pequenas faixas de intervalo de permeabilidade relativamente estável.

Figura 42 – Influência dos ciclos S-M na permeabilidade ao ar: CP-04







Fonte: A autora (2020)

4.4.3.6 Comparação dos resultados

Atrelando os resultados dos CPs investigados, percebe-se uma maior influência dos ciclos secagem-molhagem nas amostras de solo puro (CP-01 e CP-02), os quais são responsáveis por gradativo aumento da permeabilidade ao ar, até certo ponto de relativa estabilidade. Já nos CPs com adição de fibra (CP-03 e CP-04) essa relação não foi percebida,

sugerindo que a adição de fibra proporciona maior estabilidade da permeabilidade, promovendo mais previsibilidade do comportamento ao longo do tempo, ao menos nesse aspecto. A resistência à fissuração (visual) que a adição de fibras promoveu corrobora esse aspecto (ver item 4.1).

Vale salientar, no entanto, que não obstante os CPs com adição de fibra tenham apresentado maiores valores de permeabilidade ao ar para uma mesma pressão confinante, esses resultados dizem respeito à situação de solo seco, sem presença de outros fluidos que não o ar. A estimativa de comportamento não saturado (água-ar) foi abordado no item 4.3.

Os efeitos dos ciclos de molhagem-secagem no solo têm sido investigados já há bastante tempo, mas comumente como avaliação de fissuração, resistência ou mesmo condutividade à água. Com relação ao ar, nenhuma pesquisa que abordasse essa problemática foi encontrada.

4.5 CONDUTIVIDADE À ÁGUA

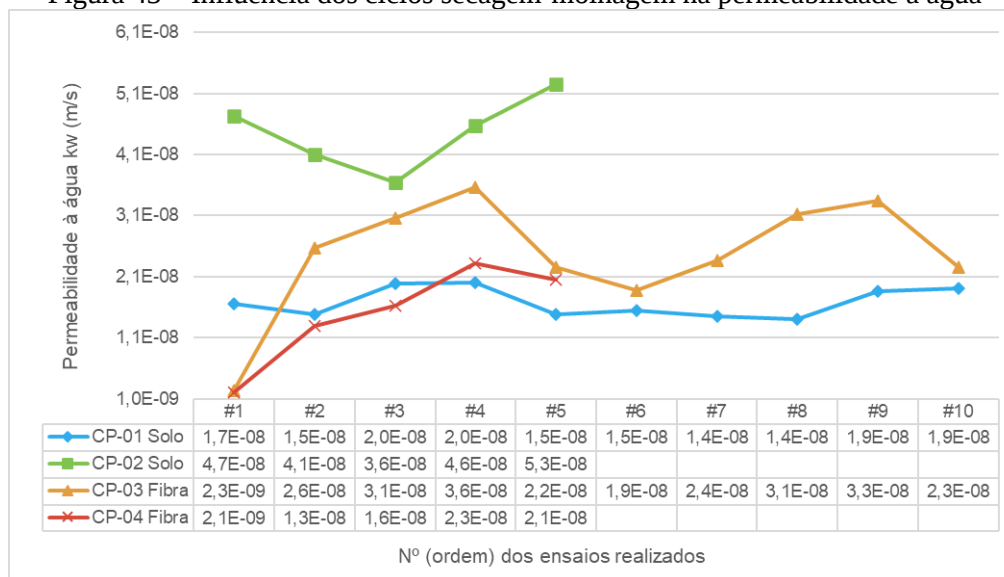
Os ensaios de condutividade à água foram realizados analisando a (i) permeabilidade em função dos ciclos secagem-molhagem. Comparou-se também os resultados obtidos entre os CPs ensaiados (ii), inclusive em relação à condutividade ao ar.

4.5.1 Permeabilidade em função dos ciclos secagem-molhagem

Os resultados obtidos para a permeabilidade (saturada) à água (k_w) são mostrados na Figura 43, por ordem de realização dos ensaios. É possível perceber que não houve grande variação de valores para cada CP com a passagem pelos ciclos S-M. Apenas o CP-04 demonstra uma leve tendência de crescimento com o tempo, mas a baixa variação observada entre os ensaios dificulta uma análise mais precisa. Os demais CPs apresentam variações para mais e para menos, sem padrão definido ou indicação de tendência à alteração da permeabilidade com o método de envelhecimento utilizado.

Vale salientar que o ensaio saturado #1 dos CP-03 e CP-04 foi realizado sem execução de secagem prévia, para verificar se a primeira secagem já poderia ocasionar alguma redução da permeabilidade. Conforme pode ser verificado, o primeiro processo de secagem já foi responsável pelo aumento da permeabilidade à água em aproximadamente 1 ordem de grandeza (10 vezes). Esses valores encontrados são condizentes com o trabalho de Oliveira Jr. (2018) para o mesmo solo e percentual de fibras (ver Tabela 12), considerando que os ensaios do autor foram realizados sem realização de secagem prévia.

Figura 43 – Influência dos ciclos secagem-molhagem na permeabilidade à água



Fonte: A autora (2020)

Tabela 12 – Condutividade hidráulica saturada sem realização de secagem prévia (mesmo solo)

Teor de fibra	k_w (m/s)
Solo puro, 0%	$1,01 \times 10^{-9}$
Solo-fibra, 1%	$1,43 \times 10^{-9}$

Fonte: Oliveira Jr. (2018)

Tendo em vista a redução percebida nos CPs ‘solo-fibra’ e os valores medidos por Oliveira Jr. (2018), supõe-se que uma única secagem provocou o mesmo efeito de redução da permeabilidade nos CPs ‘solo puro’. Mesmo com a tentativa experimental de garantir uma secagem bem gradativa, no intuito de evitar a formação de fissuras e caminhos preferenciais de fluxo, é possível que a secagem em estufa a 105°C, muito superior a temperaturas habituais em campo, crie microfissuras irreversíveis responsáveis por esse aumento significativo de condutividade hidráulica saturada já no primeiro ciclo, conforme crítica já mencionada por Bamgbopa (2016). Interessante notar que, por outro lado, a sequência das sucessivas secagens realizadas parece não ter tido efeito nos percursos já criados na 1ª secagem, tanto para o ‘solo puro’, tanto para a mistura ‘solo-fibra’.

Os achados são coerentes com investigações realizadas com solo argiloso compactado em laboratório (ALBRECHT; BENSON, 2001; CHEN; NG, 2013) e em campo (ALBRIGHT *et al.*, 2004; ALBRIGHT *et al.*, 2006; ANDERSON; HUBBARD; KNEALE, 1982; MELCHIOR *et al.*, 2010). Não foi encontrada nenhuma bibliografia cuja influência dos ciclos S-M envolvesse também o incremento de fibra de coco em solo argiloso compactado.

4.5.2 Comparação entre os CPs ensaiados

As amostras de ‘solo puro’ e ‘solo-fibra’ apresentaram valores de permeabilidade saturada à água similares, dentro da mesma ordem de grandeza, comprovando o atestado por Oliveira Jr. (2018) para percentuais de acréscimo de 0,5 e 1% de fibra de e por Miller e Rifai (2004) para 1% de fibras de polipropileno. Desconsiderando os valores do ensaio #1 do CP-03 e CP-04, em razão da ausência de secagem prévia, é possível apresentar na Tabela 13 os valores mínimos, máximos e médios da condutividade hidráulica saturada (k_w) e da permeabilidade intrínseca à água (K_w) obtidos para cada amostra.

Comparando os valores da Tabela 13 com os da Tabela 11 nota-se que, conforme esperado, tanto a condutividade quanto a permeabilidade intrínseca do solo ao ar é superior em relação ao comportamento em relação à água. Para a permeabilidade intrínseca, o ‘solo puro’ apresenta discrepância de 1 ordem de grandeza entre ar e água, enquanto o ‘solo-fibra’, com o aumento de permeabilidade ao ar propiciado pelas fibras, potencializa essa diferença e chega a até 2 ordens de grandeza.

Tabela 13 – Valores da condutividade e da permeabilidade intrínseca à água

Amostra	k_w (m/s)			K_w (m ²)		
	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
CP-01 (10 ciclos)	$1,4 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-8}$	$1,7 \times 10^{-8}$	$1,3 \times 10^{-15}$	$1,8 \times 10^{-15}$	$1,5 \times 10^{-15}$
CP-02 (5 ciclos)	$3,6 \times 10^{-8}$	$5,3 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^{-8}$	$3,3 \times 10^{-15}$	$4,8 \times 10^{-15}$	$4,1 \times 10^{-15}$
CP-03 (9 ciclos)	$1,9 \times 10^{-8}$	$3,6 \times 10^{-8}$	$2,7 \times 10^{-8}$	$1,7 \times 10^{-15}$	$3,3 \times 10^{-15}$	$2,5 \times 10^{-15}$
CP-04 (4 ciclos)	$1,3 \times 10^{-8}$	$2,3 \times 10^{-8}$	$1,8 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-15}$	$2,1 \times 10^{-8}$	$1,7 \times 10^{-15}$

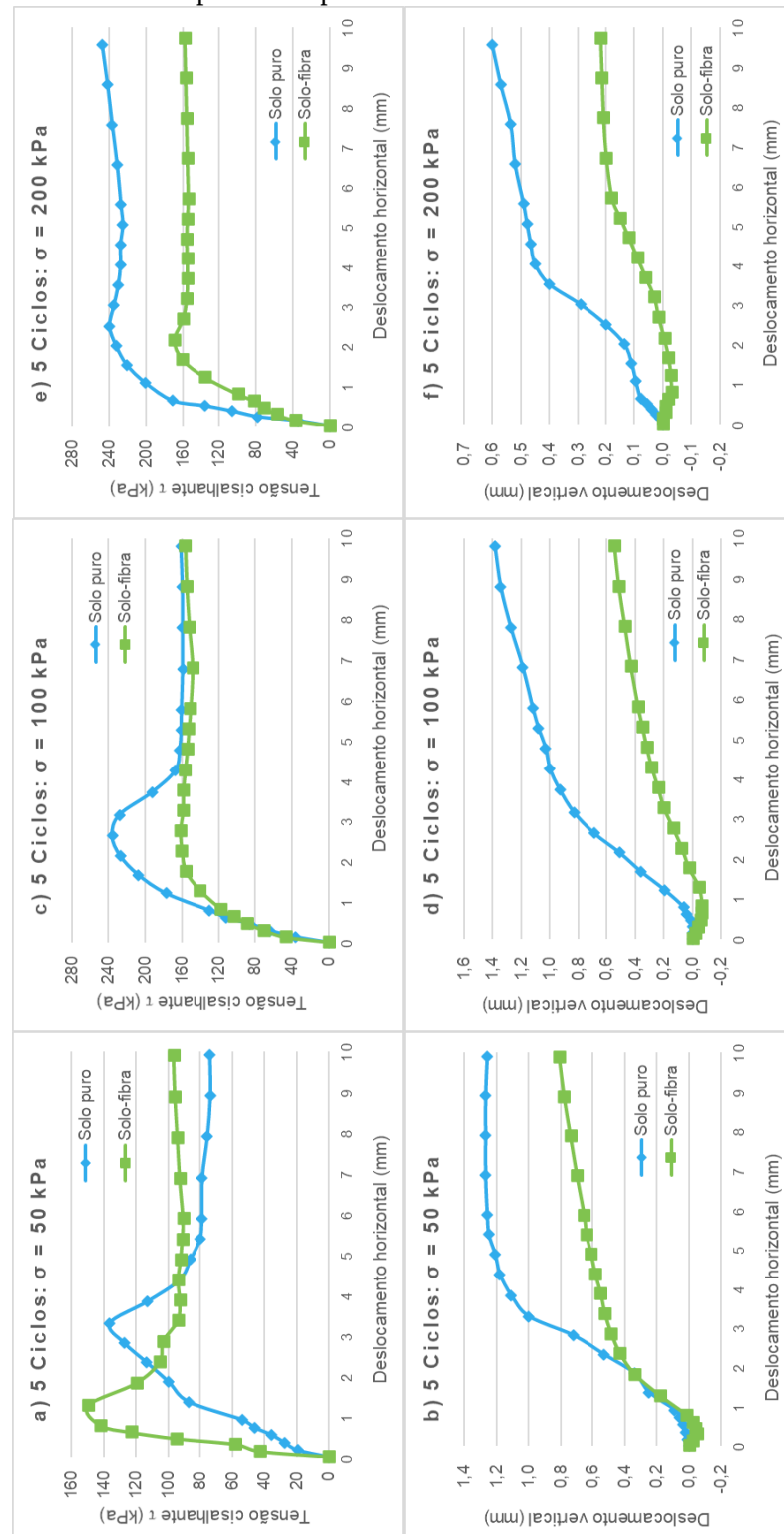
Fonte: A autora (2020)

4.6 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A Figura 44 apresenta as curvas ‘tensão cisalhante x deslocamento horizontal’ e ‘deslocamento vertical x deslocamento horizontal’ resultantes dos ensaios de cisalhamento direto na condição não inundada para as tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, após execução de 5 ciclos secagem-molhagem, respectivamente. A Tabela 14 informa as tensões cisalhantes

máximas aferidas para cada tensão normal aplicada, além de umidade e sucção relacionada (considerando o ajuste de van Genuchten (1980) abordado no item 4.2).

Figura 44 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto após 5 ciclos S-M
Em a), c) e e), curvas ‘tensão cisalhante $\times$ deslocamento horizontal’ para tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, respectivamente; em b), d) e f), curvas ‘deslocamento vertical $\times$ deslocamento horizontal’ para as respectivas tensões normais



Fonte: A autora (2020)

Tabela 14 – Tensões cisalhantes máximas e dados dos CPs - 5 ciclos S-M

Curva	σ_o (kPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (kPa)	$\sigma_{correspondente}$ (kPa)	Umidade, w (%)	Ψ_{VG} (kPa)
Solo puro 5 ciclos	50	137	53	17,0	2731
	100	236	105	17,2	2358
	200	248	246	14,2	3422
Solo-fibra 5 ciclos	50	72	52	17,0	4112
	100	110	121	16,8	4451
	200	157	247	16,9	4160

Fonte: A autora (2020)

Percebe-se que, para 5 ciclos S-M, a adição de fibras de coco apenas causou aumento na resistência de pico e redução da queda de resistência pós-pico para o primeiro nível de tensão ensaiado (50 kPa - Figura 44a). Nas tensões maiores (Figura 44c e 44e), os valores de pico da mistura não ficaram muito bem definidos e atingiram valores consideravelmente menores que os do solo puro, com valor residual muito próximo do máximo e trajetória ‘tensão x deformação’ similar à de areia fofa.

É interessante notar que os valores máximos de tensão de cisalhamento da mistura praticamente não sofreram variação dentre os ensaios realizados (ver Tabela 14), sugerindo que nos ensaios de 100 kPa e 200 kPa de pressão normal a superfície cisalhada possuía características similares, as quais não sofreram influência do aumento de tensão normal inicial – o que, via de regra, provoca aumento da tensão cisalhante máxima. Os valores de pico para o solo puro também sofreram pouquíssima variação entre as aplicações de tensões normais de 100 e 200 kPa, porém com significativa redução da queda de tensão pós-pico para o último nível de tensão.

Tendo em vista que o ensaio de cisalhamento direto impõe o plano de ruptura da amostra a partir do deslocamento relativo entre as partes da caixa bipartida, é possível que durante a montagem dos CPs fibrosos para os ensaios de 100 e 200 kPa de pressão normal, coincidentemente, a região de cisalhamento tenha correspondido a aglomerados de fibras, reduzindo a capacidade de adesão solo-fibra e possibilidade de resposta do conjunto à força de cisalhamento aplicada. Grandes concentrações de fibra seriam responsáveis, ainda, pela redução da densidade na área, o que justificaria o comportamento típico de solo fofo.

Durante o processo de homogeneização para moldagem (compactação) dos CP cilíndricos buscou-se atingir uma concentração mais uniforme ao longo de toda a amostra, mas foi constatada forte tendência de aglomeração das fibras, as quais tinham que ser constantemente separadas no processo. Mesmo pequenos focos localizados de fibra poderiam

vir a influenciar nos resultados do cisalhamento, tendo em vista as dimensões reduzidas da caixa de cisalhamento.

Atrelando à composição gravimétrica das fibras do estudo, com percentual representativo (46%) de fibras maiores que 5 cm (portanto, mais calibrosas), acredita-se que os resultados obtidos correspondem aos valores limites de atuação das fibras isoladas, já que, aparentemente, elas não tiveram possibilidade de serem ativadas junto com o solo para responderem ao cisalhamento enquanto compósito. A notória superioridade dos valores obtidos nos ensaios com solo puro reforça essa hipótese.

Esses resultados chamam atenção para um aspecto muito importante quanto à utilização das fibras de coco: sua tendência de aglomeração. Esse aspecto já havia sido mencionado por Oliveira Jr. (2018) para misturas com 2% (em peso) de fibras incorporadas, entretanto, as diferentes características dos lotes de fibras podem modificar essa tendência, já que em seu estudo apenas 3% das fibras tinham comprimento superior a 5 cm. Ao que tudo indica, utilização de fibras maiores, ainda que respeitando o percentual de 1% do peso seco do solo, pode favorecer a aglomeração durante a mistura, o que aumenta os contatos fibra-fibra e, consequentemente, compromete a adesão da matriz ao reforço.

Outrossim, o percentual de fibra considerado em cada caso corresponde à proporção utilizada para moldagem dos CPs cilíndricos, sem garantia de conservação da relação no interior das caixas cravadas para realização do ensaio de cisalhamento – em especial diante da forte tendência de aglomeração da fibra. A aferição do percentual efetivo de fibra nas caixas, e mesmo na superfície de ruptura, seria possível com a utilização de tecnologias de análises tomográficas, indisponíveis durante a realização desta pesquisa.

Conforme Oliveira Jr. (2018), a falta de adesão gera pontos frágeis no solo, sujeitos a maior compressibilidade, caminhos preferenciais de fluxo e macroporos de menor retenção de água. É possível que a menor adesão solo-fibra também prejudique a resistência ao cisalhamento do compósito, já que a parte das fibras não poderá ser ativada enquanto elemento de reforço. Donato (2003) frisa a importância da adesão matriz-reforço nos ganhos de resistência ao cisalhamento de solos reforçados. Para o autor, a maior quantidade de pontos de contato fibra-solo interfere diretamente nesse comportamento, razão pela qual solos argilosos comumente apresentam aumentos mais significativos de resistência com a adição de reforço.

Apesar de saber que a utilização de fibras mais curtas minimizaria a possibilidade de aglomerações no compósito, priorizou-se empregar o material beneficiado conforme diretamente recebido pela indústria, visando aferir sua aplicabilidade nas condições reais de disponibilidade no mercado. Tomou-se como premissa não causar interferência externa no

produto a fim de garantir fidedignidade aos resultados, entretanto, não se deve ignorar que as dimensões dos moldes usados para os ensaios não são compatíveis/proporcionais com as fibras longas utilizadas, o que pode esconder inconsistências experimentais.

Há ainda a possibilidade de que a compactação tenha sido executada no ramo úmido da curva e criado um compósito com estrutura dispersa, em que as partículas ficariam dispostas paralelamente ao plano de ruptura – reduzindo a resistência ao cisalhamento. Conforme já verificado na Figura 18 e Tabela 7, a adição de fibras ao solo aumentou a umidade ótima da mistura e, conseqüentemente, a quantidade de água necessária para moldagem dos corpos de prova fibrosos – devido à maior capacidade de retenção das fibras (ver item 4.2). Caso não tenha sido garantido tempo suficiente para equalização da umidade até o momento da compactação, é possível que a água incrementada não tenha conseguido ser retida pelas fibras e tenha permanecido na matriz de solo em excesso, o que favoreceria a compactação no ramo úmido.

Essa hipótese não havia sido considerada previamente, e por isso não foram tomadas medidas preventivas. Como não se sabe o tempo necessário para completa retenção de água pelas fibras, uma opção seria a submersão prévia das fibras atingir a saturação, para posteriormente acrescentá-las ao solo e quantidade de água restante para prosseguir à compactação da mistura. Dessa forma seria possível monitorar o processo de retenção das fibras, através de registros de incremento de peso ao longo do tempo, garantindo a saturação das fibras e gerando outros dados de possível análise.

Por outro lado, esse processo cria uma situação divergente da realidade de campo, onde as fibras “competiriam” com o solo pela água percolante. A simples garantia de tempo necessário de equalização de umidade da mistura previamente à compactação, com impedimento de perda de umidade para o ambiente, excluiria essa variável. Para tal, é necessário conhecer o tempo suficiente para retenção de água pelas fibras, o qual poderia ser constatado através do monitoramento de saturação por submersão mencionado.

Os gráficos de ‘deslocamento vertical x deslocamento horizontal’ demonstram que o solo puro sofre considerável expansão durante o ensaio para todas as tensões normais aplicadas, cuja taxa máxima de dilatação acontece em torno do deslocamento horizontal correspondente ao pico de resistência. A mistura ‘solo-fibra’ se comportou de forma distinta, sofrendo pequena compressão inicial seguida de expansão, porém com valores muito inferiores aos do solo puro.

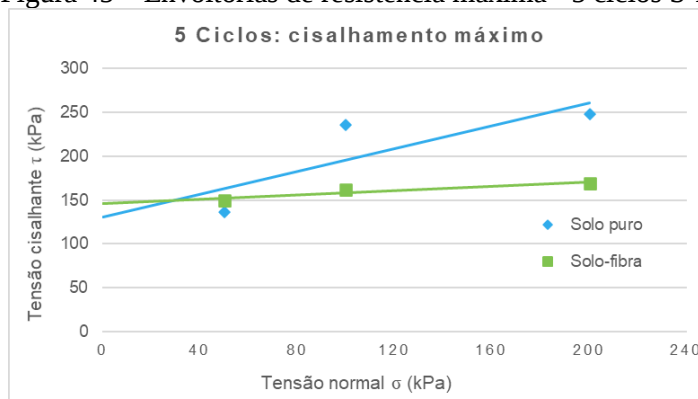
É possível que a presença de fibras, ao aumentar o índice de vazios do solo (e reduzir sua densidade), possibilite a ocorrência da compressão inicial do compósito e reduza o embricamento (*interlocking*) existente entre as partículas, o que, conseqüentemente, reduziria

a dilatação durante o cisalhamento (GERSCOVICH, 2010). Nos casos de ação conjunta de compósito no cisalhamento, a menor dificuldade em vencer o intertravamento das partículas pode ser compensada por uma maior resistência entre partículas (atrito e coesão), mas a divergência dos valores encontrados entre o solo puro e a mistura para níveis de tensões normais de 100 e 200 kPa corrobora a hipótese apresentada de que a superfície cisalhada da mistura, em ambos os casos, contava com grande quantidade de fibras que, além de dificultar o deslocamento vertical (o qual, em geral, aumenta a resistência ao cisalhamento), impossibilitou a ação conjunta com o solo.

Embora os resultados obtidos para os 5 ciclos não permitam análise mais conclusiva, a Tabela 14 indica que as amostras foram ensaiadas com umidade abaixo da ótima (19,2 e 19,6% para ‘solo puro’ e ‘solo-fibra’, respectivamente – ver Tabela 7). Chama-se a atenção para a diferença de valores de sucção entre ‘solo puro’ e ‘solo-fibra’, mesmo quando relacionado à teores de umidade similares. Essa divergência é relativa às diferentes curvas de retenção (trajetória de secagem) apresentadas no item 4.2, indicando o efeito de adição das fibras na retenção de água do solo.

A Figura 45 mostra as envoltórias de resistência do ‘solo puro’ e do ‘solo-fibra’ para as resistências máximas aferidas, utilizando o critério linear de Mohr-Coulomb como critério de ruptura. Frisa-se que para tensão normal de 200 kPa o CP não apresentou resistência de pico bem definida, tendo sido considerada como máxima a última resistência registrada. Diante dos valores bastante incomuns de resistência ao cisalhamento dos CPs reforçados e suposição de que os resultados obtidos não correspondem ao comportamento do compósito a envoltória de resistência da mistura ficou bastante diferenciada.

Figura 45 – Envoltórias de resistência máxima - 5 ciclos S-M



Fonte: A autora (2020)

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento, intercepto de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ), obtidos a partir das envoltórias (Figura 45), são apresentados na Tabela 15. O incremento de fibras proporcionou aumento no intercepto de coesão, mas ângulo de atrito sofreu grande redução. Os resultados atípicos desse ensaio impossibilitaram análise mais detalhada.

Tabela 15 – Parâmetros de resistência máxima - 5 ciclos S-M

Parâmetro	Solo puro	Solo-fibra
c (kPa)	130,7	146,1
ϕ (°)	28,8	6,9

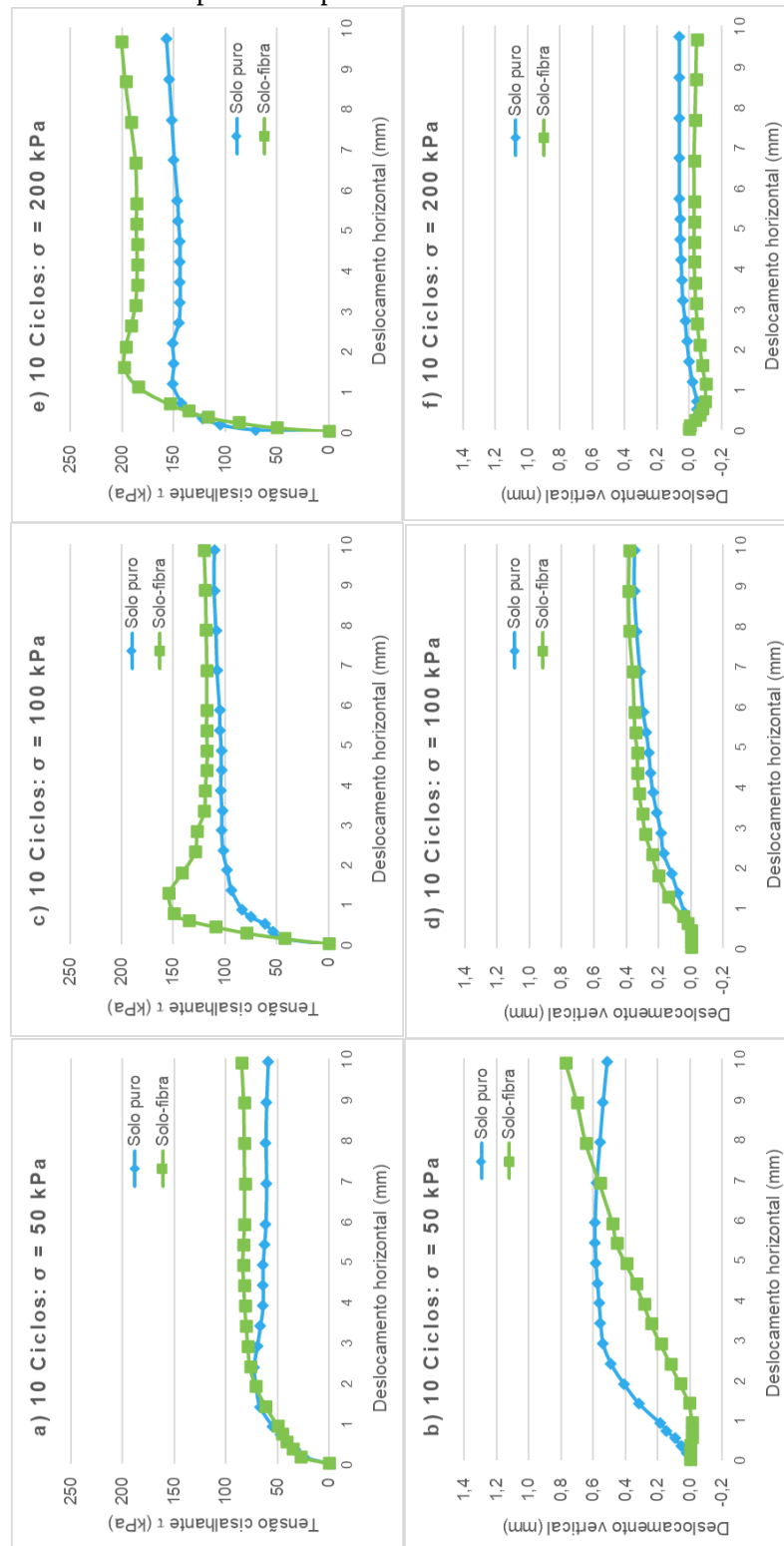
Fonte: A autora (2020)

A Figura 46 traz as curvas ‘tensão cisalhante $\times$ deslocamento horizontal’ e ‘deslocamento vertical $\times$ deslocamento horizontal’ resultantes dos ensaios de cisalhamento direto na condição não inundada para as tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, após execução de 10 ciclos de secagem-molhagem, respectivamente. A Tabela 16 mostra os valores das tensões cisalhantes máximas aferidas para cada tensão normal aplicada, além da variação percentual da tensão cisalhante do compósito em relação ao solo natural, umidade e sucção relacionada (considerando o ajuste de van Genuchten (1980) abordado no item 4.2).

Diferentemente, os resultados demonstram que para 10 ciclos S-M a adição de fibras de coco provocou aumento na resistência de pico e diminuição da queda de resistência pós-pico para todos os níveis de tensão ensaiados (Figura 46a, 46c e 46e), em especial na tensão normal de 100 kPa (Figura 46c). Na tensão normal de 50 kPa (Figura 46a) a mistura não apresentou valor de pico muito bem definido, assim como o solo puro para as maiores tensões normais (Figura 46c e 46e), com valor residual muito próximo do máximo e trajetória ‘tensão $\times$ deformação’ similar à de areia fofa.

A Tabela 16 apresenta a variação percentual da tensão cisalhante máxima do compósito em relação ao solo natural, revelando que a adição de fibras proporcionou aumento dos valores máximos de resistência entre 18,1 e 41,0 %, a depender da tensão normal aplicada. A ampliação da resistência de pico e redução da queda pós-pico com adição de fibras de coco foi verificado por Oliveira Jr. (2018) em situação sem passagem por ciclos secagem-molhagem, assim como outros autores para solos argilosos reforçados com diferentes fibras (HEINECK, 2002; MALIAKAL; THIYYAKKAMDI, 2013; MOHAMED, 2013). É possível perceber também que essas amostras também foram ensaiadas com umidade abaixo da ótima (ver Tabela 7), assim como apresentam grande diferença de valores de sucção entre ‘solo puro’ e ‘solo-fibra’, em razão do efeito de adição das fibras na retenção de água do solo (ver item 4.2).

Figura 46 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto após 10 ciclos S-M
Em a), c) e e), curvas ‘tensão cisalhante x deslocamento horizontal’ para tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, respectivamente; em b), d) e f), curvas ‘deslocamento vertical x deslocamento horizontal’ para as respectivas tensões normais



Fonte: A autora (2020)

Tabela 16 – Tensões cisalhantes máximas e dados dos CPs - 10 ciclos

Curva	σ_o (kPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (kPa)	$\sigma_{correspondente}$ (kPa)	$\Delta\tau_{m\acute{a}x}$ em relação ao solo puro (%)	Umidade w (%)	Ψ (kPa)
Solo puro 10 ciclos	50	72	52	-	17,0	2430
	100	110	121	-	19,2	1782
	200	157	247	-	20,0	1130
Solo-fibra 10 ciclos	50	85	62	+ 18,1	17,3	4302
	100	155	103	+ 41,0	17,1	3945
	200	200	247	+ 27,4	19,7	2596

Fonte: A autora (2020)

Verifica-se que para os primeiros níveis de deformação (até 1 mm), o comportamento ‘tensão x deformação’ entre solo e mistura é bem similar para todas as tensões normais aplicadas. Isso sugere que a matriz precisa sofrer certa deformação para que consiga transmitir o carregamento ao reforço, ativando a ação conjunta do compósito.

Analisando os gráficos de ‘deslocamento vertical x deslocamento horizontal’, percebe-se que para o primeiro nível de tensão (50 kPa - Figura 46b) as amostras sofrem uma pequena compressão inicial seguida de expansão. Enquanto o solo puro apresentou taxa máxima de dilatação por volta dos 3 mm de deslocamento vertical, próximo ao seu pico de resistência, a ausência de pico de resistência para a mistura se reflete em taxa de dilatação quase constante até o limite do ensaio, sugerindo que não houve, nesse caso, real cisalhamento da amostra.

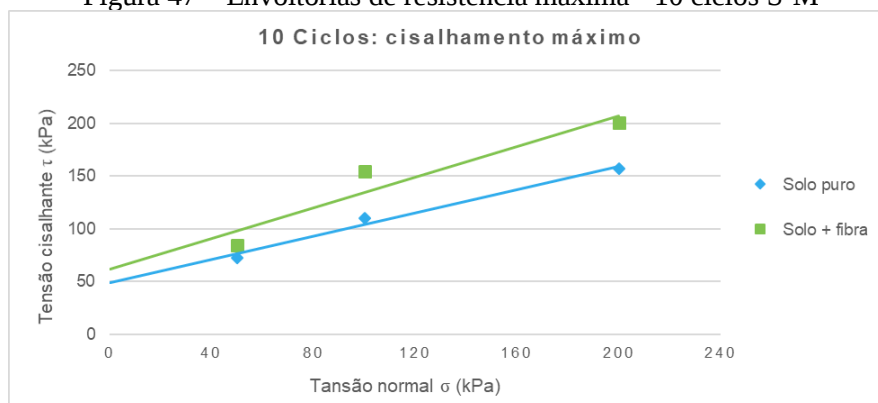
Esse comportamento se assemelha ao ‘solo puro’ no segundo nível de tensão (100 kPa - Figura 46d), enquanto que o ‘solo-fibra’ apresenta uma redução da taxa de dilatação no ponto de deformação onde há seu pico de resistência ($\approx 1,2$ mm). O último nível de tensão (200 kPa - Figura 46f) apresenta deformações verticais menos significativas, com uma etapa de compressão inicial seguida de expansão nas proximidades do valor nulo.

A Figura 47 mostra as envoltórias de resistência do ‘solo puro’ e do ‘solo-fibra’ para as resistências máximas aferidas, utilizando o critério linear de Mohr-Coulomb como critério de ruptura. Frisa-se que nos casos em que os CPs não apresentaram valores de pico bem definidos na curva ‘tensão x deslocamento horizontal’, considerou-se como máximo o maior valor registrado em cada ensaio.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento, intercepto de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ), obtidas a partir das envoltórias (Figura 47), são apresentados na Tabela 17. Percebe-se que a inclusão de fibras proporcionou aumento nos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, em especial no intercepto de coesão. Outros trabalhos encontraram resultados similares analisando diferentes solos e fibras (HEINECK, 2002; TANG *et al.*, 2007;

ANAGNOSTOPOULOS; TZETZIS; BERKETIS, 2013; MALIAKAL; THIYYAKKANDI, 2013; MOHAMED, 2013). Interessante notar que as fibras proporcionaram ganhos na ordem de 25% tanto na coesão quanto no ângulo de atrito em relação ao solo puro. Como Oliveira Jr. (2018) não apresentou envoltórias de resistência para os valores máximos, não é possível fazer a comparação da evolução dos parâmetros com a passagem pelos ciclos.

Figura 47 – Envoltórias de resistência máxima - 10 ciclos S-M



Fonte: A autora (2020)

Tabela 17 – Parâmetros de resistência máxima - 10 ciclos S-M

Parâmetro	Solo puro	Solo-fibra
c (kPa)	49,3	61,7
ϕ (°)	28,8	36,0

Fonte: A autora (2020)

A Tabela 18 mostra os resultados máximos obtidos por Oliveira Jr. (2018) sem a passagem por ciclos secagem-molhagem, também em condição não inundada. No estudo do autor, a depender da tensão normal, a adição de 1% de fibra de coco (em peso) proporcionou ganhos de resistência ao cisalhamento entre 13,4 e 36,4%, enquanto para o incremento de 2%, os ganhos ficaram entre 8,2 e 20,0%, em relação ao solo puro – os melhores resultados obtidos para incrementos de 1% inclusive justificaram a utilização desse percentual na presente pesquisa.

Conforme já mencionado, após a passagem por 10 ciclos S-M, os ganhos de resistência com a adição das fibras (1%) ficaram entre 18,1 e 41,0% (ver Tabela 16). Ou seja, o melhor comportamento do compósito em relação ao solo puro, demonstrada por Oliveira Jr. (2018), foi ainda potencializado com a passagem por 10 ciclos S-M, tendo em vista que os ganhos percentuais foram superiores.

Tabela 18 – Tensão cisalhante máxima sem passagem por ciclos S-M

Curva	σ_o (kPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (kPa)	$\Delta\tau_{m\acute{a}x}$ em relação ao solo puro (%)
Solo puro	50	97	-
	100	110	-
	200	180	-
Solo + fibra – 1%	50	110	+ 13,4
	100	150	+ 36,4
	200	228	+ 26,6
Solo + fibra – 2%	50	105	+ 8,2
	100	132	+ 20,0
	200	196	+ 8,9

Fonte: adaptado de Oliveira Jr. (2018)

Comparando os resultados máximos obtidos por Oliveira Jr. (2018) em situação sem passagem prévia por ciclos secagem-molhagem (Tabela 18) com aqueles aferidos após passagem por 10 ciclos (Tabela 16), tem-se a relação percentual apresentada na Tabela 19, a qual representa a influência dos 10 ciclos S-M na tensão cisalhante máxima do ‘solo puro’ e do ‘solo-fibra’.

Tabela 19 – Variação dos valores de tensão cisalhante máxima após passagem por 10 ciclos S-M, em relação  condição original (sem ciclos)

Curva	σ_o (kPa)	$\Delta\tau_{m\acute{a}x}$ (%)
Solo puro	50	- 25,8
	100	0
	200	- 12,8
Solo-fibra – 1%	50	- 22,7
	100	+ 3,3
	200	- 12,3

Fonte: A autora (2020)

 possível perceber que a passagem pelos 10 ciclos S-M gerou uma tendência de redução da tensão cisalhante máxima do solo puro de até 25,8% em relação  condição original (sem ciclos), a depender da tensão normal inicialmente aplicada. A adição de fibras (1%, em peso) indicou pequena tendência de minimizar essa redução em até 2,9%, sugerindo que o melhor comportamento do compósito em relação ao solo puro se mantém ao longo do tempo. A maior capacidade de retenção das fibras, em especial no ciclo de secagem, já abordada no item 4.2, corrobora os melhores desempenhos obtidos para o compósito – em relação ao solo natural, também para o caso de passagem pelos ciclos de envelhecimento. A presença de fibras

parece ser capaz de manter uma estrutura mais estável e menos sujeita a mudanças a partir da variação de umidade.

Curiosamente, para a tensão normal inicial de 100 kPa, o solo puro apresentou exatamente o mesmo valor de resistência máxima com e sem passagem pelos ciclos, e com a adição de fibra houve mesmo aumento (3,3%) da resistência máxima após os ciclos – ou seja, uma melhoria.

A maioria dos estudos têm revelado tendência de decréscimo da resistência do solo com a passagem por ciclos S-M, em especial logo no 1º ciclo, com influência gradativamente menor nos ciclos seguintes (GOH; RAHARDJO; LEONG, 2014; HOSSAIN MD; LING-WEI; SONG, 2016; WANG *et al.*, 2016). Então, os efeitos causados logo no primeiro ciclo são mais expressivos e o solo apresenta uma tendência de acomodação posterior, onde cada ciclo subsequente não resulta em grandes novas alterações. A análise ciclo a ciclo não constituiu objetivo deste trabalho, e em razão dos resultados inconclusivos apresentados para o ensaio com 5 ciclos S-M, não foi possível fazer a comparação inicialmente planejada entre 0, 5 e 10 ciclos, restando analisar a divergência entre os dois extremos.

Alguns autores, por outro lado, acreditam que esse processo, com todas as modificações que promove no solo, pode vir a criar uma estrutura melhorada e mais estável, numa espécie de adaptação para condições ainda mais severas (BAMGBOPA, 2016; KODIKARA; BARBOUR; FREDLUND, 2002; TANG *et al.*, 2016). Esse comportamento pode justificar a manutenção ou aumento (‘solo puro’ e ‘solo-fibra’, respectivamente) dos valores de resistência ao cisalhamento após os 10 ciclos para tensão normal inicial de 100 kPa.

É importante pontuar que, como é sabido, cada um dos conjuntos de pontos para uma tensão normal inicial é obtido a partir de um corpo de prova único, então é possível, mesmo com máxima tentativa de padronização, que haja divergências entre os ensaios provenientes de variáveis tanto no momento da moldagem do CP cilíndrico, como na cravação da caixa para realização do ensaio (umidade, compactação, tamanho e densidade das fibras etc.). Ainda assim, ao que tudo indica, o solo estudado tende a apresentar um comportamento mais estável ao longo do tempo quando submetido a tensões normais na ordem de 100 kPa, tendência que é ainda potencializada com o incremento das fibras, como pode ser percebido na Tabela 19. Esse valor de tensão pode estar relacionado com a tensão de sobreadensamento do solo, o que justificaria um comportamento mais diferenciado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Constatou-se uma forte tendência de aglomeração das fibras durante os processos de homogeneização e moldagem dos compósitos. Essa dificuldade executiva deve ser levada em consideração na aplicabilidade prática, pois aglomerados de fibras comprometem a adesão da matriz ao reforço e geram pontos frágeis no solo, sujeitos a maior compressibilidade, caminhos preferenciais de fluxo, macroporos de retenção de água e menor resistência ao cisalhamento. Possivelmente esses aglomerados se formaram nas proximidades das superfícies de cisalhamento das amostras que passaram por 5 ciclos secagem-molhagem, o que interferiu nos resultados de resistência ao cisalhamento e gerou resultados inconclusivos no ensaio.

Ainda com tentativas manuais de separação e homogeneização da mistura, percebeu-se que quanto maiores e mais calibrosas as fibras, mais evidente essa tendência. Assim, a utilização das fibras com distribuição aleatória na matriz para reforço de compósitos deve ser executada de forma a minimizar aglomerações. A realização de triagem posterior ao processo de beneficiamento para separação das fibras mais longas (e, no geral, mais calibrosas) é uma opção para minimizar os aglomerados e otimizar a utilização desse produto como reforço de compósitos. Vale salientar que as fibras desprezadas para essa finalidade ainda possuem grande potencial de utilização nas mais variadas áreas, conforme já apresentado – inclusive na própria geotecnia, na produção de mantas geotêxteis.

5.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa demonstraram que a adição de fibras possibilitou maior integridade física das amostras submetidas aos ciclos de secagem-molhagem em situação não confinada (saturação por capilaridade), com menor formação de fissuras aparentes. Embora não tenha sido feito monitoramento visual rigoroso ciclo a ciclo, foi possível perceber que o maior quantitativo de ciclos a que as amostras foram submetidas refletiram em maior índice de fissuração da superfície, com destaque para o primeiro evento, responsável pelos danos mais significativos. Nenhuma das amostras saturadas em situação confinada (permeâmetro) apresentou formação de fissuras aparentes em sua superfície.

As curvas características indicaram que a adição de fibras aumentou a retenção de água do solo para um mesmo nível de sucção, em especial na trajetória de secagem, com aumento do ponto de entrada de ar, umidade de capacidade de campo e capacidade de armazenamento de água. As propriedades polares da fibra de coco e o maior índice de vazios proporcionado

pelo acréscimo das fibras no solo (o que aumenta o volume disponível para armazenamento) justificam esse comportamento.

Os modelos de condutividade hidráulica não saturada revelaram um comportamento de extremos do compósito ‘solo-fibra’: na trajetória de secagem, as fibras aumentaram a permeabilidade à água, e na trajetória de umedecimento, reduziram. No mesmo sentido, a estimativa teórica dos coeficientes de permeabilidade relativa do solo ao ar e à água em função do grau de saturação revelou que a adição de fibras propiciou maior percolação de água na trajetória de secagem, e maior fluxo de ar durante o umedecimento, quando comparada ao solo puro. Esse comportamento é reflexo da maior capacidade de retenção proporcionada pelas fibras, que promove uma mudança mais gradativa do grau de saturação, em relação ao solo puro, a qual é uma característica bastante interessante para aplicações sujeitas a grandes variações de umidade.

Os ensaios de condutividade do solo seco ao ar revelaram que para um mesmo confinamento, a adição de fibras proporcionou maior velocidade aparente, ou seja, maior facilidade de passagem do ar, com valores de permeabilidade (ao ar) maiores em até uma ordem de grandeza (10 vezes). Para todos os casos, verificou-se que o gradiente de pressão aplicado tem menos influência na permeabilidade ao ar do que a pressão confinante atuante, em razão das alterações estruturais que promove no solo, as quais dificultam a passagem do fluido.

A passagem pelos ciclos secagem-molhagem demonstrou uma pequena influência na permeabilidade do solo puro seco ao ar, causando gradativo aumento da permeabilidade ao ar, até certo ponto de relativa estabilidade (entre 3 e 5 ciclos). Embora essas variações não tenham sido significativas, com a adição de fibras essa relação não foi percebida, sugerindo que a fibra proporciona maior estabilidade da permeabilidade, promovendo maior durabilidade à mistura (ao menos nesse aspecto).

As amostras de ‘solo puro’ e ‘solo-fibra’ apresentaram valores de condutividade saturada à água similares, dentro da mesma ordem de grandeza. A sequência de sucessivos ciclos também não revelou tendência de modificação para nenhum dos casos, com pequenas variações para mais e para menos ao longo dos ensaios, sem padrão definido. Por outro lado, o primeiro processo de secagem se mostrou responsável pelo aumento da permeabilidade à água em aproximadamente uma ordem de grandeza (10 vezes) para os CPs ‘solo-fibra’. Comparando com os valores obtidos por Oliveira Jr. (2018) é possível supor o mesmo efeito também para o ‘solo puro’. As microfissuras criadas já no primeiro processo de secagem parecem comprometer de forma definitiva e irreversível a permeabilidade à água, criando caminhos preferenciais de fluxo que se mantiveram ao longo dos ciclos.

Os resultados de resistência ao cisalhamento das amostras que passaram por 10 ciclos S-M comprovaram que adição de fibras melhorou o comportamento do solo, com aumentou a resistência de pico e diminuiu a queda de resistência pós-pico, além de aumentar dos parâmetros de resistência máxima (c , ϕ). Em relação à condição original (sem ciclos), a passagem pelos ciclos gera uma tendência de redução da tensão cisalhante máxima, mas a presença das fibras minimizou um pouco esse efeito, sugerindo que o melhor comportamento mecânico do compósito se mantém ao longo do tempo.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados deste trabalho, sugerem-se as ideias abaixo como possibilidades para trabalhos futuros:

- a) monitorar empiricamente o índice de fissuração superficial de amostras de ‘solo puro’ e ‘solo-fibra’ com a passagem por ciclos secagem-molhagem;
- b) verificar a contração e variação de volume de amostras de ‘solo puro’ e ‘solo-fibra’ com a passagem por ciclos secagem-molhagem;
- c) realizar ensaios de sucção após a realização de ciclos secagem-molhagem para verificar o efeito gradativo na curva de retenção do ‘solo puro’ e do ‘solo-fibra’;
- d) validar as estimativas teóricas de condutividade hidráulica não saturada a partir de investigações empíricas para comprovar as aplicações práticas da mistura ‘solo-fibra’;
- e) fazer ensaios de evaporação com amostras de ‘solo puro’ e ‘solo-fibra’, permitindo a evaporação apenas pela superfície superior dos corpos de prova;
- f) realizar ensaios de cisalhamento direto ou triaxiais com diferentes quantitativos de ciclos secagem-molhagem com o objetivo de investigar a variação ao longo do tempo;
- g) avaliar o efeito da adição de fibras de coco na condutividade hidráulica máxima do solo diferentes fluidos (líquidos e/ou gases) presentes em aterros sanitários ou barreiras de contenção ambiental (lixiviado, enxofre, metano, gás carbônico etc.);
- h) analisar em laboratório a degradação da fibra de coco isoladamente e do compósito ‘solo-fibra’ a partir da utilização de soluções ácidas ou básicas;
- i) analisar imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de amostras após realização ciclos secagem-molhagem, para comparar a adesão entre as partículas de argila e as fibras de coco;

- j) realizar análises tomográficas de amostras para caracterizar a dispersão geométrica das fibras e fissuração ao longo dos ciclos secagem-molhagem;
- k) monitorar o descarte de resíduos do coco verde atualmente empregado nas cidades para criar estratégias de aproveitamento, gestão e beneficiamento local.

REFERÊNCIAS

- AL WAHAB, R. M.; EL-KEDRAH, M. A. Using fibers to reduce tension cracks and shrink/swell in a compacted clay. In: **Geoenvironment 2000** – Characterization, containment, remediation and performance in environmental geotechnics, New Orleans. Proceedings... ASTM STP n. 46, ASTM, v. 1, 2v, p. 791-805, 1995.
- ALBRECHT, B. A.; BENSON, C. H. Effect of desiccation on compacted natural clays. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, n. 1, p. 67-75, 2001.
- ALBRIGHT, W. H.; BENSON, C.H.; GEE, G. W.; ROESLER, A. C.; ABICHOU, T. Field Water Balance of Landfill Final Covers. **Journal of Environmental Quality**, v. 33, p. 2317-2332, 2004.
- ALBRIGHT, W. H.; BENSON, C. H.; GEE, G. W.; ABICHOU, T.; TYLLER, S. W.; ROCK, S. A. Field Performance of Three Compacted Clay Landfill Covers. **Vadose Zone Journal**, v. 5, p. 1157-1171, 2006.
- ALLAM, M. M.; SRIDHARAN, A. Effect of wetting and drying on shear strength. **Jour. Geotech. Eng.**, v. 107 (GT4), p. 421–438, 1981.
- ALONSO, E. E.; ROMERO, E.; HOFFMANN, C.; GARCÍA-ESCUADERO, E. Expansive bentonite-sand mixtures in cyclic controlled-suction drying and wetting. **Eng. Geol.**, v. 81, p. 213-226, 2005.
- 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, 2013.
- ANDERSON, M. G.; HUBBARD, M. G.; KNEALE, P. E. The influence of shrinkage cracks on porewater pressures within a clay embankment. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 15, n. 1, p. 9-14, 1982.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação utilizando energia de compactação normal. Rio de Janeiro. 1988.
- _____. **NBR 14545**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro. 2000.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3080-04**: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. West Conshohocken, USA: ASTM International. 2004.
- _____. **D5084-10**: Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter. West Conshohocken, USA: ASTM International. 2010.
- BAMGBOPA, O. S. Investigation of shrinkage and cracking in clay soils under wetting and drying cycles. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, v. 5, n. 11, p. 283-320, nov. 2016.

BARBOSA, M. F., *et al.* Transporte de contaminantes e fluxo de gases em solos não saturados. In: CARVALHO, J. C., *et al.* (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2015. p. 367-414.

BASMA, A. A.; AL-HOMOUD, A. S.; HUSEIN-MALKAWI, A. I.; AL-BASHABSHEH, M. A. Swelling-shrinkage behavior of natural expansive clays, **Appl. Clay Sci.**, v. 11, p. 211-227, 1996.

BICALHO, K. V.; MACHADO, S. L.; GERSCOVICK, D. M. S. Condutividade hidráulica e fluxo em solos não saturados. In: CARVALHO, J. C., *et al.* (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2015. p. 297-326.

BLIGHT, G. E. **Unsaturated soil mechanics in geotechnical practice**. Leiden (Netherlands): CRC Press/Balkema, 2013.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in Polymer Science**, Oxford, v.24, n. 2, p.221-274, 1999.

BOLAÑOS, R. E. Z. **Comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com fibras de coco**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

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

BRASIL. Lei nº 594, de 24 de dezembro de 1948: concede favores às fábricas que se instalarem para a exploração da fibra de coco, com o aproveitamento da matéria prima nacional. **Diário Oficial da União**: Seção 1 de 29/12/1948, Brasília, DF, p. 18461 (Publicação Original), 1948.

BRASILEIRO, G. A. M. **Produção, caracterização e avaliação da durabilidade de compósitos cimentícios com partículas de pó de coco**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2013.

BRASILEIRO, G. A. M.; VIEIRA, J. A. R.; SANTANA, R. S.; BARRETO, L. S. Estudo da durabilidade de compósitos cimento-partículas de pó de coco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 20., 2012, Joinville. **Anais [...]**. Joinville: CBECIMAT, 2012.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**. Am. Soc. Civ., v. 92, n. IR2, p. 61- 88, jun. 1966.

BURAKOWSKI, L., REZENDE, M. C. Modificação da rugosidade de fibras de carbono por método químico para aplicação em compósitos poliméricos. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 11, p. 51-57, 2001.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CARRIJO, O. A.; LIZ, R. S.; MAKISHIMA, N. Fibra da casca de coco verde como substrato agrícola. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 20, n. 4, p. 533-535, 2002.

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

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

CHANDLER, R. J.; GUTIERREZ, C. I. The filter paper method of suction measurement. **Geotechnique**, v. 36, p. 265-268, 1986.

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 Engineers - Civil Engineering**, v. 92, n. 2, p. 82-89, 1992.

CHEN, K.; LU, Z. The crack evolution of red clay under wet and dry cycles. In: INTERNATIONAL FORUM ON ENERGY, ENVIRONMENT SCIENCE AND MATERIALS – IFEEESM, Shenzhen, China, 2015. **Proceedings [...]**. Shenzhen: Atlantis Press, 2015. p. 167-172.

CHEN, R.; NG, C. W. W. Impact of wetting–drying cycles on hydro-mechanical behavior of an unsaturated compacted clay. **Applied clay science**, v. 86, p. 38-46, dez. 2013.

CHERTKOV, V.Y. Using surface crack spacing to predict crack network geometry in swelling soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, p. 1918-1921, 2000.

CHERTKOV, V. Y.; RAVINA, I. Tortuosity of crack networks in swelling clay soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, p. 1523-1530, 1999.

CINTRA, F. L. D.; FONTES, H. R.; PASSOS, E. E. M.; FERREIRA, J. M. S. **Fundamentos tecnológicos para a revitalização das áreas cultivadas com coqueiro gigante no nordeste do Brasil**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2009. 232 p.

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.

CUI, Y. J.; YAHIA-AISSA, M.; DELAGE, P. A model for the volume change behavior of heavily compacted swelling clays. **Eng. Geol.**, v. 64, 233–250, 2002.

CUISINIER, O.; MASROURI, F. Hydromechanical behavior of a compacted swelling soil over a wide suction range. **Eng. Geol.**, v. 81, n. 3, p. 204-212, 2005.

DECARLO, K. F.; SHOKRI, N. Effects of substrate on cracking patterns and dynamics in desiccating clay layers. **Water Resources Research**, v. 50, n. 4, p. 2039-3051, 2014.

DONATO, M. **Comportamento mecânico de concreto compactado com rolo reforçado com fibras de polipropileno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

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.

EL-FADEL, M., BOU ZEID, E., CHAHINE, W.; ALAYLI, B. Temporal Variation Leachate Quality from Pre-Sorted and Baled Municipal Solid Waste with High Organic and Moisture Content. **Waste Management**, v. 22, p. 269-282, 2002.

ESMERALDO, M. A. **Preparação de novos compósitos suportados em matriz de fibra vegetal/ natural**. Dissertação (Mestrado) – Universidade federal do Ceará, Fortaleza, 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. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 7., 2011, Pirenópolis. **Anais [...]** Pirenópolis: Kelps, 2011. v. 1, p. 169-175.

FERREIRA, S. R.; LIMA, P. R. L.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland. **Rev. Matéria**, v. 17, n. 2, p. 1024-1034, 2012.

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, 2017.

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

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated soil mechanics in engineering practice**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012. 926p.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristics curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p. 521-532, 1994.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v.31, n. 3, p. 533-546, 1994.

GERSCOVICH, D. M. S. **Resistência ao cisalhamento**. Apostila – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, Departamento de Estruturas e Fundações, 102 p. 2010.

GERSCOVICH, D. M. S.; GUEDES, M. N. Avaliação das relações de condutividade hidráulica em solos brasileiros não saturados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 5., 2004, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos, 2004. p. 249-253.

GERSCOVICH, D. M. S.; SAYÃO, A. S. F. J. Evaluation of the soil-water characteristic curve equations for soils from Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS – UNSAT, 3., Recife, 2002. **Proceedings [...]**. Lisse: Sweets & Zeitlinger B. V., 2002. v. 1, p. 295-300.

GOH, S. G.; RAHARDJO, H.; LEONG, E. C. Shear Strength of Unsaturated Soils under Multiple Drying-Wetting Cycles. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 140, n. 2, fev. 2014.

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.

GU, K.; TANG, C.; SHI, B.; HONG, J.; JIN, F. A study of the effect of temperature on the structural strength of a clayey soil using a micropenetrometer. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 73, p. 747-758, 2014.

HANNANT, L. Polymers and polymers composites. In: J.M. ILLSTON. **Construction materials: their nature and behavior**. 2. ed. London: J.M. Illston/E & FN Spon, 1994. p. 359-403.

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, Porto Alegre, 2002.

HETTIARATCHI J. P. A.; PERERA, M. D. N.; VISWANTHAN, C.; POKHREL, D. **Design of landfill cover systems incorporating soil methanotrophy for methane emission mitigation**. 11p, 2007. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.595.3195&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 21 out. 2019.

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.

HORGAN, G. W.; YOUNG, I. M. An empirical stochastic model for the geometry of two-dimensional crack growth in soil (with discussion). **Geodema**, v. 96, p. 263-276, 2000.

HOSSAIN MD, S.; LING-WEI, K.; SONG, Y. Effect of drying-wetting cycles on saturated shear strength of undisturbed residual soils. **American Journal of Civil Engineering**, v. 4, n. 4, p. 159-166, 2016.

HUBER-HUMER, M.; GEBERT, J.; HILGER, H. A. Biotic systems to mitigate landfill methane emissions. **Waste Management & Research**, v. 26, n. 1, p. 33-46, 2008.

IGNATIUS, S. G. **Fluxo unidirecional de gás através de um solo compactado – determinação laboratorial de parâmetros**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

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

JUCA, J. F. T.; MACIEL, F. J. Permeabilidade ao gás de um solo compactado não saturado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 4., 1999, São José dos Campos. **Anais [...]**. São José dos Campos, 1999. p. 383-390.

KODIKARA, J.; BARBOUR, S.; FREDLUND, D. G. Structure development in surficial heavy clay soils: a synthesis of mechanisms. **Australian Geomechanics Journal**, v. 37, n. 3, p. 25-40, 2002.

LEIJ, F. J.; GHEZZEHEI, T. A.; OR, D. Modelling the dynamics of the soil pore-size distribution, **Soil Tillage Res.**, v. 64, p. 61-78, 2002.

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, Ouro Preto, 2005.

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

LI, D.; VELDE, B.; ZHANG, T. Observations of pores and aggregates during aggregation in some clay-rich agricultural soils as seen in 2D image analysis. **Geoderma**, v. 118, n. 3-4, p. 191-207, fev. 2004.

LIU, H. Q.; YIN, Z. Z. Test study of influence of crack evolution on strength parameters of expansive soil. **Rock and Soil Mechanics**, v. 31, n. 3, p. 727-731, 2010.

LOISEAU, C., CUI, Y.J. e DELAGE, P. Air conductivity of a heavily compacted swelling clay-sand mixture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS – UNSAT, 3., Recife, 2002. **Proceedings [...]**. Lisse: Sweets & Zeitlinger B. V., 2002. v. 1, p. 383-388.

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

LU, N., WU, B., TAN, C.P. Tensile strength characteristics of unsaturated sands. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 133, p. 144-154, fev. 2007.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T. Laboratory and field tests for studying gas flow through MSW landfill cover soil. In: GEODENVER, 2000, Denver (Estados Unidos). **Proceedings [...]**. Denver: ASCE, 2000. p. 1-17.

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.

MARIANO, M. O. H. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

MARINHO, F. A. M. Medição de Sucção com o Método do Papel Filtro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 10., 1994, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu, 1994. p. 515-522.

MARINHO, F. A. M. **Shrinkage behaviour of some plastic soils**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Imperial College, Londres (Inglaterra). 1994.

MARINHO, F. A. M. **Os solos não saturados**: aspectos teóricos, experimentais e aplicados. Texto apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para o Concurso de Livre-Docência na especialidade "Geomecânica" do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. 2005.

MARTINS, C. R.; JESUS JR., L. A. de. **Evolução da produção de coco no Brasil e o comércio internacional**: panorama 2010. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2011. 32 p. Documentos 164. Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2011/doc_164.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2018.

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.

MASROURI, F.; BICALHO, K. V.; KAWAI, K. Laboratory hydraulic testing in unsaturated soils. **Geotechnical and Geological Engineering**. v. 26, n. 6, p. 691-704, dez 2008.

MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. **Composite Materials**: Engineering and Science, 2. 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**. Apostila. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2011. 37p. Disponível em: <http://www.ceinfo.cnpat.embrapa.br/arquivos/artigo_3830.pdf>. Acesso em: 02 maio 2018.

MELCHIOR, S; SOKOLLEK, V.; BERGER, K.; VIELHABER, B. STEINERT, B. Results from 18 years of in situ performance Testing of Landfill cover systems in Germany. **Journal of Environmental Engineering**. v. 136, n. 8, p. 815-823, 2010.

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

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behavior**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.

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

MONTEIRO, V. E. D. **Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento do aterro da Muribeca**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2003.

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, São Carlos. 2011.

NOWAMOOZ, H.; MASROURI, F. Density-dependent hydromechanical behavior of a compacted expansive soil. **Eng. Geol.**, v. 106, p. 105-115, 2009.

NISHIMURA, T.; FREDLUND, D. G. Hysteresis effects resulting from drying and wetting under relatively dry conditions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS – UNSAT, 3., Recife, 2002. **Proceedings [...]**. Lisse: Sweets & Zeitlinger B. V., 2002. v. 1, p. 301–306.

OLIVEIRA, A. B. de; HERNANDEZ, F. F. F.; ASSIS, R. N. Pó de coco verde, uma alternativa de substrato na produção de mudas de berinjela. **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, n. 1, p. 39-44, mar. 2008.

OLIVEIRA JR., A. I. **Comportamento geotécnico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras curtas de coco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

OLIVEIRA, O. M. de. **Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

OTTONI, M. V. **Classificação físico-hídrica de solos e determinação da capacidade de campo in situ a partir de testes de infiltração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). Rio de Janeiro/RJ, 2005.

PAGLIAI, M.; LA MARCA, M.; LUCAMANTE, G. Changes in soil porosity in remolded soils treated with poultry manure. **Soil Science**, v. 144, p. 128-140, 1987.

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.

PASSOS, P. R. de A. **Destinação sustentável de cascas de coco verde: obtenção de telhas e chapas de partículas**. Tese. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 186 p. 2005.

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

PINO, G. H.; MESQUITA, L. M. S. de; TOREM, M. L.; PINTO, G. A. S. Biosorption of cadmium by green coconut shell powder. **Minerals Engineering**, v. 19, n. 5, p. 380-387, 2006.

PINTO, J. S. **Estudo da Condutividade hidráulica de solos para disposição de resíduos sólidos na região de Santa Maria-RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Gamma ray computed tomography to evaluate wetting/drying soil structure changes. **Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, v. 229, n. 1-2, p. 443-456, abr. 2005.

_____. Assessment of soil structure repair due to wetting and drying cycles through 2D tomographic image analysis. **Soil & Tillage Research**, v. 94, p. 537-545, 2007.

PIRES, L. F.; COOPER, M.; CÁSSARO, F. A. M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; DIAS, N. M. P. Micromorphological analysis to characterize structure modifications of soil samples submitted to wetting and drying cycles. **Catena**, v. 72, p. 297-304, 2008.

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.

RAY, P. K.; BANDYOPADHYAY, S. B. An x-ray study of coir fibre. **Indian J. Phys.** v. 39, p. 421-427, 1965.

REDDY, N.; YANG, Y. Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications. **Trends in Biotechnology**, v. 23, n. 1, p. 22-27, 2005.

ROSÁRIO, F.; PACHEKOSKI, W. M.; SILVEIRA, A. P. J.; SANTOS, S. F. dos; SAVASTANO JR., 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.; ABREU, F. A. P.; FURTADO, A. A. L., BRÍGIDO, A. K. L.; NORÕES, E. R. V. **Processo agroindustrial: obtenção de pó de casca de coco verde**. Comunicado Técnico 61. Fortaleza – CE, 4 p. dez, 2001a.

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. In: CARVALHO, J. M. M. de (Org.). **Apoio do BNB à pesquisa e desenvolvimento da fruticultura regional**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, p. 165-190, 2009.

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, 2001b.

SANTANA, R. S.; VIEIRA, J. A. R.; BRASILEIRO, G. A. M.; BARRETO, L. S. Avaliação da durabilidade de compósitos cimento-partículas de pó de coco produzidos por diferentes processamentos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS – CBECIMAT, 21., 2014, Cuiabá. **Anais [...]**. Cuiabá, 2014. p. 2602-2613.

SANTOS, A. M. **Estudo de compósitos híbridos polipropileno/fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SATYANARAYANA, K. G.; SUKUMARAN, K.; MUKHERJEE, P. S.; PAVITHRAN, C.; PILLAI, S. G. K. Natural fibre – polymer composites. **Cement & Concrete Composites**, Essex, v.12, n. 2, p.117-136, 1990.

SAVASTANO JR., H. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo**. Texto apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para o Concurso de Livre-Docência do Departamento de Engenharia de Construção Civil. 2000.

SAVASTANO JR., H.; PIMENTEL, L. L. Viabilidade do aproveitamento de resíduos de fibras vegetais para fins de obtenção de material de construção. **Revista Brasileira de Eng. Agrícola e Ambiental**, DEAg / UFPB, Campina Grande-PB, v. 4, n. 1, p. 103-110, 2000.

SENHORAS, E. M. **Estratégias de uma agenda para a cadeia agroindustrial do coco: Transformando a ameaça dos resíduos em oportunidades eco-eficientes**. Monografia, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2003.

SHOKRI, N.; LEHMANN, P.; VONTOBEL, P.; OR, D. Drying front and water content dynamics during evaporation from sand delineated by neutron radiography. **Water Resources Research**, v. 44, n. W06418, 2008.

SILVA, A. C. e. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SILVA, A. C. da. 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.

SILVA, O. S. de O.; SILVA, R. M. L. e; VIANNA, F. M. A.; COSTA, W. M. da; GUEDES, C. **Aceitabilidade de produtos para a construção civil produzidos a base de fibra de coco**

na visão de especialistas do setor: um estudo de caso para a cidade de Natal. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2003. 19p.

SILVA, R.; HARAGUCHI, S. K.; MUNIZ, E. C.; RUBIRA, A. F. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 661-671, 2009.

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.

SOARES, R. N; SILVA, A. C; PINHEIRO, J. C. Tijolos de terra crua estabilizados com fibras de coco verde: alternativa para habitação de interesse social. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 46., 2008, Rio Branco. **Pôster...** Rio Branco, 2008. p. 1-9.

SOUSA, F. W.; ANDRÉ, G. O.; MOREIRA, S.A.; ROSA, M. F.; CAVALCANTE, R. M.; NASCIMENTO, R. F. Estudo da viabilidade de uso da casca de coco verde como adsorvente para remoção de metais pesados de efluentes industriais. **Química Nova** [online], v. 30, n. 5, p. 1153-1157, 2007.

TAMRAKAR, S. B.; TOYOSAWA, Y.; MITACHI, T.; ITOH, K. Tensile strength of compacted and saturated soils using newly developed tensile strength measuring apparatus. **Soils Foundations**, v. 45, n. 6, p. 103–110, dez. 2005.

TANG, C.-S.; CUI, Y.-J.; SHI, B.; TANG, A.-M.; LIU, C. Desiccation and cracking behavior clay layer from slurry state under wetting-drying cycles. **Geoderma**, v. 166, n. 1, p. 111-118, 2011a.

TANG, C.-S.; CUI, Y.-J.; TANG, A.-M.; SHI, B. Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils. **Engineering Geology**, v. 114, n. 3, p. 261-266, 2010a.

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.; ZHAO, L. Z. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 1, p. 54-62, 2010b.

TANG, C.-S.; SHI, B.; LIU, C.; SUO, W. B.; GAO, L. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. **Applied Clay Science**, v. 52, n. n. 1-2, p. 69-77, abr. 2011b.

TANG, C.-S.; PEI, X. J.; WANG, D. Y.; SHI, B.; LI, J. Tensile strength of compacted clayey soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 141, n. 4, abr. 2015.

TANG, C.-S.; WANG, D.-Y.; SHI, B.; LI, J. Effect of wetting-drying cycles on profile mechanical behavior of soils with different initial conditions, **Catena**, v. 139, p. 105-116, 2016.
TAYLOR, G. D. **Materials in construction**. 2. ed. London: Longman Scientific & Technical, 1994.

THAKUR, V. K.; SINGHA, A. S. Natural fibres-based polymers: Part I – Mechanical analysis of Pine needles reinforced biocomposites. **Bulletin of Material Science**, v. 33, n. 3, p. 257–264, 2010.

TOLEDO FILHO, R. D.; GHAVAMI, K.; ENGLAND, G. L.; SCRIVENER, K. Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p. 185-196, 2003.

TOMCZAK, F. **Estudo sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil**. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

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 DAM, J. E. G. **Coir processing technologies**: improvement of drying, softening, bleaching and dyeing coir fiber/yarn and printing coir floor coverings. Technical paper nº 6. FAO: 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.

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.

WANG, D.–Y.; TANG, C.–S.; CUI, Y.–J.; SHI, B.; LI, J. Effects of wetting–drying cycles on soil strength profile of a silty clay in micro-penetrometer tests, **Eng. Geol.**, v. 206, p. 60-70, 2016.