



**UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**

**LUCAS CHAGAS PAES DE MENEZES**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO DE SOLO**  
**ARENO-ARGILOSO REFORÇADO COM FIBRAS DO COCO VERDE**

Recife, PE  
2018



**UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO  
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**

**LUCAS CHAGAS PAES DE MENEZES**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO ARENO-  
ARGILOSO REFORÇADO COM FIBRAS DO COCO VERDE**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Profa. Dra. Stela Fucale Sukar  
Co-orientador: Prof. Dr. Sílvio Romero de Melo  
Ferreira

Recife, PE  
2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Universidade de Pernambuco – Recife

**Epígrafe**

M543a

Menezes, Lucas Chagas Paes de  
Análise do comportamento mecânico de solo areno-  
argiloso reforçado com fibras do coco verde / Lucas Chagas  
Paes de Menezes. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2018.  
100 f.: il

Orientadora: Dra. Stela Fucale Sukar  
Co-orientador: Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.  
Dissertação (Mestrado - Construção Civil) Universidade  
de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil, 2018.

1. Solos Reforçados. 2. Fibras de Coco – Material  
Alternativo 3 Comportamento geomecânico I. Construção  
civil – Dissertação. II. Sukar, Stela Fucale (orient.) III.  
Ferreira, Silvio Romero de Melo (co-orient.) IV.  
Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado  
em Construção Civil. V. Título.

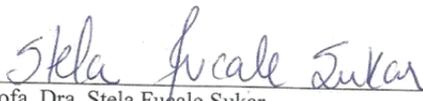
CDD: 624.15136

**LUCAS CHAGAS PAES DE MENEZES**

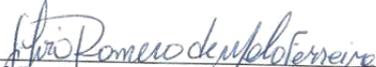
**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE UM  
SOLO REFORÇADO COM FIBRA DO COCO VERDE**

BANCA EXAMINADORA:

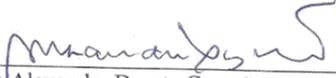
**Orientador(a):**

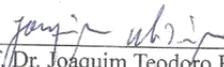
  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Stela Fucale Sukar  
Universidade de Pernambuco

**Co-orientador(a):**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira  
Universidade Federal de Pernambuco

**Examinadores:**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão  
Universidade de Pernambuco

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira  
Universidade Católica de Pernambuco

Recife, PE  
2018

## **Agradecimentos**

À minha mãe, Maria de Fátima, por toda a ajuda e paciência, e por acreditar sempre em minha capacidade.

Aos professores Stela Fucale e Sílvio Romero, pelas orientações imprescindíveis para a execução desse trabalho.

À equipe sempre presente no laboratório, Fábio Oliveira, Aline Cátia e Ingridy Nascimento, pelos auxílios em diversos momentos. À Danielle Barbosa, aluna de iniciação científica, pela colaboração e descontração nos dias de laboratório. À Manuely Oliveira, pela amizade e pelas ajudas. Ao amigo Santiago Lacerda, que mesmo distante, aguentou as conversas tarde da noite sobre os ensaios.

Ao Sr. Bezerra de Menezes e ao Sr. Marcos, da empresa Fortalmag, por fornecer as fibras utilizadas nessa pesquisa.

Aos meus colegas de turma que contribuíram e compartilharam tanto os bons quanto os maus momentos, ao longo desses dois anos de atividades.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização desta pesquisa.

## Epígrafe

“Você verá que é mesmo assim  
Que a história não tem fim  
Continua sempre que você  
Responde sim  
À sua imaginação  
A arte de sorrir  
Cada vez que o mundo diz: não”

Guilherme Arantes / Jon Lucien

MENEZES, Lucas Chagas Paes de. **Análise do comportamento mecânico de solo areno-argiloso reforçado com fibras do coco verde**. 2018. 99 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2018.

## RESUMO

O problema da instabilização de encostas tem trazido bastante preocupação aos gestores municipais e a sociedade em geral. Contudo, é importante encontrar soluções para estas questões. Uma delas pode ser a partir do uso de estruturas de solo reforçado, inserindo a este algum material que possa agregar à sua resistência. Fibras de diversas composições podem ser usadas para esse fim, porém, mais recentemente as fibras vegetais tem chamado atenção, devido à sua geração orgânica, não necessitando de materiais industrializados, além de possibilitar novos usos para resíduos agrícolas. Dentre as possibilidades de utilização destes resíduos está o aproveitamento em obras geotécnicas como material alternativo para melhoramento do solo. Esta pesquisa tem por objetivo analisar o comportamento mecânico de um solo areno-argiloso, coletado da encosta do Alto Reservatório em Nova Descoberta, Recife – PE, a partir da inserção de fibra da casca do coco verde, com misturas de 0,25, 0,5, 0,75 e 1% em relação ao peso do solo seco. O programa de investigação constou da coleta e preparação das amostras, caracterização física e mecânica (granulometria, limites de consistência, densidade real, compactação, resistência à compressão simples, à tração por compressão diametral, e ao cisalhamento direto). O solo é uma areia argilosa (SC), enquanto as misturas foram classificadas em areias siltosas (SM). Nos ensaios de compactação, constata-se que o aumento do teor de fibras ao solo provocou uma ligeira diminuição do peso específico e aumento da umidade ótima. Foi observado aumento da resistência à compressão simples com a inserção de fibras, sendo maior para 0,5% de teor de fibras (44% maior que o solo), e aumento da resistência à tração por compressão diametral para 0,75% de fibras (78%). Quanto aos ensaios de resistência ao cisalhamento direto, foram observadas que as curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para as misturas são típicas de material plástico com endurecimento. A adição das fibras não resultou em incrementos de resistência, havendo uma tendência de diminuição tanto do ângulo de atrito quanto da coesão, em relação às amostras de solo. Concluiu-se que as fibras de coco podem ser empregadas como alternativa ao melhoramento do solo, por interferir principalmente na propriedade dúctil desse material.

**Palavras-chave:** Solos reforçados. Fibras de coco. Materiais alternativos.

MENEZES, Lucas Chagas Paes de. **Analysis of the mechanical behavior of sandy clayey soil reinforced with coir fibers**. 2018. 99 p. Thesis (Master). Master in Civil Engineering – Polytechnic School of Pernambuco, Pernambuco University. Recife, 2018.

## ABSTRACT

The problem of slope instabilities has brought a lot of concern to municipal managers and society in general. Nevertheless, it is important to find solutions to these issues. One of them is possible by means of soil reinforcement, inserting to this some material that can add to its resistance. Fibers of various compositions can be used for this purpose, but more recently, vegetable fibers have attracted attention due to their organic generation, not requiring industrialized materials, as well as making possible new uses for agricultural residues. Among the possibilities of use of this waste is the use in geotechnical works as alternative material for soil improvement. This work aims to analyze the mechanical behavior of a clayey sand soil located on Alto do Reservatório hillside, in Nova Descoberta, Recife - PE, with the insertion of the green coir fiber, with mixtures of 0,25, 0,5, 0,75 and 1% by weight of dry soil. The program of this research consisted of the collection and preparation of the samples, physical and mechanical characterization (granulometry, limits of consistency, real density, compaction, and unconfined compression, indirect tensile and direct shear strengths). The soil is classified as clayey sands (SC), while the mixtures, silty sands (SM). With the compaction tests, it was found that the increase of the soil fiber content caused a slight decrease in the maximum dry density and increase of the moisture. It was observed an increase in the unconfined compression strength with fiber insertion, being higher to 0,5% fiber content (44% higher than the soil), and increased tensile strength to 0,75% fibers (78%). Regarding the direct shear strength tests, it was observed that shear stress versus horizontal displacement curves for the blends are typical of hardened plastic material. The addition of coir fibers did not result in resistance increments, with a tendency to decrease both the friction angle and the cohesion in relation to the soil samples. It was concluded that coconut fibers can be used as an alternative to soil improvement because it interferes mainly in the ductile property of this material.

**Keywords:** Reinforced soils. Coir fibers. Geotechnics. Alternative materials.

## LISTA DE FIGURAS

Firgua 1 - Diferentes procedimentos de reforço de solos.....	20
Figura 2- Representação do mecanismo de alongamento e ruptura das fibras.....	21
Figura 3 – Disposição das fibras nas zonas de ruptura referentes aos ensaios de resistência à compressão diametral e simples. ....	24
Figura 4 – Corte longitudinal do coco. ....	28
Figura 5 – Usina de beneficiamento da casca do coco. ....	30
Figura 6 - Fluxograma operacional da produção de substrato agrícola e fibra do coco.....	32
Figura 7 – Amostras de fibras do coco verde (esq.) e do coco seco (dir.).....	34
Figura 8 – Curvas tensão-deformação de solo com fibras de polipropileno (A) e fibras do coco (B). ....	37
Figura 9 - Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal, e envoltórias de resistência das misturas.....	38
Figura 10 – Efeito dos teores e comprimentos das fibras nas amostras. ....	39
Figura 11 - Amostras de fibras de coco extraídas da casca (esq.) e cortadas (dir.).....	39
Figura 12 - Curvas de compactação do solo e da fibra do coco. ....	40
Figura 13 - Envoltórias do solo e misturas. ....	40
Figura 14 - Envoltórias de resistência para diferentes teores de fibras. ....	41
Figura 15 - Curvas de compactação do solo e misturas. ....	42
Figura 16 - Valores da resistência à tração por compressão diametral (A) e à compressão simples (B).....	42
Figura 17 - Curva tensão-deformação de solo reforçado com fibras de coco de 20 mm (a) e 25 (b) . ....	43
Figura 18 - Resistências à compressão simples para diferentes teores de fibras de coco. ....	45
Figura 19 - Envoltórias de resistência a da areia e misturas (AGUILAR, 2015). ....	45
Figura 20 – Curvas tensão versus deformação específica do ensaio de resistência à compressão simples. ....	47
Figura 21 – Curvas carga versus deformação do ensaio de resistência à tração por compressão diametral. ....	47
Figura 22 - Máximas resistências das fibras de coco, de vidro e de sacos de cimento. ....	48
Figura 23 – Programa de investigação experimental realizado na pesquisa. ....	51
Figura 24 - Processo de coleta do solo (A) e as fibras de coco verde fornecidas (B). ....	52
Figura 25 - Solo e fibras antes da homogeneização. ....	53
Figura 26 - Moldagem do corpo de prova para o ensaio de compressão simples (A); corpos de prova após compactação (B) e durante o ensaio (C). ....	55
Figura 27 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral do solo.....	56
Figura 28 - Critério de definição do módulo de elasticidade do solo (adaptado de FREITAS, 2016). ....	57
Figura 29 – Moldagem de corpo de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento direto (A) e Prensa do ensaio de resistência ao cisalhamento direto (B). ....	57
Figura 30 – Definição da tensão de cisalhamento de ruptura (DE CAMPOS e CARRILLO, 1995). ....	58
Figura 31 - Curva granulométrica do solo e misturas. ....	59
Figura 32 - Curvas de compactação do solo e misturas. ....	62
Figura 33 - Curvas tensão versus deformação específica axial do solo e misturas. ....	64
Figura 34 – Curvas tensão média versus deformação específica do ensaio de resistência à compressão simples. ....	65
Figura 35 - Variação dos valores da resistência à compressão simples em demais pesquisas da literatura.....	66

Figura 36 – Intervalos a 95% das resistências à compressão simples. ....	67
Figura 37 – Comportamento do módulo de elasticidade e da resistência à compressão simples conforme adição de fibras do coco. ....	67
Figura 38 - Modo de rupturas ocorridas nas amostras de Solo (a), S+0,5% (b) e S+1% (c) quando submetidas à compressão simples. ....	68
Figura 39 – Tensão diametral versus deformação específica do solo e misturas. ....	70
Figura 40 – Curvas tensão média versus deformação específica do ensaio de resistência à tração por compressão diametral. ....	71
Figura 41 - Variação dos resultados da resistência à tração por compressão diametral. ....	71
Figura 42 – Intervalos de confiança a 95% das resistências à tração por compressão diametral. ....	72
Figura 43 – Comportamento da resistência à tração por compressão diametral e do módulo de rigidez com a inserção de fibras. ....	73
Figura 44 - Modo de ruptura do solo (A) e S+0,75% (B) quando submetidos à compressão diametral. ....	73
Figura 45 – Variação das RCS e RTCD por teor de fibras. ....	74
Figura 46 - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (A), e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (B) do Solo. ....	75
Figura 47- Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (A) e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (B) da amostra S+0,25%. ....	76
Figura 48 - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (A) e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (B) da amostra S+0,5%. ....	76
Figura 49 - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (A) e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (B) da amostra S+0,75%. ....	77
Figura 50 - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (A) e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (B) da amostra S+1%. ....	77
Figura 51 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para as diferentes tensões. ....	78
Figura 52 - Envoltórias de resistência Mohr-Coulomb: A) para tensões cisalhantes máximas; B) deslocamento horizontal de 5 mm; e C) deslocamento horizontal de 10 mm. ....	80
Figura 53 – Síntese dos valores de coesão e ângulo de atrito para diferentes teores e níveis de deslocamento de 5 mm e 10 mm, e resistência máxima). ....	81
Figura 54 – Comportamento da coesão e ângulo do atrito com a adição de fibras em diferentes estudos. ....	82

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Comparação das propriedades das fibras naturais e sintéticas.....	22
Quadro 2 - Vantagens e desvantagens do emprego de fibras vegetais na geotecnia.....	26
Quadro 3 - Equipamentos da usina.....	31
Quadro 4 – Quantitativo de ensaios.....	51
Quadro 5 - Resumo das principais características físicas e mecânicas dos materiais. ....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química das fibras vegetais responsável pela resistência.....	27
Tabela 2 – Produção de coco verde na Região Metropolitana de Recife.....	29
Tabela 3 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais e sintéticas.....	33
Tabela 4 – Composição química das fibras do coco responsável pela resistência.....	35
Tabela 5 – Propriedades físicas e mecânicas da fibra do coco.....	36
Tabela 6 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento direto de um solo reforçado com fibras de coco de 20 mm.....	44
Tabela 7 - Resultados do ensaio de compressão simples.....	44
Tabela 8 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento da areia pura e as misturas com 0,5% de fibra de coco impermeabilizada e não impermeabilizada.....	46
Tabela 9 - Valores da densidade seca máxima e umidade ótima em pesquisas da literatura referentes a misturas solo-fibra do coco.....	49
Tabela 10 – Resumo das principais pesquisas da literatura referente à resistência do solo e misturas solo-fibra do coco.....	50
Tabela 11 – Identificação das amostras e composição das misturas.....	54
Tabela 12 – Frações granulométricas do solo e misturas.....	60
Tabela 13 - Densidade real do solo, fibras e misturas.....	60
Tabela 14 - Resultado dos limites de Consistência.....	60
Tabela 15 – Valores do peso específico aparente seco e umidade ótima do solo e das misturas.....	62
Tabela 16 – Resumo dos dados obtidos no ensaio de resistência à compressão simples.....	63
Tabela 17 – Resumo dos dados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	69
Tabela 18 – Comparação entre os valores das resistências à compressão simples e diametral.....	74
Tabela 19 - Valores de coesão e ângulo de atrito para a resistência máxima e a diferentes níveis de deslocamento do solo e das misturas.....	80
Tabela 20 – Valores detalhados das pesquisas que realizaram ensaio de cisalhamento direto para solos reforçados com fibras do coco.....	82

## **LISTAS DE SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ASTM – American Society for Testing and Materials  
CD – Cisalhamento direto  
CP – Corpo de prova  
CS – Compressão simples  
LCCV – Líquido da casca do coco verde  
ME – Módulo de elasticidade  
MR – Módulo de rigidez  
RCD – Resistência ao cisalhamento direto  
RCS – Resistência à compressão simples  
RMR – Região metropolitana de Recife  
RTCD – Resistência à tração por compressão diametral  
SUCS – Sistema unificado de classificação de solos  
TCD – Tração por compressão diametral  
TRB – Transportation Research Board

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Considerações iniciais .....	15
1.2 Justificativa.....	17
1.3 Objetivos.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
2.1 Reforço de solos .....	19
2.2 Fibras como material de construção .....	20
2.3 Fibras vegetais .....	24
2.4 Fibras do coco verde.....	27
2.4.1 Coco: produção e geração de resíduos .....	27
2.4.2 Extração da fibra de coco .....	30
2.4.3 Propriedades físicas, químicas e mecânicas da fibra do coco .....	33
2.4.4 Estudos sobre a resistência de solos com fibras de coco .....	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	51
3.1 Introdução.....	51
3.2 Coleta do solo e aquisição das fibras.....	52
3.3 Preparação dos materiais .....	52
3.4 Caracterização física e mecânica do solo e compósitos .....	54
3.4.1 Ensaio de resistência à compressão simples.....	55
3.4.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	56
3.4.3 Ensaio de resistência ao cisalhamento direto .....	57
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	59
4.1 Propriedades físicas do solo e misturas .....	59
4.1.2 Análise granulométrica.....	59
4.1.2 Densidade real .....	60
4.1.3 Limites de Consistência.....	60
4.1.4 Compactação Proctor Normal .....	61
4.2 Propriedades mecânicas do solo e das misturas .....	63
4.2.1 Resistência à compressão simples .....	63
4.2.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	68
4.2.2 Resistência à compressão simples versus resistência à compressão diametral .....	73
4.2.3 Ensaio de resistência ao cisalhamento direto .....	74
4.2.4 Resumo da influência da adição das fibras da casca do coco verde nas características físicas e mecânicas do solo.....	83
5. CONCLUSÕES .....	84
5.1 Principais conclusões .....	84

5.2 Sugestões para pesquisas futuras:.....	85
REFERÊNCIAS .....	86
Apêndice A – Índices físicos dos corpos de prova do ensaio de compressão simples... 97	
Apêndice B - Índices físicos dos corpos de prova do ensaio de tração por compressão diametral.....	98
Apêndice C - Índices físicos dos corpos de prova do ensaio cisalhamento direto. ....	99

## **1. INTRODUÇÃO**

Neste capítulo apresentam-se conceitos sobre a busca pela sustentabilidade na construção civil, baixa de capacidade de carga de alguns tipos de solo e problemas de encostas na cidade de Recife-PE. São indicadas ainda as justificativas que motivaram a execução da pesquisa, ao apresentar uma nova alternativa de destinação da casca do coco verde, para o melhoramento de solos, assim como os objetivos da mesma.

### **1.1 Considerações iniciais**

A utilização do solo como material de construção é uma solução bastante empregada na engenharia civil. Alguns solos, porém, de forma geral, em seu estado natural, apresenta baixa resistência a esforços. Essa característica se intensifica quando fatores antrópicos surgem, como retirada da vegetação que cobre o solo, erosão, altas declividades, alterações das condições de drenagem e ocupação desordenada, que acontece bastante em regiões periféricas de grandes cidades, situadas em regiões de morro. Ocasiona, portanto, diversos problemas socioambientais, como a multiplicação de bairros com infraestrutura deficiente, habitações situadas em áreas de risco e alterações nos sistemas naturais (SOUZA, 2014). Situação bastante comum em regiões periféricas de diversas metrópoles brasileiras.

A Região Metropolitana de Recife (RMR) tem 15 municípios (PERNAMBUCO, 2017), dos quais Recife, Camaragibe e Jaboatão dos Guararapes apresentam maiores números de pessoas morando em áreas de risco de escorregamento de encostas (BANDEIRA, 2010). Recife tem 140 pontos em áreas de morro com risco alto de deslizamento, presentes em 55 dos 91 bairros do município. Em 2016, 263 deslizamentos de encostas foram registrados pela Secretaria de Defesa Civil do Recife, e 79 em 2017 (SEDEC, 2018). Essas áreas de encostas habitadas correspondem a 30 km<sup>2</sup> (15%) (FERREIRA; LIMA, 2005). Em 2005, cerca de 80 mil casas estão construídas em áreas de morro, onde moram quase 400 mil habitantes. Dessas construções, 27 mil estão em áreas de risco. Outras 2,1 mil apresentam perigo iminente. Portanto, trata-se de um problema relevante para a cidade devido ao custo para recuperação dessas áreas de risco.

As unidades geomorfológicas observadas na RMR são, principalmente de planícies, com presença de encostas e morros, na zona norte e oeste da cidade (SOUZA, 2013). Segundo

Gusmão Filho (1997) apud Ferreira e Lima (2005), na RMR, tem sido observado deslizamentos em solos, principalmente em períodos chuvosos e onde a forma de ocupação das encostas são os principais fatores que contribuem para as ocorrências dos movimentos de massa e dos processos erosivos, sendo a erosão hídrica pluvial e os escorregamentos planares os principais processos de instabilidade de encostas. Entre os anos de 1990 e 2000, houve 150 óbitos e mais de 9000 desabrigados na região metropolitana do Recife. Entre 1994 e 2005 foram registradas 100 mortes em toda RMR (SANTANA, 2006).

A região do Alto do Reservatório, região de onde o solo em estudo nesta pesquisa provém, tem históricos de deslizamentos de encostas. Em 1996, houve um deslizamento na encosta oposta, voltada para o Córrego do Boleiro, deixando cerca de 1000 pessoas desabrigadas e 16 mortas, mobilizando um volume de solo estimado em 50.000 m<sup>3</sup> (GUSMÃO FILHO, 1997 apud MEIRA, 2006). Em 2012, a encosta Alto do Reservatório foi considerada com alto grau de risco de deslizamento. Por essas razões, sido foco de investimentos de monitoramento e prevenção de deslizamentos, assim como em outras regiões na Zona Norte da cidade. Portanto, a Engenharia Civil tem o desafio de estudar e contornar essas situações, propondo soluções adequadas e viáveis.

Não há dúvidas de que todas as áreas e atividades do conhecimento estão buscando incluir em seus processos, materiais e metodologias mais sustentáveis. Desde a criação de novas tecnologias, que necessitem de menos matérias primas, até o reaproveitamento de resíduos de um determinado processo anterior, como matéria-prima para atividades posteriores.

A engenharia geotécnica, como sendo uma das áreas que mais incorpora matérias-primas em toda a engenharia, também pode e deve buscar formas de tornar sua aplicação mais sustentável, devido a sua importância prioritária em um projeto de construção civil (MISRA; BASU, 2011).

Levando em conta que a sustentabilidade é determinada por dois fatores: suficiência de recursos (o quanto uma prática ou atividade pode ser realizada à taxa de consumo atual) e integridade funcional (o quanto uma prática ameaça a capacidade de regeneração de um sistema), é preciso que a engenharia geotécnica reanalise suas aplicações e metodologias, principalmente tratando-se dos recursos por ela utilizados (MISRA; BASU, 2011).

Segundo Misra e Basu (2011), para a engenharia geotécnica, a sustentabilidade pode se traduzir em quatro práticas principais: (i) aprimorar projetos e construções que geram algum fardo financeiro e inconveniência para a sociedade; (ii) diminuir uso de recursos e energia no planejamento, projeto, construção e manutenção de instalações geotécnicas; (iii) usar materiais e métodos que causam o mínimo de impacto negativo no ambiente; e (iv) utilizar sempre que possível alternativas geotécnicas para minimizar o desperdício.

A melhoria sustentável do solo é uma das vertentes que podem gerar impactos positivos na área em questão, por meio da introdução de novos materiais não poluentes, e do reuso de resíduos. Surge então o desafio de se testar e qualificar o uso desses materiais junto ao solo, do ponto de vista geotécnico. Porém, a falta de aplicabilidade e de procura por materiais alternativos é agravada pela escassez de literatura (Abreu et al., 2008), o que exige das universidades e corporações envolvidas, a realização de pesquisas que possam embasar o uso dessas melhorias.

Portanto, é necessário que novos materiais, não perigosos e naturalmente produzidos, sejam testados e avaliados para o uso na engenharia civil, reaproveitando-se resíduos potencialmente reutilizáveis, sendo esse o propósito principal dessa pesquisa.

## **1.2 Justificativa**

A utilização das fibras vegetais na geotecnia vem sendo estudada com mais ênfase nos últimos anos, devido à procura de novos materiais e à geração de resíduos que a produção agrícola pode causar. Para a substituição do uso de material sintético, que implica na redução do gasto de energia para produzi-lo, por um material orgânico, gerado pelo consumo de alguma espécie vegetal, faz-se necessário estudos dedicados em obter conclusões e parâmetros sobre a viabilidade do uso desses materiais.

Essa pesquisa vem acrescentar a um conjunto de trabalhos realizados no local, como a de LAFAYETTE (2000), que buscou caracterizar o comportamento Mecânico do solo; a de LIMA (2002), que além de caracterizar geomecânicamente o solo, analisou a estabilidade da encosta; a de MOURA (2011), que investigou a interação entre solo da região reforçado com pneus, como estrutura de contenção; e Macedo (2016), que estudou a resistência ao cisalhamento de solo da região reforçado com pneu e resíduos da construção e demolição.

### **1.3 Objetivos**

A pesquisa tem por objetivo geral analisar o comportamento físico e mecânico de compósitos constituídos de solo e fibras do coco verde, que possam ser utilizados em obras de estabilização de solos.

Quanto aos objetivos específicos, pode-se destacar os seguintes:

- analisar as propriedades físicas do solo e das mistura solo-fibra;
- avaliar o comportamento mecânico do solo e das misturas;
- identificar o teor de fibra mais adequado para o melhoramento do solo investigado.

### **1.4 Estrutura da dissertação**

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos. O Capítulo 1 aborda brevemente a problemática de situações de áreas de encostas na cidade do Recife, a busca por materiais mais sustentáveis na construção civil. Apresenta também os objetivos, a metodologia e a organização deste trabalho.

O Capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica, onde será abordado o tema reforço de solos, fibras como material de construção, e características das fibras vegetais. Aborda a fibra do coco verde, suas propriedades, e pesquisas da literatura utilizando-a como material para reforço de solos.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos utilizados para a realização da pesquisa, descrevendo o processo de coleta e preparação dos materiais, a metodologia dos ensaios e normas seguidas.

O Capítulo 4 exhibe os resultados e as correspondentes análises, apresentando os dados e as avaliações da inserção das fibras ao solo.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões acerca da pesquisa.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Aborda-se nesse capítulo o método de reforço de solos com fibras, suas definições e propriedades gerais; um breve histórico de trabalhos documentados sobre a utilização de fibras em solos; uma revisão sobre as definições e propriedades gerais relacionadas com a melhoria e o reforço de solos, assim como dos materiais compósitos fibrosos. Também se apresenta alguns trabalhos e resultados de pesquisas utilizando a fibra de coco como reforço de solos.

### 2.1 Reforço de solos

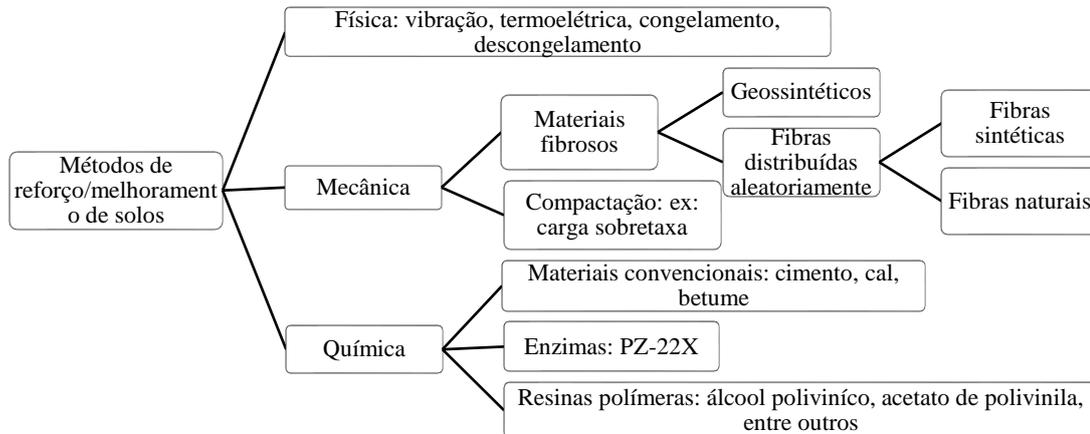
Devido à falta de capacidade de alguns solos, faz-se necessário em determinados casos a estabilização dos solos, ou seja, alteração das propriedades do solo de forma a criar um material capaz de responder às necessidades da tarefa prevista (CRISTELO, 2001).

Segundo Guedes (2013) estabilizar um solo é realizar uma alteração da matriz, a partir de uma modificação da estrutura do solo. Essa alteração da característica original pode ser física (estabilização granulométrica), físico-química (uso de misturas ou compósitos, como, por exemplo, solo-cimento-fibra), química (adição de cal, cimento, dentre outros) ou mecânica (compactação). É importante diferenciar o significado dos termos “melhoramento” e “reforço”, uma vez que este corresponde à utilização de coluna de pedra, grelhas plásticas, geossintéticos, colunas de brita, estacas e terra armada, entre outros, com principal finalidade de tornar possível o solo suportar determinadas solicitações às quais por si só não está habilitado a resistir; enquanto aquele está associado ao tratamento por meio de processos químicos, físicos ou mecânicos, que alterarão alguma ou algumas das propriedades intrínsecas dos solos, por meio da utilização de rebaixamento do lençol freático, aceleração da consolidação, tratamentos químicos, térmicos, entre outros (CASAGRANDE, 2005; MAHESHWARI; SOLANKI, 2009).

Hejazi *et al.* (2011) citam a estabilização de solo como “um procedimento em que aditivos naturais ou sintéticos são utilizados para melhorar as propriedades do solo”, e tipificam esse procedimento em três formas diferentes, como mostra a Figura 1.

O reforço de solos constitui provavelmente uma das técnicas mais antigas. Mesopotâmicos e Romanos, em tempos diferentes, descobriram que era possível melhorar a estrutura das ruas da época misturando o solo com aditivos, como calcário ou cálcio pulverizado (estabilização química) (ENZINE ARTICLES, 2010).

Figura 1 - Diferentes procedimentos de reforço de solos.



Fonte: HEJAZI *et al.* (2011).

Um dos processos de estabilização se dá pela introdução de materiais externos ao solo, com propriedades definidas anteriormente, como as fibras que, apesar de serem utilizadas há muito tempo, a partir de 1940 sua aplicação tem sido difundida, gerando interesse em mais estudos sobre suas características e de como estas podem influenciar no comportamento geotécnico do solo (BUTT; MIR; JHA, 2015). Entretanto, devido a questões ambientais e econômicas, a busca por materiais mais ecológicos tem gerado o interesse por utilização de fibras naturais, necessitando de maiores estudos sobre o comportamento mecânico dessas fibras em conjunto com o solo.

## 2.2 Fibras como material de construção

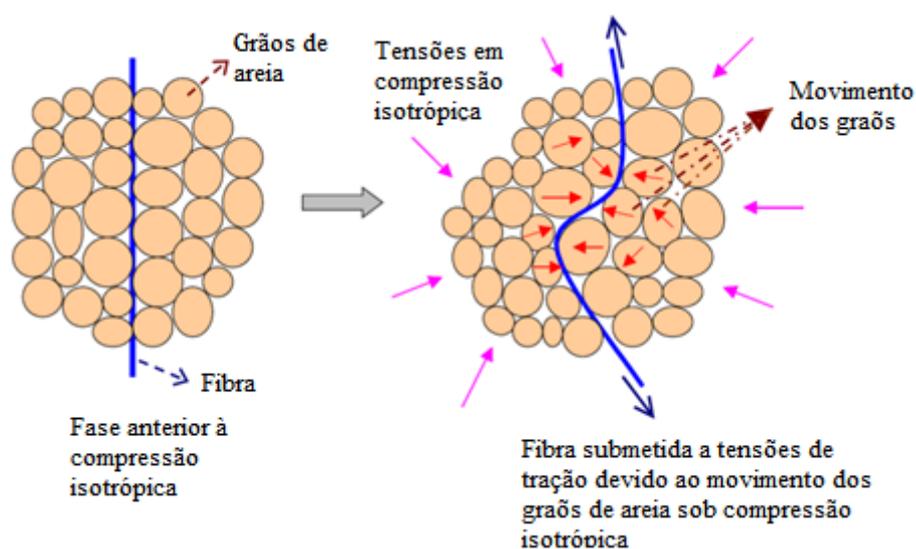
Os compósitos, materiais obtidos pela associação de dois ou mais componentes com características distintas, têm impacto significativo nos campos da engenharia e tecnologia, como demonstra as propriedades combinadas entre dois materiais diferentes, fibras e a matriz do solo; propriedades estas que não podem ser obtidas por cada componente isolado (SALIT, 2014). Os compósitos são constituídos por duas fases: a matriz (ex: solo, concretos, silicones, argamassas) e o elemento de reforço (ex: fibras, aço, fragmentos de borracha, pneus, isopor).

A incorporação de fibras em matrizes frágeis resulta em benefícios ao material, como por exemplo aumento da capacidade de absorver energia antes da ruptura, aumentando a capacidade

de carga e resistência à compressão simples, e melhoria de algumas características mecânicas (CABALA, 2007).

A Figura 2 exemplifica estas observações. As tensões aplicadas em compressão isotrópica causam um rearranjo das partículas do solo, e estas impõem tensões nas fibras localizadas entre os grãos, que se alongam através de tensões de tração (CASAGRANDE, 2005).

Figura 2 - Representação do mecanismo de alongamento e ruptura das fibras.



Fonte: CASAGRANDE (2005).

As fibras sintéticas, como as de polipropileno, polietileno e poliamida, são as mais utilizadas em tecidos geotêxteis, pois sua durabilidade e propriedades físicas e químicas são características importantes que viabilizam sua aplicação (CARVALHO et al, 2015).

Entretanto, fibras sintéticas podem ser consideradas agentes poluentes do solo, quando avaliadas suas desvantagens, como sendo materiais não biodegradáveis. Por serem oriundas de fontes não renováveis, uma vez que são subprodutos do petróleo e este varia de preço, sua utilização pode resultar num aumento de custos (CARVALHO et al., 2015), além de gerar dióxido de carbono em sua produção.

Alguns fatores comparando as vantagens e desvantagens do uso de fibras naturais e sintéticas como reforço em materiais compósitos foram estudados por Tomczak (2010), e mostrou-se que as vantagens das fibras naturais são válidas frente às desvantagens, vistos no Quadro 1.

Quadro 1 - Comparação das propriedades das fibras naturais e sintéticas.

Característica	Tipos de fibra	
	Fibras naturais	Fibras sintéticas
Densidade	Baixa	Alta
Custo	Baixa	Alto
Reciclabilidade	Alta	Baixa
Consumo de energia	Baixo	Alto
Abrasão dos equipamentos	Baixo	Alto
Riscos quando inalados	Nulo	Alto
Biodegradabilidade	Alto	Nenhum

Fonte: TOMCZAK (2010).

Bolaños (2013) traz algumas características relevantes que devem ser observadas quanto à adição de fibras em solos, uma vez que são determinantes para o desempenho do compósito, interferindo na forma como as fibras atuam:

- Teor de fibra: quanto maior for o teor de fibra, maior será o ganho de resistência mecânica, até certo ponto, a partir do qual este ganho não será mais observado. Em outras palavras, existe um teor ótimo de fibra que confere melhor resistência. O alto teor de fibras confere maior resistência pós-fissuração e menor dimensão das fissuras, desde que as fibras possam absorver as cargas adicionais causadas pela fissura (GRAY; OHASHI, 1983; GRAY; AL-REFEAI, 1986; ULBRICH, 1997; SPECHT, 2000; SANTONI *et al.*, 2001; CASAGRANDE, 2001; VENDRUSCOLO, 2003; CONSOLI & CASAGRANDE, 2007; AGUILAR, 2015;).

- Orientação das fibras: Uma das principais vantagens da utilização de fibras distribuídas aleatoriamente é a manutenção da resistência isotrópica e a ausência de planos de fraqueza que podem ser desenvolvidos em sistemas de reforço orientado (GRAY; MAHER, 1989 apud AGUILAR, 2015).

- Módulo de elasticidade da fibra: Segundo McGrown et al (1978) apud Aguilar (2015), o elemento de reforço pode ser de dois tipos: i) extensível, aquele que apresenta deformação de ruptura maior que a máxima deformação de tração no solo sem reforço. Ele aumenta a ductibilidade e diminui a perda de resistência pós-pico, além de acrescentar resistência mecânica; ii) não extensível, que apresenta deformação de ruptura menor que a máxima deformação de tração no solo sem reforço, conferindo ao compósito ganho de resistência mecânica, não impedindo que grandes rupturas possam surgir.

- Aderência entre a fibra e a matriz: as características de resistência, deformação e padrões de ruptura de uma grande variedade de compósitos reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz (CASAGRANDE, 2005). As fibras devem estar bem aderidas à matriz do compósito para que sua resistência à tração seja mobilizada. Uma alta aderência entre a fibra e a matriz reduz o tamanho das fissuras e amplia sua distribuição pelo compósito (AGUILAR, 2015).

- Comprimento da fibra: quanto maior for o comprimento das fibras, maior será o ganho de resistência mecânica, até um limite assintótico (GRAY; OHASHI, 1983; ULBRICH, 1997; SANTONI *et al.*; 2001; HEINECK, 2002; VENDRUSCOLO, 2003); além disso menor será a possibilidade de elas serem arrancadas (CASAGRANDE, 2005).

- Resistência da fibra: aumentando a resistência das fibras, aumenta-se também a ductilidade do compósito, assumindo que não ocorra o rompimento das ligações de aderência. A resistência necessária dependerá das características pós-fissuração necessárias, bem como do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz (CASAGRANDE, 2005).

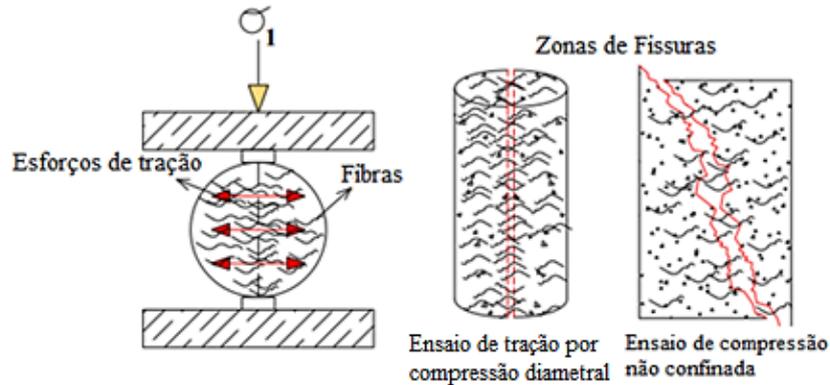
Portanto, tanto as características do solo, como granulometria, graduação, uniformidade, podem influenciar o aumento da resistência do compósito, como também as características da fibra. Segundo Taylor (1994), as fibras não evitam a formação de fissuras, mas controlam a propagação destas por meio do incremento de resistência à tração, pois as fibras tendem a manter juntas as interfaces das fissuras, aprimorando as propriedades mecânicas do solo, tornando-o um material mais dúctil.

Segundo Caputo (1987), para aumentar a resistência do solo, deve-se atuar no ângulo de atrito interno, ou na coesão, ou em ambos, tendo em vista que esses parâmetros dependem das propriedades acima citadas.

Uma característica importante a ser analisada ao se incluir fibras em misturas com solo é a forma que as rupturas acontecem quando realizados ensaios mecânicos, com o objetivo de entender como as fibras agem como material de reforço. A análise visual do aumento da ductibilidade do fibrossolo é interessante, e foi utilizada por outros autores, como Feuerharmel

(2000), Festugato (2008) e Corte (2013). A Figura 3 mostra as prováveis rupturas que ocorrem durante esses ensaios.

Figura 3 – Disposição das fibras nas zonas de ruptura referentes aos ensaios de resistência à compressão diametral e simples.



Fonte: GUEDES; COUTINHO; FONSECA (2016).

### 2.3 Fibras vegetais

As fibras vegetais englobam todos os tipos de fibras provindas de plantas, gramíneas, culturas agrícolas, entre outras (SALIT, 2014). Subprodutos da produção de abacaxi, banana, arroz, cana-de-açúcar, sisal, coco, são conhecidos por sua possibilidade de uso em outros compostos.

A utilização de fibras vegetais é relatada há bastante tempo. Em 4.000 a.C., os papiros utilizados pelos egípcios eram feitos por fibras de plantas, assim como se utilizavam fibras vegetais para o reforço em tijolos utilizados na construção (HERAKOVITCH, 1998 apud SALITA, 2014), assim como hastes de bambu e junco eram empregadas no reforço de tijolos de barro e solos granulares para auxiliar na construção de diversas obras de terra (CASAGRANDE, 2005). O capim, palha de arroz ou crina de cavalo, eram utilizados na fabricação de tijolos ou no reforço de paredes (STAEL, 1997).

Outro exemplo antigo de reforço de solos situa-se na cidade antiga de Agar-Quf, atualmente chamada de Dur-Kurigalzu, Iraque (distante 5 km de Bangladesh), onde foi construído o Zigurate, templo de religiões antigas (ESTABRAGH, 2012), e a torre de Agar-Quf, construídos empregando-se camadas intercaladas de solo e mantas de juncos utilizados na forma de cordas

entrançadas de aproximadamente 100 mm de diâmetro que passaram através da estrutura e agiram como reforço (JONES, 1996).

Indícios do emprego desta técnica também são encontrados em partes da Grande Muralha da China. De acordo com Jones (1996), parte da muralha, que foi concluída cerca de 200 a.C., contém exemplos de solo reforçado, neste caso, tijolos foram feitos de mistura de argila e cascalho reforçado com ramos de tamarisco.

Avançando no tempo, na década de 30, Henry Ford, fundador da famosa linha de automóveis, utilizou fibras da soja na composição da carroçaria dos carros, devido a razões econômicas. Na mesma época, mantas de algodão foram utilizadas pelo Departamento de Estradas da Carolina do Sul, Estados Unidos, como reforço de camadas asfálticas em pavimentos (PALMEIRA, 1992).

Mais recentemente, fibras de coco foram usadas para fabricação de biomantas de uso para contenção de deslizamento de terras, na Bahia (FÁBIO, 2013). Nesse caso, a biomanta funciona como “folhas acumuladas no chão, protegendo sementes que possam crescer no local”.

A importância do aproveitamento das fibras vegetais, tanto na área da engenharia quanto na indústria têxtil e outros, foi enfatizada em 2009, considerado pela Assembleia Geral das Nações Unidas o “Ano Internacional das Fibras Naturais” (PIRES, 2009). As fibras vegetais podem ter aplicação em muitos setores na engenharia, como camadas de pavimentação, paredes de contenção, proteção de encostas, fundação, estruturas anti-terremoto, entre outras (KALITA, 2016).

Elas apresentam vantagens em comparação com materiais de reforço de solos mais convencionais, como vidro e carbono, contudo também apresentam algumas desvantagens, citadas no Quadro 2. A degradação é uma das maiores restrições que qualquer produto natural possui ao se comparar tipos de fibras sintéticas para reforço, sobretudo em obras de longa vida útil. A perda das propriedades mecânicas das fibras naturais, devido, por exemplo, ao ataque de bactérias, é uma grande desvantagem na utilização destas fibras.

Quadro 2 - Vantagens e desvantagens do emprego de fibras vegetais na geotecnia.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Ecológicas e renováveis;	As fibras se degradam depois de ser armazenada por um longo período;
Baixo custo (ou baixo custo por volume);	A alta absorção de umidade (higroscopicidade);
Completamente biodegradáveis;	Baixa resistência à umidade;
Não tóxicas;	Baixa estabilidade térmica;
Fácil manuseio, baixa densidade e peso leve	Fraca adesão em seu estado natural a inúmeras matrizes;
Característica não abrasiva durante processamento e uso;	Necessidade de tratamentos químicos, mecânicos ou térmicos para serem utilizadas como reforço de compósitos cimentícios.
Bom isolamento contra calor e ruído;	
Propriedades de resistência específicas aceitáveis;	

Fonte: BOLAÑOS (2013).

Mas também existem obras provisionais de solo que precisam de um reforço adicional, é aqui onde as fibras vegetais podem ter uma maior área de atuação (SOTOMAYOR; CASAGRANDE, 2014). Reforço de aterros de conquista sobre solos moles, camadas de solo para revegetação de áreas afetadas pelo tráfego de máquinas ou proteção temporal contra a erosão em taludes podem ser algumas das aplicações que as fibras vegetais podem oferecer.

Alguns componentes químicos das fibras vegetais são responsáveis por sua resistência e durabilidade. Faz-se importante citar três deles, por formarem a parede celular: a lignina, a celulose e a hemicelulose. A lignina é um polímero complexo de estrutura amorfa que une as fibras celulósicas, formando a parede celular. Esse componente fornece resistência à compressão ao tecido celular e às fibras, enrijecendo a parede celular e protegendo os carboidratos (açúcares) contra danos físicos e químicos. Sua concentração nas fibras influencia a estrutura, as propriedades, a morfologia, a flexibilidade, a taxa de hidrólise, e inclusive a sua durabilidade, pois devido ao seu alto teor, pode ter uma vida útil no campo de 4 a 10 anos (MAURYA *et al.*, 2015).

A celulose é o constituinte mais abundante da parede celular vegetal (OGATA, 2013), também confere resistência à fibra, por ser a associação de diversos polímeros que compõe o vegetal, sendo muito resistente à tração, e bastante insolúvel. A hemicelulose é responsável pela degradação da fibra, pois é a fração atacada por microorganismos (NOGUERA *et al.*, 2000

apud BOLAÑOS, 2013), portanto, menor sua quantidade, menos possibilidade de degradação. A Tabela 1 mostra os percentuais desses componentes de algumas fibras vegetais.

Tabela 1 - Composição química das fibras vegetais responsável pela resistência.

<b>Fibra</b>	<b>Celulose (%)</b>	<b>Hemicelulose (%)</b>	<b>Lignina (%)</b>
Abacaxi	81	-	12,7
Bagaço da cana	55,2	16,8	25,3
Bambu	26-43	30	21-31
Cinza do arroz	35-45	19-25	20
Curauá	73,6	9,9	7,5
Juta	61-71	14-20	12-13
Sisal	65	12	9,9

Fonte: MOHAMMED et al., 2015.

## 2.4 Fibras do coco verde

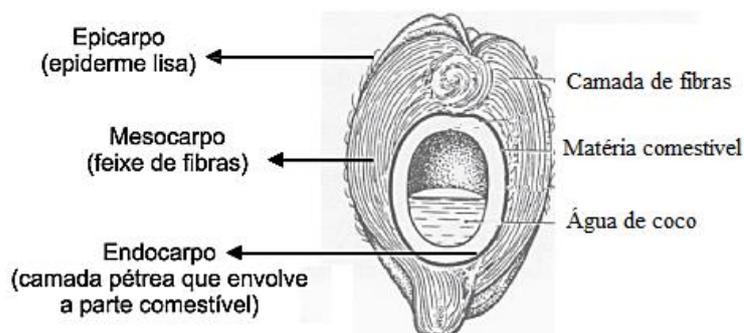
### 2.4.1 Coco: produção e geração de resíduos

O coqueiro é uma das plantas frutíferas mais difundidas naturalmente no globo terrestre, ocorrendo em praticamente todos os continentes, mais concentrado em regiões tropicais da Ásia e leste da África, e também encontrado na América Latina, em menor escala. Em virtude desta dispersão e adaptabilidade, seu cultivo e sua utilização se dão de forma expressiva em todo o mundo, com os mais variados produtos, tanto de forma *in natura* quanto industrializada (EMBRAPA, 2014).

A parte da árvore mais importante comercialmente é o seu fruto, de formato oval, com cerca de 30 cm de comprimento e 25 cm de diâmetro. Ele tem três partes (Figura 4): epicarpo (parte mais externa, dura e resistente), mesocarpo (uma camada fibrosa e espessa), e endocarpo (invólucro rígido na parte interna do fruto) (GHAVAMI; TOLEDO; BARBOSA, 1999). O mesocarpo, que possui 3 a 5 cm de espessura, é a parte de onde as fibras são extraídas, e é considerado um resíduo agrícola. A fruta tem uma grande cavidade central que contém um líquido doce (água de coco).

O número de frutos por árvore varia dependendo fortemente das condições do solo (SAVASTANO; SANTOS; AGOPYAN, 2009). O Brasil é o quarto maior produtor de coco (*Cocos nucifera L.*) no mundo, com aproximadamente 257.742 ha de área colhida e produção de 2.888.532 ton. (EMBRAPA, 2014) ficando atrás da Indonésia, Filipinas e Índia.

Figura 4 – Corte longitudinal do coco.



Fonte: ANDRADE et al. (2004).

O setor agroindustrial do coco no Brasil tem um crescimento estimado de 20% ao ano, gerando cerca de 2,5 a 3 bilhões de toneladas anuais de casca, que se tornam resíduos sólidos assim que a água do coco é consumida. O consumo de água de coco no interior do país ainda é pequeno, concentrando-se no litoral. O movimento de água de coco no Brasil em 2008 foi de cerca 60 milhões de litros, tendo um consumo per capita anual de 310 ml. E nessas áreas litorâneas, a casca do coco pode representar 70% do resíduo total gerado (MATTOS et al, 2014; SILVA, 2014).

Pernambuco é o sexto maior produtor de coco do país. Dos seus 98.149,114 km<sup>2</sup>, teve 82,64 km<sup>2</sup> de plantação de coco verde em 2012, ano em que produziu 106.622.000 unidades de coco (EMBRAPA, 2014). Estimando-se que o coco gera em média 1,5 kg (PASSOS, 2005) de resíduos de casca, a região teve o potencial de gerar 159,9 mil toneladas de resíduo. A geração anual de resíduos no estado, segundo a SEMAS (2012) foi de 4 milhões de toneladas. Cruzando esses dados, 3,9% do resíduo gerado no estado são referentes à casca do coco produzido na região. Esta porcentagem não representa seguramente o consumo e descarte no estado, uma vez que o consumo de coco na cidade provém de outras regiões. Sendo assim, com tamanha produção e consumo de coco no estado quanto no país, a geração de resíduos é grande, uma vez que 85% do coco consumido torna-se resíduo, constituído das cascas e fibras.

Em 2014, a Região Metropolitana do Recife (RMR) produziu 5,64 milhões de unidades de coco (IBGE, 2014), como se vê na Tabela 2.

Tabela 2 – Produção de coco verde na Região Metropolitana de Recife.

<b>Cidade</b>	<b>Produção de coco</b>	<b>Projeção da produção de Resíduos Sólidos em 2014 (t)</b>
Abreu e Lima	240.000	40.762,15
Araçoiaba	s/ produção	4.451,71
Cabo de Santo Agostinho	800.000	173.747,59
Camaragibe	65.000	55.628,63
Goiana	s/ dados	69.431,02
Igarassu	975.000	33.639,37
Itamaracá	600.000	19.902,04
Ipojuca	320.000	40.441,61
Itapissuma	30.000	6.467,49
Jaboatão	500.000	261.052,49
Moreno	2.000.000	14.718,14
Olinda	40.000	126.689,86
Paulista	40.000	122.606,97
Recife	s/ produção	911.130,88
São Lourenço	300.000	38.519,64
<b>Total</b>	<b>5.460.000.000</b>	<b>1.849.758,57</b>

Fonte: PERNAMBUCO (2012); IBGE (2014).

A geração prevista de RS na região, em 2014, segundo o Plano Metropolitano de Resíduos Sólidos da RMR foi de aproximadamente 1,85 milhões de toneladas por dia (PERNAMBUCO, 2012). Cruzando esses dados, 0,50% do resíduo gerado na RMR é referente à casca de coco verde produzido na região.

Ou seja, esse resíduo pode e deve ser reaproveitado em outra cadeia produtiva, evitando-se seu descarte em aterros sanitários ou disposições clandestinas, provocando um enorme problema aos serviços municipais de coleta de resíduos devido ao seu grande volume. No Brasil, são produzidos anualmente 1 bilhão de unidades de coco verde (de onde é extraída a água) e 1 bilhão de cocos secos (matéria-prima do coco ralado e do leite de coco), sendo apenas 10% desse total de resíduo gerado é reciclado (SINDCOCO, 2014).

A casca do coco é de difícil decomposição, podendo levar de 8 a 10 anos para se decompor (CARRIJO; LIZ; MAKISHIMA, 2002). E ainda que destinadas aos aterros, como toda matéria orgânica residual, sob condições anaeróbicas provocam emissão de metano, gás poluente, assim como geram chorume, podendo diminuir a vida útil dos aterros sanitários (BOLAÑOS, 2013). Segundo a NBR 10.004/04, ela é classificada como resíduo sólido de classe II A, e deve ser

disposta em aterros sanitários, onde o confinamento seguro deve ser priorizado, assegurando o controle da poluição ambiental e proteção à saúde pública.

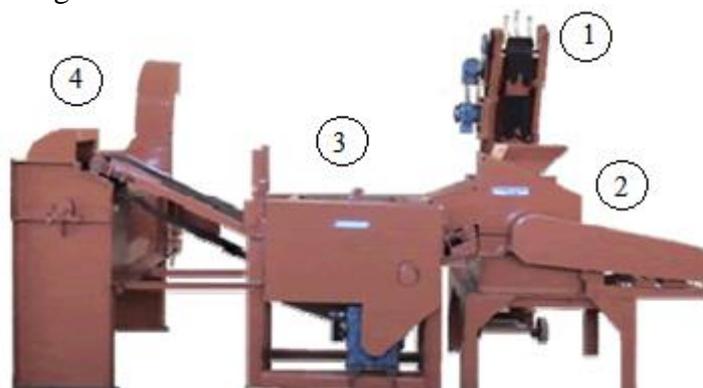
O beneficiamento do coco não só é uma solução viável para o descarte indevido de um produto orgânico, obtendo-se a fibra e pó, como também agrega mais valor ao produto, que terá novas aplicações, inclusive se incorporado ao solo (SILVA, 2014).

#### 2.4.2 Extração da fibra de coco

Tendo em vista a alta produção e consumo do coco verde, tanto no país, como no estado de Pernambuco, é preciso a criação de metodologias que possibilitem um melhor descarte, transbordo e reaproveitamento do resíduo que essa economia envolve. Esse material pode dar origem a dois subprodutos, a fibra e o pó do coco, mais conhecido como substrato. Este é bastante voltado para a utilização agrícola, pois tem grande capacidade de absorção de umidade; e aquela tem diversas utilidades possíveis, desde artesanato até estrutura para compósitos para diversos fins, uma vez que essa fibra é um material orgânico, natural (CARRIJO; LIZ; MAKASHIMA, 2002).

A Embrapa Agroindústria Tropical, em parceria com uma empresa de máquinas agrícolas, desenvolveu um conjunto de maquinário triturador (Figura 5), cuja estimativa de produção está em torno de 250 toneladas de fibras ao ano a partir de aproximadamente 5.500 toneladas de cascas de coco-verde. A usina é composta por quatro equipamentos menores que realizam as ações descritas no Quadro 3 (MATTOS *et al.*, 2014):

Figura 5 – Usina de beneficiamento da casca do coco.



Fonte: FORTALMAG (2017).

Quadro 3 – Equipamentos da usina de beneficiamento da casca do coco.

	<b>Equipamento</b>	<b>Função</b>
1	Elevador sequencial	Alimentar a usina, elevando os cocos em uma sequência correta até o triturador, regulado na fábrica, para que a usina não engasgue e apresente problemas por uma alimentação incorreta.
2	Triturador reforçado	Triturar e dilacerar, através de facas fixas, o coco verde ou seco após a retirada da água, objetivando uma maior fragmentação da casca. A reduzida dimensão do material triturado facilita tanto o seu transporte como a sua utilização ou disposição final dos resíduos.
3	Prensa rotativa horizontal	Extrair de forma rápida o líquido da casca do coco (LCCV), objetivando uma maior agilidade no processo de obtenção da fibra e do pó do coco.
4	Classificadora de fibra e pó	Classificar o produto no processo de obtenção da fibra e do pó do coco, separando-os em pequena e grande quantidade, respectivamente.

Fonte: FORTALMAG (2017).

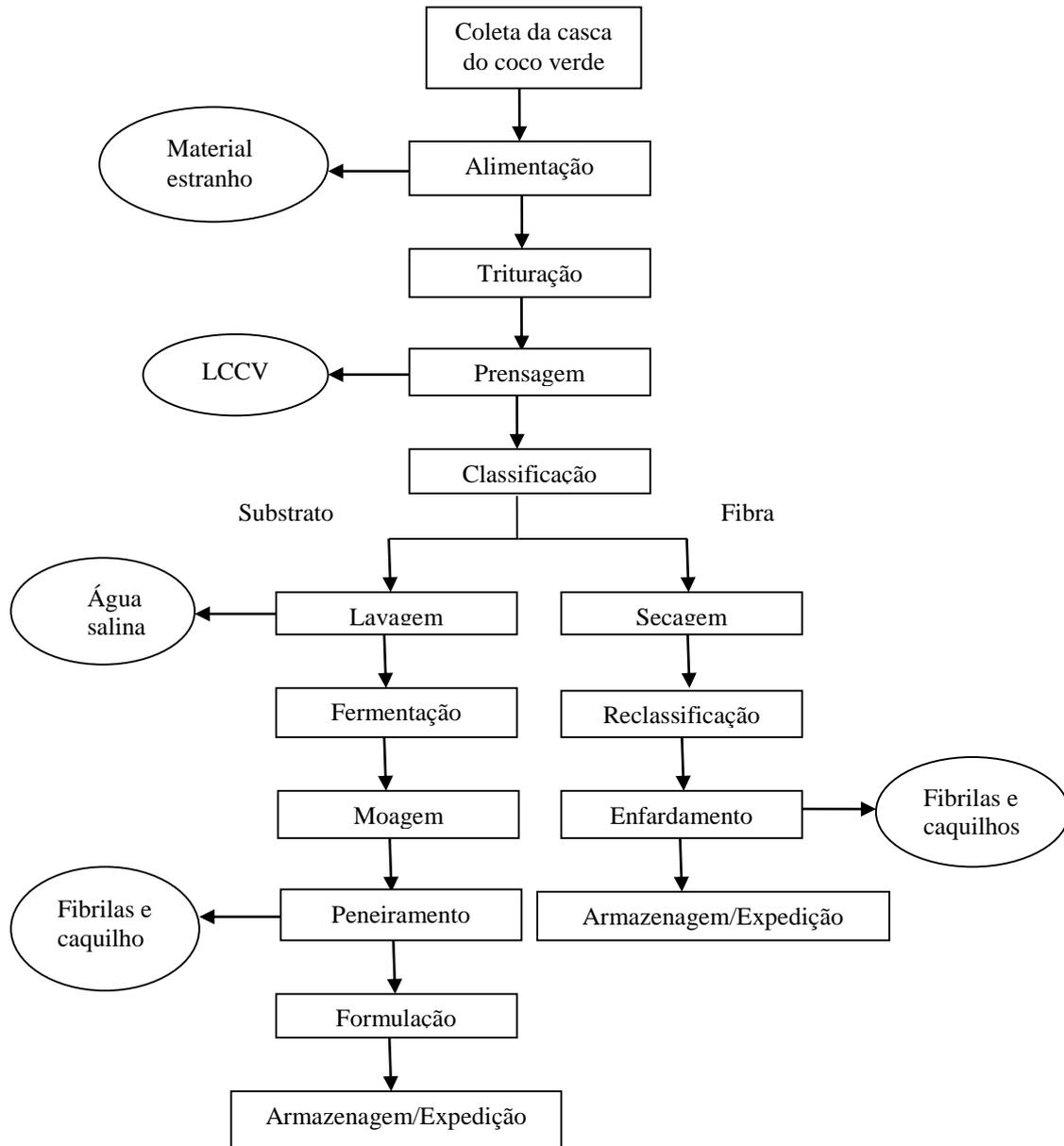
O primeiro passo para a reutilização da casca do coco é sua coleta, geralmente feita nos próprios locais de venda de água de coco, descartando-se aquelas de coloração marrom, porque apresentam maior dificuldade para serem processadas. O armazenamento da casca deve ser feito, preferencialmente, em local arejado (CARRIJO; LIZ; MAKASHIMA, 2002). Depois, deve ser levada para uma usina de beneficiamento que possa extrair da casca o pó e as fibras.

A Figura 6 mostra a sequência da extração da fibra, normalmente empregado na produção do substrato agrícola, quanto da fibra do coco. Primeiramente, a casca do coco é recolhida pelo elevador sequencial, obedecendo à vazão máxima permitida na etapa de prensagem (MATTOS *et al.*, 2014), se esta for muito pequena, prejudica a retirada dos sais, e se for muito alta, pode ocorrer travamento da prensa.

Em seguida, chega ao triturador, onde as cascas inteiras ou cortadas são processadas. A trituradora com facas fixas minimiza o corte das fibras, viabilizando a separação e o aproveitamento posterior das fibras longas. Este procedimento possibilita a realização de prensagem e classificação das fibras, posteriormente (MATTOS *et al.*, 2014).

A casca do coco verde tem 80% de umidade e a maior parte dos sais se encontram em solução. Logo, a casca do coco passa pela prensa, onde será extraída parte da umidade via compressão mecânica, possibilitando redução da salinidade, de 4,7 dS/m para próximo de 1,3 dS/m (MATTOS *et al.*, 2014).

Figura 6 - Fluxograma operacional da produção de substrato agrícola e fibra do coco.



Fonte: MATTOS et al. (2014).

Após a prensagem, as fibras (30% do produto final) são separadas do pó (70% do material) por meio da classificadora, com um rolo de facas fixas helicoidais e uma chapa perfurada. O material é turbilhonado ao longo do eixo da máquina, fazendo o pó cair pela chapa perfurada, e a fibra sair no fim do percurso (MATTOS *et al.*, 2014).

A fibra é expulsa pela classificadora, precisando ser recolhida e disposta para secar ao sol. A fibra que sai da classificadora ainda vem com alguns restos do endocarpo do coco e com um

pouco de pó. Para conferir a qualidade final para a comercialização é necessário que seja feito um peneiramento da fibra, separando-a das impurezas, atividade feita pela classificadora. Como subproduto deste processo obtêm-se fibrilas e casquilhos, utilizados na composição de substratos agrícolas de granulometria mais grossa quando misturados ao pó da casca do coco. Em seguida, o material segue para uma prensa para compor os fardos, de forma a reduzir custos com transporte (MATTOS *et al.*, 2014).

### 2.4.3 Propriedades físicas, químicas e mecânicas da fibra do coco

Conhecer as propriedades físicas e mecânicas das fibras possibilita entender melhor seu comportamento em compósitos (BLEDZKI; GASSAN, 1999). De forma geral, as fibras vegetais podem ser de várias origens (bambu, juta, capim elefante, malva, coco, piaçava, sisal, linho e cana-de-açúcar). Algumas destas podem atingir grandes resistências, como por exemplo, as fibras do bambu que alcançam, normalmente, resistências acima de 100 MPa, com módulo de elasticidade entre 10 e 25 GPa. A Tabela 3 apresenta as principais propriedades de diferentes tipos de fibras vegetais (AGUILAR, 2015).

Tabela 3 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais e sintéticas.

Fibra	Densidade (kN/m <sup>3</sup> )	Deformação máxima (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)	Absorção máxima (%)
<i>Vegetais</i>						
Algodão	15 – 16	7,0 – 8,0	287 – 597	5,5 – 12,6	7,0-8,0	-
Banana	13,5	-	54 – 754	7,7 – 20,0	-	-
Cana-de-açúcar	-	1,1	222	27,1		
Cânhamo	-	1,6	690	-	1,6	-
Coco	11,8 – 12,9	30	106 – 175	4,0 – 6,0	175	
Curauá	11	-	700 – 1000	26,0 – 46,0	-	-
Juta	13 – 14,5	1,5 – 1,8	393 – 773	26,5	1,5-1,8	214
Linho	15	2,7 – 3,2	345 – 1035	27,6	-	-
Palmira	10,9	-	180 – 215	4,4 – 6,1	-	-
Rami	15,1	1,8 – 5,3	400 – 938	25,0 – 128	-	-
Sisal	15	4,0 – 5,4	511 – 640	9,4 – 22	2,0-2,5	110
Talipot	8,9	-	143 - 264	9,3 – 13,3	-	-
<i>Sintéticas</i>						
Vidro	20000-35000	2,5	70	2,5	-	
Polipropileno	5500-6900	15	3,40	0,91	-	

Fonte: BLEDZKI; GASSAN (1999); LEVY NETO; PARDINI (2006); GUIMARÃES *et al.* (2009); CASTRO; TIBA; PANDOLFELLI (2011).

Mas especificamente sobre as fibras do coco, essas propriedades da podem depender do grau das características deste fruto, inclusive do seu grau de maturação. Portanto, as fibras podem advir de um coco verde ou maduro. O coco maduro é colhido com a 1 a 12 meses, e suas cascas produzem uma fibra de coloração marrom-escura, como se pode ver na Figura 7, por causa da camada de lignina que se deposita nas paredes celulares, e é usada principalmente em escovas, tapetes e estofos. Além disso, as fibras do coco maduro contêm mais lignina e menos celulose (principais componentes) do que fibras como o linho e do algodão, sendo mais resistentes, fortes e altamente duráveis, porém menos flexíveis. Por outro lado, o coco verde é colhido com seis meses, pouco antes de amadurecer, e sua fibra geralmente tem coloração marrom claro ou amarelada, sendo mais macia e menos forte do que a fibra marrom (MWASHA; AQUI, 2007; EMBRAPA, 2014; ANGGRAINI, 2016).

Figura 7 – Amostras de fibras do coco verde (esq.) e do coco seco (dir.).



Fonte: Autor.

No caso do coco maduro, as cascas são, geralmente, utilizadas como combustível de caldeiras ou ainda processadas para beneficiamento de fibras, que são usadas como manufaturas de cordoalhas, tapetes, esteiras e outros produtos (ROSA, 2002 apud CORRADINI *et al.*, 2009). Estas fibras têm sido bastante empregadas na indústria de tintas, na automobilística, na forração de bancos, substituindo a espuma injetada usada no estofamento, apresentando vantagens como não deformar e não esquentar, sendo excelente isolante térmico para composição de blocos.

Com relação às fibras do coco verde, também podem ser utilizadas em diversas finalidades, como isolamento acústico, quando misturada ao aglomerado de cortiça expandido, apresentando bons resultados na absorção de ondas de baixa frequência; como material isolante térmico, por sua composição química; como material para fabricação de telhas, lhe conferindo

um caráter impermeável e isotérmico; e como material para produção de papel, devido a sua composição celulósica (VELOSO et al, 2013).

A fibra do coco também tem utilização na engenharia civil, pela incorporação destas a materiais mais frágeis, pouco resistentes à tração (SALIT, 2014). Pode substituir materiais mais caros, como aço ou plásticos, na utilização com concreto ou cimento especial de baixa alcalinidade, uma vez que a alcalinidade do cimento normal pode danificar as fibras. É possível também utilizar a fibra de coco verde, depois de seca e desfiada, em um sistema parecido com o *duratex*, no qual a fibra é misturada a uma resina e depois prensada (SENHORAS, 2009).

Condições climáticas, idade, processos de degradação influenciam a estrutura e composição química das fibras. A maior porcentagem das fibras vegetais é de água, entretanto, com relação à parte seca, as células vegetais consistem basicamente de polímeros a base de açúcar (celulose, hemicelulose) e lignina (FARUK et al., 2012), uma parte orgânica e cinzas.

Ali (2010) estudou fibra de coco e concluiu que esta é a fibra mais dúctil entre as outras fibras vegetais, capazes de suportar tensão 4 a 6 vezes maior que as outras fibras. O autor mostrou a composição química das fibras de coco segundo alguns pesquisadores (Tabela 4). O teor de lignina nas fibras varia em função da idade do fruto, sendo o percentual de cerca de 20% encontrado em fibras oriundas de coco jovem, colhido com 6 meses, e de aproximadamente 35% no fruto maduro, com 11 meses (VAN DAM *et al.*, 2004 apud PASSOS, 2005). Segundo Babu e Vasudevan (2007), devido ao alto teor de lignina, a fibra do coco é muito mais vantajosa em diferentes aplicações, tais como controle de erosão, ou melhorar o desempenho de taludes.

Tabela 4 – Composição química das fibras do coco responsável pela resistência.

Hemicelulose (%)	Celulose (%)	Lignina (%)	Referência
-	43	45	Satyanarayana <i>et al.</i> (1990)
31,1	33,2	20,5	Ramakrishna <i>et al.</i> (2005)
15 - 28	35 - 60	20 - 48	Agopyan <i>et al.</i> (2005)
16,8	68,9	32,1	Asasutjarit <i>et al.</i> (2007)
0,15 - 0,25	36 - 43	41 - 45	Corradini <i>et al.</i> (2006)
0,25%	43,44	45,84	Shankar <i>et al.</i> (2012)
0,15-0,25	32-35	40-45	Faruk et al. (2012)

Fonte: ALI, 2010.

As fibras das cascas de coco têm percentual menor de celulose comparado a outras fibras vegetais, como a do sisal e da juta (Tabela 4), correspondendo entre 33% a 43%, podendo em alguns chegar a 68,9%, segundo Agopyan *et al.* (2005) e Asasutjarit *et al.* (2007). Com relação ao teor de hemicelulose (3-12%) das fibras de coco, existe a vantagem de ser menor que em outras fibras vegetais.

Por outro lado, a quantidade de lignina é alta, em média 20% a 40% (PASSOS, 2005), cerca de duas a quatro vezes os valores existentes na fibra da juta e do sisal (Tabela 5), conferindo-lhe então, um comportamento singular frente às outras fibras. A Tabela 5 mostra as propriedades físicas e mecânicas da fibra do coco por diversos autores.

Tabela 5 – Propriedades físicas e mecânicas da fibra do coco.

<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Comprimento (mm)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>Módulo de Elásticidade (GPa)</b>	<b>Densidade (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Referência</b>
0,10-0,45	-	106-175	75	4-6	11,5	Satyanarayana et al. (1990)
0,10-0,40	50-252	100 - 130	10-26	19-26	14,5-28	Aggarwal (1992)
0,11-0,53	-	108-252	13,3	2,50-4,50	10	Toledo, Ghavami e England (2005)
0,1-0,4	-	174	10-25	16-26	-	Reis (2006)
-	-	500	-	-	11,5	Rao e Rao (2007)
0,27	50	142 ± 36	24 ± 10	2,0	-	Li et al. (2007)
0,13 – 0,23	-	100 - 250	-	3,00	-	Tomczak (2010)
-	-	175	30	4-6	12	Faruk et. al (2012)
-	-	220	15-25	6	12,5	Mohammed et al. (2015)

Fonte: ALI (2010).

Como se pode ver, as propriedades das fibras vegetais podem diferir entre as pesquisas citadas, pois foram utilizadas fibras de origens diversas, diferentes condições de umidade e métodos de teste (FARUK *et al.*, 2012).

Motta; Agopyan e John (2007) realizaram ensaios de densidade real por picnometria, e tração direta (utilizado uma máquina da marca Instro, modelo 5569, e um texturômetro, modelo TA-XT2i e velocidade adotada de 2,0 mm/min, segundo norma ASTM D3822-96, encontrando resultados de 12,9 kN/m<sup>3</sup>, e a resistência à tração média de 105,97 MPa.

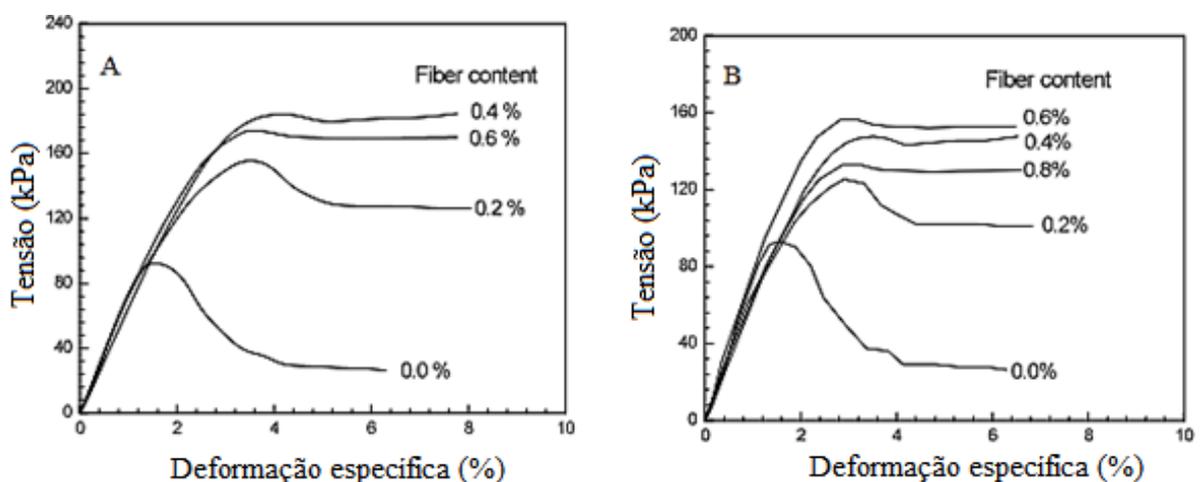
Pereira (2012) realizou alguns ensaios de caracterização física e mecânica das fibras do coco verde, entre eles o de densidade, feita com um multiplicômetro; e o de tração direta, em que as fibras foram cortadas e coladas em bases de papel com fita adesiva, deixando 4 cm da fibra livre. Obteve como resultados densidade de  $14,0 \pm 0,02 \text{ kN/m}^3$ , e resistência à tração de  $65 \pm 15 \text{ MPa}$ .

#### 2.4.4 Estudos sobre a resistência de solos com fibras de coco

Recentemente, as fibras de coco têm recebido o foco de diversos estudos no campo da geotecnia, de forma a se analisar como esse reforço pode ser mais bem atingido por meio da inserção dessas fibras ao solo. Houve um maior foco para os ensaios de resistência à compressão simples, à tração por compressão diametral e ao cisalhamento direto, pois foram ensaios com melhores resultados.

Kar e Pradhan (2011) estudaram a resistência a compressão simples e a resistência ao cisalhamento direto de um solo argiloso de baixa compressibilidade misturado ora com fibras de coco, ora com fibras de polipropileno, de 15 mm de comprimento, e teores 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1%. Para o ensaio de compressão simples, houve melhores resultados para 0,6% de fibra, alcançando uma resistência à compressão simples de aproximadamente 160 kPa, diminuindo essa resistência para 140 kPa para o teor de 0,8%. O solo com as fibras de polipropileno obteve maiores valores de resistência, com melhor resultado de aproximadamente 180 kPa para 0,4% de fibra (Figura 8).

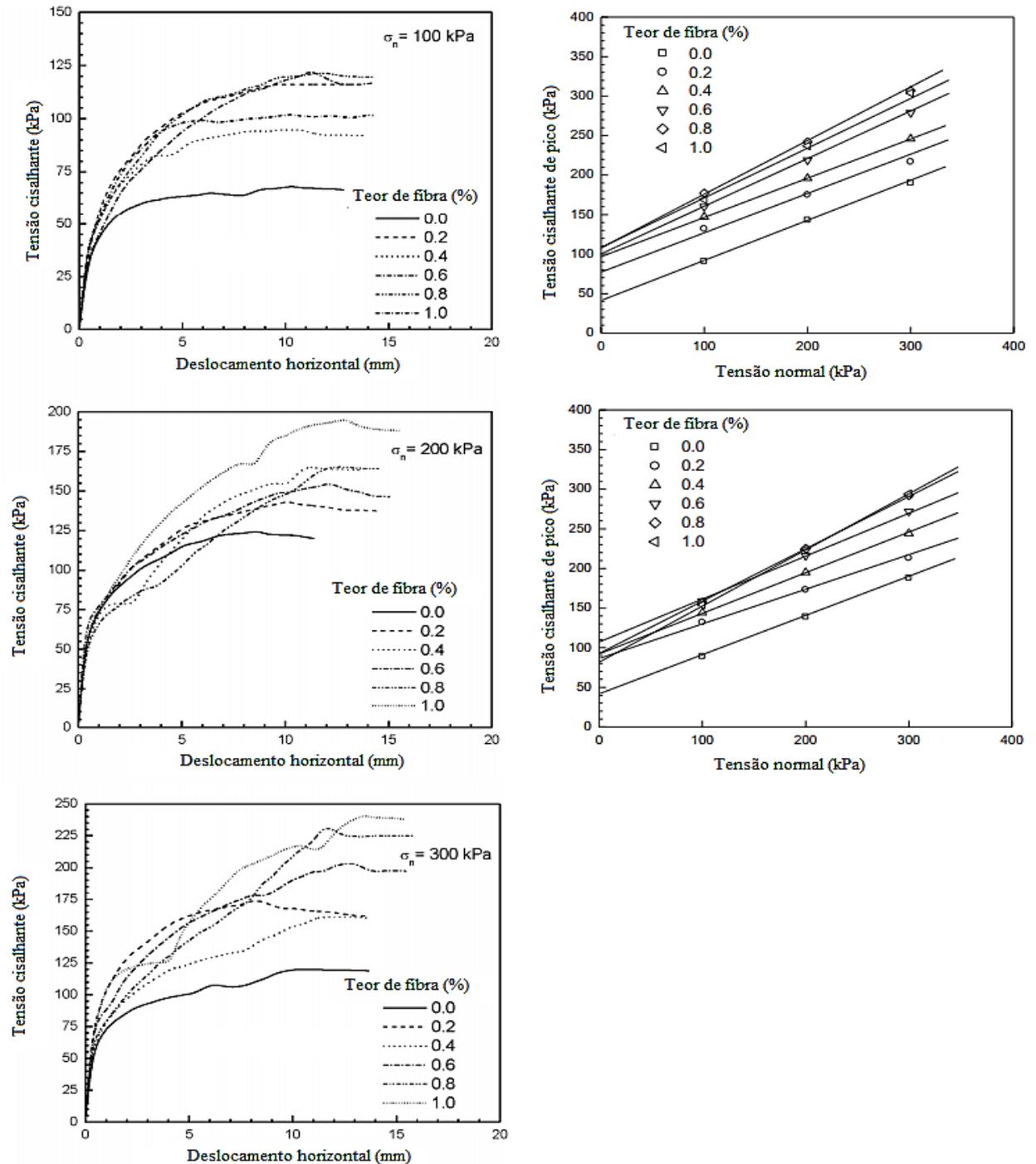
Figura 8 – Curvas tensão-deformação de solo com fibras de polipropileno (A) e fibras do coco (B).



Fonte: Kar; Pradhan (2011).

Sobre o ensaio de cisalhamento direto, foram aplicadas tensões normais de 100, 200 e 300 kPa. A resistência ao cisalhamento foi máxima com a inclusão de 1% de fibra de coco (Figura 9). Para a tensão vertical de 100 kPa, maiores resistências foram alcançadas com 0,8% de fibra, para 200 kPa, com 1% de fibra, e para 300 kPa, 1% de fibra.

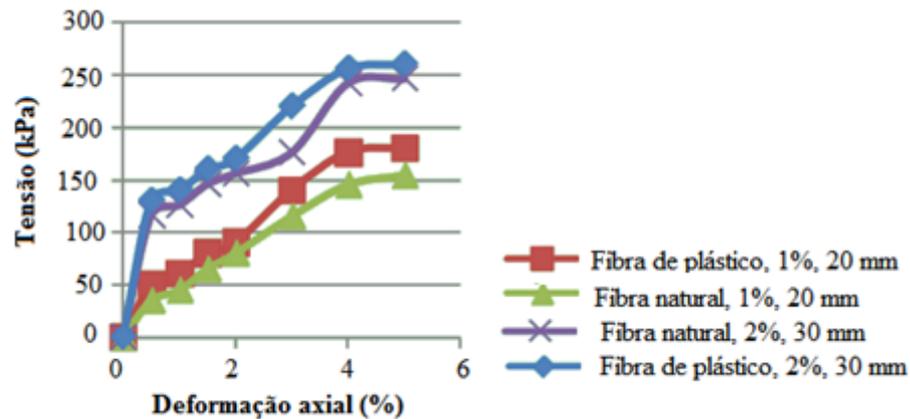
Figura 9 - Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal, e envoltórias de resistência das misturas.



Fonte: Kar e Pradhan (2011).

Chegenizadeh e Nikraz (2012) realizaram ensaios de compressão simples para um solo areno-argiloso, e para misturas desse solo com diferentes teores de fibras de coco e fibras de plástico, de 8, 20 e 25 mm (Figura 10). Os melhores resultados foram encontrados para os teores de 2%, e 20 mm de comprimento pra fibra de coco, de 1% e 20 mm para as fibras de plástico. Os principais motivos podem ser considerados forças de bloqueio entre o solo e a fibra como a adesão da parte do solo e da fibra. O estudo mostrou que quanto maior o teor e o comprimento da fibra, mais resistência as amostras obtiveram.

Figura 10 – Efeito dos teores e comprimentos das fibras nas amostras.



Fonte: Chegenizadeh; Nikraz (2012).

Bolaños (2013) estudou o comportamento das fibras de coco verde (Figura 11) em um solo argilo-arenoso, a partir de uma série de ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados. Foram adicionadas fibras de comprimentos de 2 mm, nos teores 0,5%, 0,75%, 1%, 1,25% e 1,5%, em relação ao peso do solo seco.

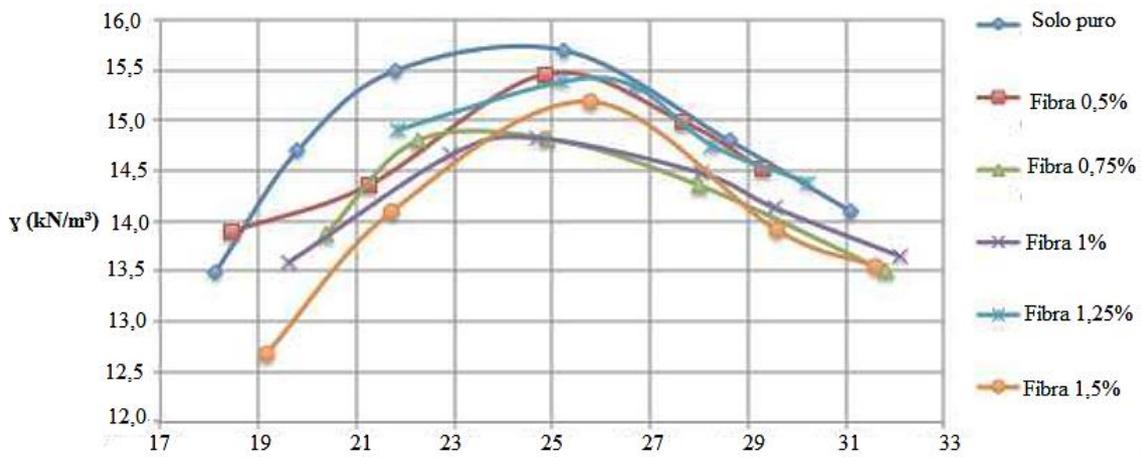
Figura 11 - Amostras de fibras de coco extraídas da casca (esq.) e cortadas (dir.).



Fonte: Bolaños (2013).

Com relação ao ensaio de compactação, houve uma tendência inversamente proporcional do da umidade ótima e da densidade seca máxima com o aumento do teor de fibras (Bolaños, 2013). A amostra compactada com 0,75% de teor de fibra apresentou uma umidade ótima inferior à do solo, e a amostra com 1% de fibra apresentou uma umidade ótima similar à do solo. Os resultados estão na Figura 12.

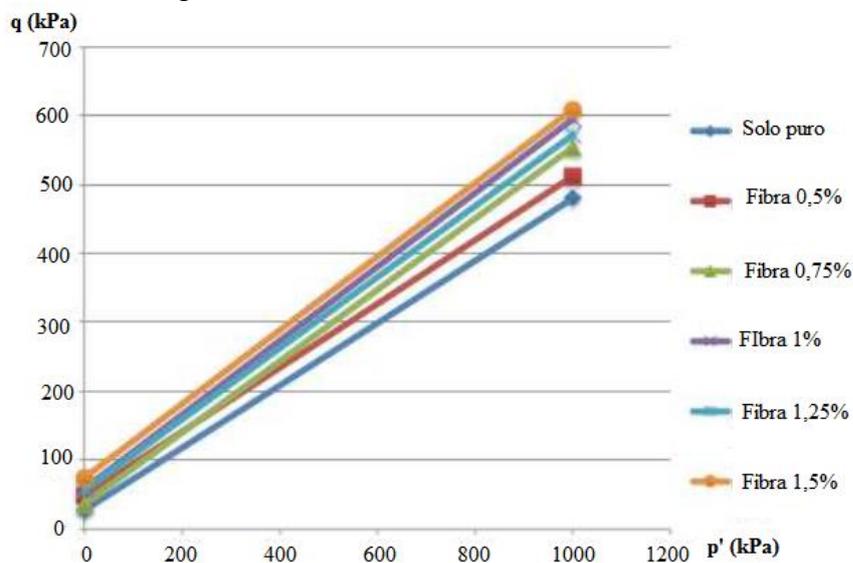
Figura 12 - Curvas de compactação do solo e da fibra do coco.



Fonte: Bolaños (2013).

Dessa forma, as amostras de solo e misturas solo-fibras de coco foram ensaiadas como parte desta investigação. As envoltórias de resistência resultantes do ensaio triaxial das amostras são apresentadas na Figura 13.

Figura 13 - Envoltórias do solo e misturas.

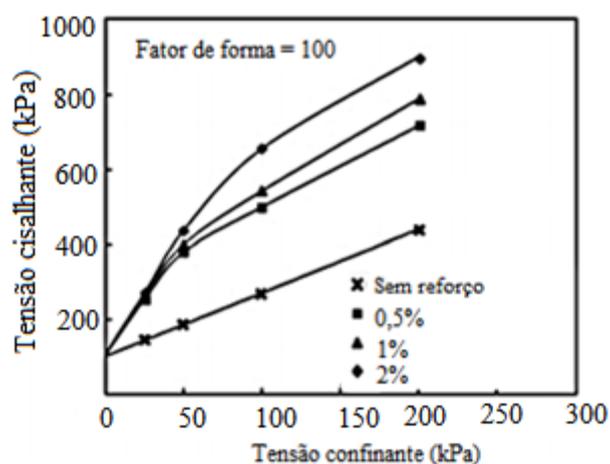


Fonte: Bolaños (2013).

Concluiu-se que a inclusão das fibras do coco foi positiva, apresentando melhores parâmetros de resistência com a maior quantidade de fibras adicionadas (Bolaños, 2013). Os resultados dos ensaios triaxiais demonstraram um bom potencial para o emprego deste material como reforço geotécnico, sendo o teor de 1,5% o que melhor apresentou resultados de resistência ao cisalhamento, em que se observou um aumento de 4° no ângulo de atrito da mistura de 1,5% de teor de fibra, com respeito ao solo. Também se notou um aumento significativo na coesão do solo reforçado. As curvas tensão desviadora x deformação axial unitária não apresentaram picos de ruptura.

Maliakal e Thiyyakkandi (2013) estudaram a influência de fibras de coco distribuídas aleatoriamente, em um solo argiloso, na resistência ao cisalhamento, por meio de ensaios triaxiais não consolidados e não drenados, corpos de prova de dimensões cilíndricas de 38 mm de diâmetro e 76 mm de altura. As fibras do coco foram cortadas em comprimentos 12 mm, 24 mm, e 36 mm, e proporção 0,5%, 1% e 2% de adição ao solo. Eles concluíram que a resistência ao cisalhamento melhora significativamente, com o aumento de teor de fibra (Figura 14). Para os teores de 1 e 2%, não foi observado pico de resistência.

Figura 14 - Envoltórias de resistência para diferentes teores de fibras.

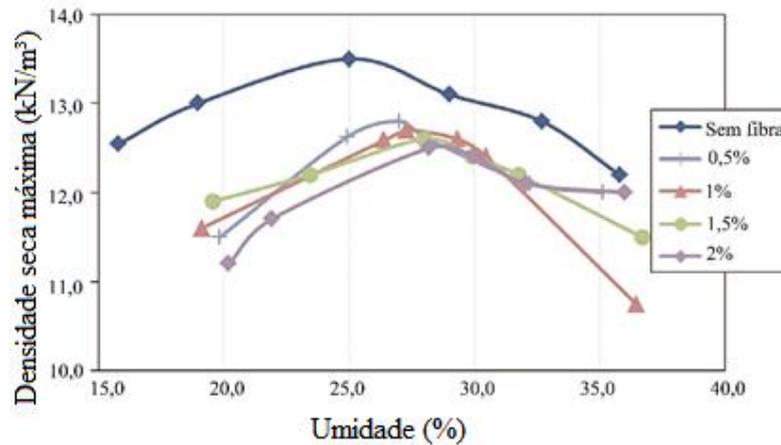


Fonte: Maliakal; Thiyyakkandi (2013).

Anggraini et al (2014) realizaram ensaios de resistência à tração por compressão diametral (corpo de prova com 50 mm de altura e diâmetro) e resistência à compressão simples (100 mm de altura e 50mm de diâmetro) em solos argilosos com 0,5, 1, 1,5 e 2% de fibra de coco e 5%

de cal, para diferentes dias de cura (7, 28 e 90 dias). No ensaio de compactação (Figura 15), o solo sem fibras apresentou menor umidade ótima, e maior densidade seca máxima.

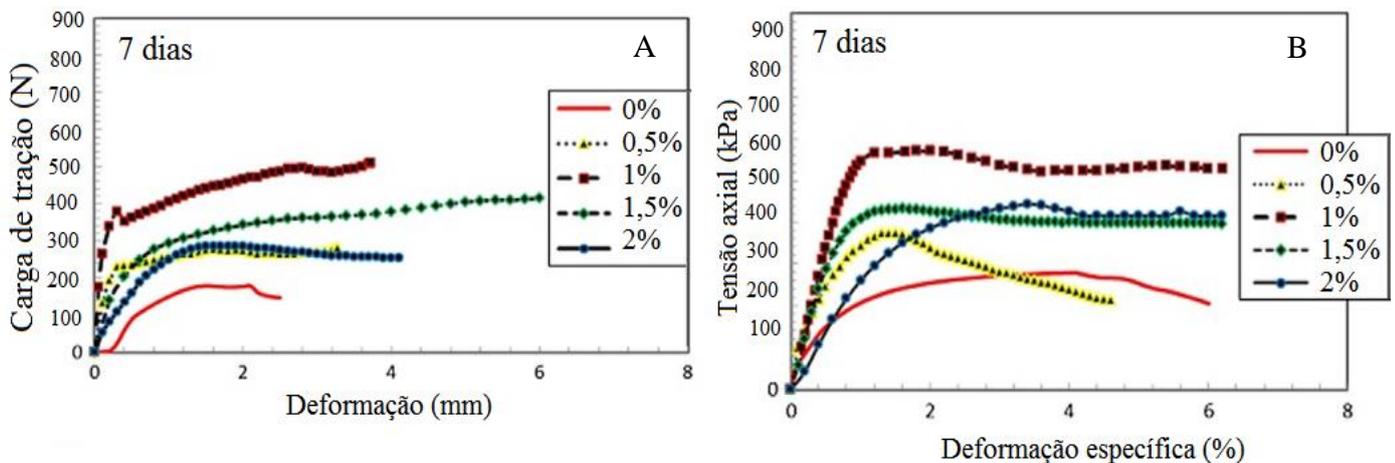
Figura 15 - Curvas de compactação do solo e misturas.



Fonte: Anggraini et al. (2014).

Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (Figura 16a), houve uma tendência de aumento da resistência com a deformação, houve maiores valores para 1% (550 kPa), o que indica uma melhor interação solo-fibra-cal, tornando o compósito um material mais dúctil. Foi observado que os teores de 1,5 e 2% aumentaram o volume ocupado pelas fibras, ocorrendo maior interação fibra-fibra, que fibra-solo, o que pode ter ocasionado menor desempenho mecânico do compósito.

Figura 16 - Valores da resistência à tração por compressão diametral (A) e à compressão simples (B).

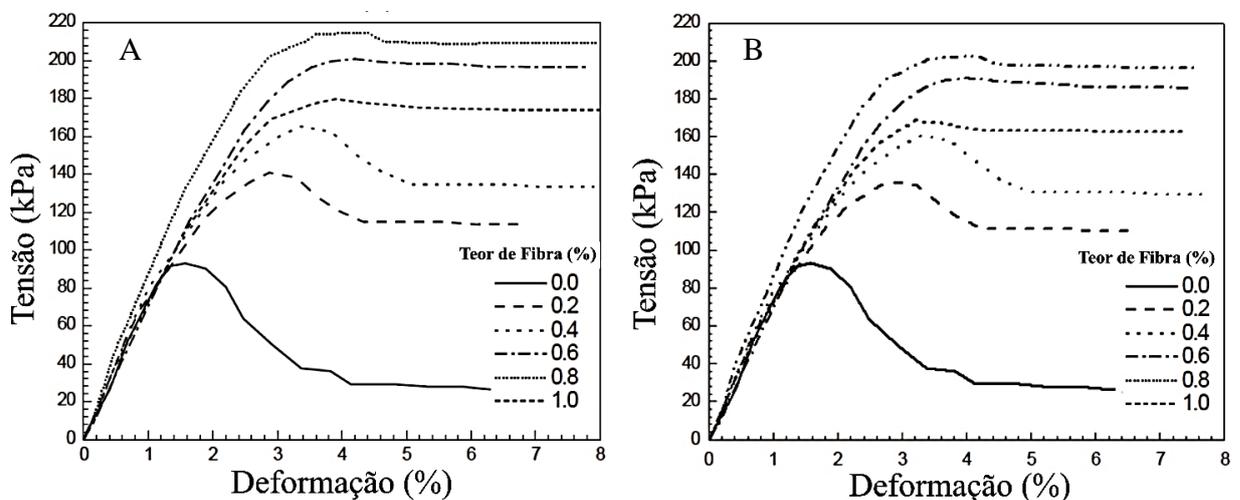


Fonte: ANGGRAINI et al. (2014).

Sobre o ensaio de resistência à compressão simples (Figura 16b), havendo acréscimo de resistência para todos os teores, principalmente 1% (580 kPa), mostrando um aumento da ligação interfacial e do entrelaçamento solo-fibra das amostras compactadas.

Kar, Pradhan e Naik (2014) estudaram a resistência à compressão simples e ao cisalhamento direto de um solo areno-argiloso com fibras de comprimentos de 15, 20 e 25 mm, e em teores de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1%. Foram compactados amostras com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Resultados mostraram que a resistência à compressão simples foi maior para 20 e 25 mm, com 0,8% de fibra, com valores muito próximos (Figura 17a e 17b). Os autores observaram que, com a inclusão de fibras, a ductilidade do solo reforçado melhorou, se comparado ao solo não reforçado, até o melhor teor e o comprimento das fibras. Acréscimos de fibra superior ao ótimo, a resistência à compressão simples diminuiu. Isso pode ser devido ao fato de que, com o aumento de fibras no solo, a quantidade de matriz de solo disponível para manter as fibras fixas é insuficiente para desenvolver uma ligação efetiva entre fibras e solo.

Figura 17 - Curva tensão-deformação de solo reforçado com fibras de coco de 20 mm (a) e 25 mm (b).



Kar; Pradhan; Naik (2014).

Ainda com relação ao estudo (KAR; PRADHAN; NAIK, 2014), sobre o ensaio de cisalhamento direto, foram utilizadas tensões normais de 100, 200 e 300 kPa, em condições não drenadas. Houve um registro de maior resistência para o teor de 0,8%, para o comprimento de 20mm. Com o aumento dos teores, houve um aumento na resistência de pico e residual para os comprimentos de 15, 20 e 25 mm, respectivamente. Tanto o ângulo de atrito quanto a coesão aumentaram conforme o aumento do teor, até 0,8% de fibra, diminuindo para o teor de 1% (Tabela 6).

Tabela 6 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento direto de um solo reforçado com fibras de coco de 20 mm.

Teor de fibras (%)	Coesão (kPa)		Ângulo de atrito (°)	
	Pico	Residual	Pico	Residual
0	45	40	26	26
0,2	90	96	27,9	24,46
0,4	110	109	32	31,6
0,6	118	112	36,5	35,37
0,8	120	120	39,2	38,54
1	117	116	37,9	39

Fonte: Kar; Pradhan; Naik (2014).

Ramasubbarao (2014) realizou o ensaio de compressão simples para um solo argiloso de alta compressibilidade, com teores de fibras de coco de 0,5, 1, e 1,5%, de 5 mm impermeabilizadas em querosene. A mistura com teor de 1% apresentou melhor resultado, em que o resultado de resistência comparado ao solo sem fibras aumentou quase 2,5 vezes (Tabela 7). Foi realizado teste de tração por compressão diametral com 1% de fibra, que obteve 64 kPa para o solo, e 96 kPa para a mistura.

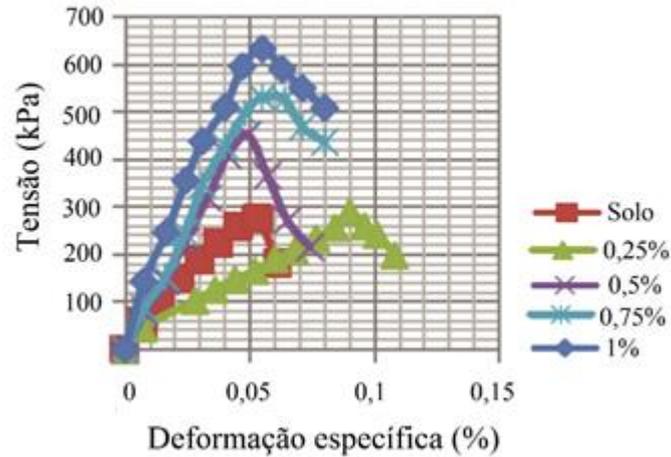
Tabela 7 - Resultados do ensaio de compressão simples.

Mistura	Resistência à compressão simples	Taxa de aumento de resistência
<b>Solo</b>	73	1
<b>S+0,5%</b>	121	1,66
<b>S+1%</b>	178	2,44
<b>S+1,5%</b>	115	1,58

Fonte: Ramasubbarao (2014).

Singh e Mittal (2014) realizaram um estudo experimental com um solo argiloso (CL) misturado com diferentes porcentagens de fibra de coco. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples, de acordo com a densidade seca e umidade ótima correspondentes. A porcentagem de fibra variou em 0,25, 0,5, 0,75, e 1%. A resistência à compressão simples aumentou conforme o aumento gradual de fibras, desde o solo (269,68 kPa) até a máxima resistência da mistura de 1% (620 kPa) (Figura 18).

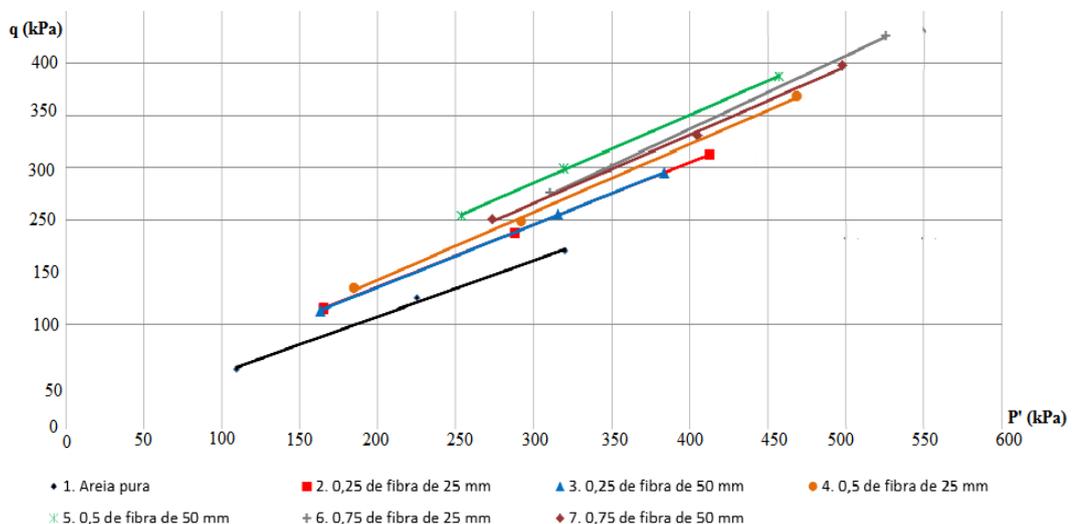
Figura 18 - Resistências à compressão simples para diferentes teores de fibras de coco.



Fonte: Singh e Mittal (2014).

Aguilar (2015) estudou o comportamento de fibras de coco verde em um solo arenoso (areia média). Foram feitos ensaios triaxiais do tipo consolidado isotropicamente drenado, nas proporções 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibra, e comprimentos 25 e 50 mm. As fibras foram impermeabilizadas com sílica coloidal, a fim de se reduzir os possíveis ataques químicos e alcalinos nas fibras de coco. A adição das fibras de coco nesse estudo aumentou a resistência em todas as misturas, mostrando melhorias de acordo com teor e comprimento da fibra utilizada. Foi observado que a mistura de teor 0,5% com fibra de 50 mm teve melhores resultados, com o ângulo de atrito 20% maior que o resultado da areia pura e um intercepto coesivo de 50,43 kPa como mostra a Figura 19.

Figura 19 - Envoltórias de resistência a da areia e misturas (AGUILAR, 2015).



A mistura que previu melhor resultado em relação à resistência de cisalhamento foi a com fibras de comprimento 25 mm (Figura 18), obtendo resistência de 636 kPa, ensaiadas a uma tensão efetiva de 150 kPa, enquanto que a mistura com comprimentos de 50 mm apresentou 625 kPa de resistência nas tensões 50 e 100 kPa, mas obteve maior ângulo de atrito e maior intercepto coesivo da areia.

Após o ensaio triaxial, com o melhor teor (0,5%) obtido, comparou-se os parâmetros obtidos com fibras impermeabilizadas com sílica coloidal com as não impermeabilizadas. A finalidade da sílica coloidal foi “reduzir os possíveis ataques químicos e alcalinos que possam acontecer nas fibras de coco, criando uma zona de baixo pH ao redor das fibras, reduzindo o transporte dos produtos de cálcio para as fibras naturais” (AGUILAR, 2015, p. 59). A Tabela 8 mostra um ligeiro ganho de resistência quando utilizada a fibra impermeabilizada, em que a mistura com fibra impermeabilizada aumentou o ângulo de atrito em 4% e diminuiu a coesão aparente em 17%.

Tabela 8 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento da areia pura e as misturas com 0,5% de fibra de coco impermeabilizada e não impermeabilizada.

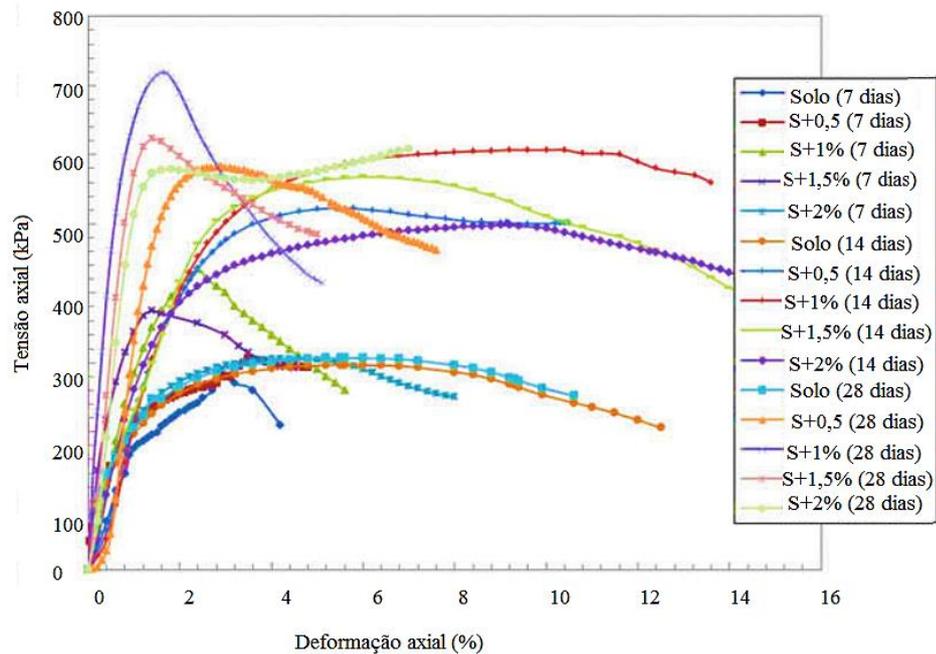
<b>Mistura</b>	<b>c'</b>	<b><math>\phi</math></b>
Solo	0,00	32,54
Solo com 0,5% de fibra não impermeabilizada	50,43	39,31
Solo com 0,5% de fibra impermeabilizada	41,41	41,25

Fonte: AGUILAR, 2015.

Anggraini et al. (2015) realizaram ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral (corpo de prova com 50 mm de altura e diâmetro) em uma argila inorgânica de alta plasticidade com fibras de coco de comprimentos de 5 a 15 mm e teores de 0, 0,5, 1, 1,5 e 2%, para diferentes dias de cura (7, 14 e 28 dias), a uma velocidade de 1 mm/min.

Para o ensaio de resistência à compressão simples (Figura 20), melhores resultados foram obtidos com o teor de 1% para 28 dias de cura (720 kPa). A resistência à compressão das amostras tratadas por 1% de fibra de coco com 28 dias aumentou 2,6 vezes mais do que a do solo sem fibra.

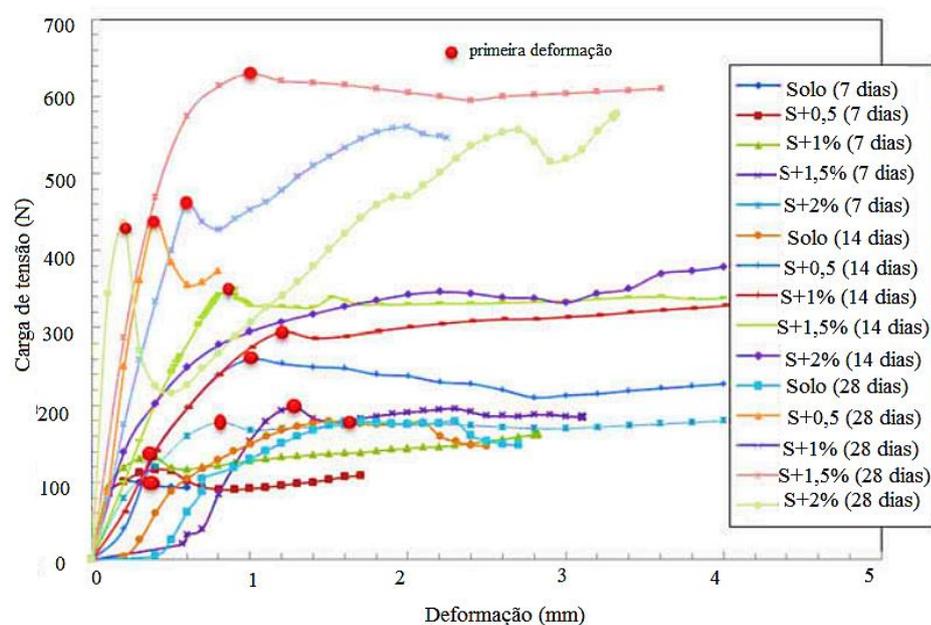
Figura 20 – Curvas tensão versus deformação específica do ensaio de resistência à compressão simples.



Fonte: ANGGRAININI et al. (2015).

Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (Figura 21), ocorreu valores menores que para o ensaio de compressão simples. O maior pico de resistência ocorreu para a mistura com 1,5% de fibra de coco, 2,6 vezes mais do que a do solo sem fibra.

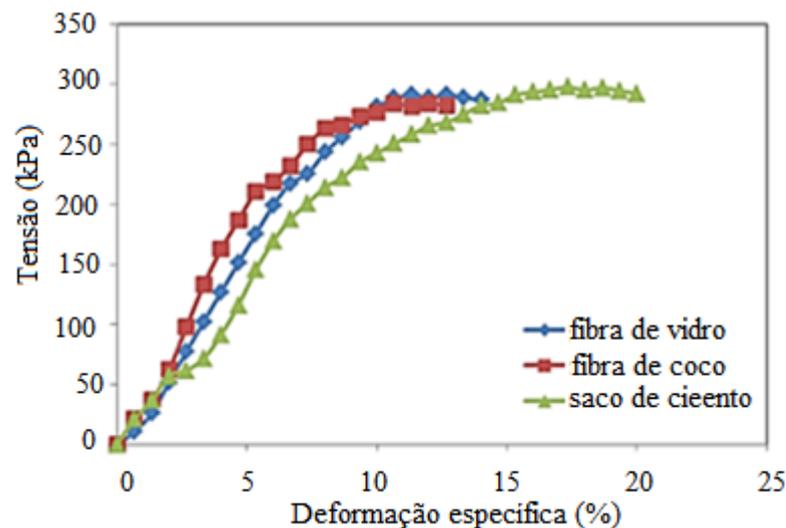
Figura 21 – Curvas carga versus deformação do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



Fonte: ANGGRAININI et al. (2015).

Kalita *et al.* (2016) investigaram as propriedades mecânicas de um solo com fibras de coco, fibras de vidro e fibras de saco de cimento, nos teores 0,25%, 0,5%, 0,75% e 1%. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples, no qual maiores valores de resistência foram alcançados para o teor de 1% (280 kPa para fibras do coco, 290,5 kPa para fibras de vidro, e 300 kPa para fibras de saco de cimento). Nesse estudo, a utilização de fibras de coco também se demonstrou válida. A resistência de compressão simples aumentou com o tamanho da fibra adicionada à matriz do solo, obtendo o máximo de 280 kPa para 1%. Contudo, não foi tão eficiente quando comparada à utilização de fibras de saco de cimento (Figura 22).

Figura 22 - Máximas resistências das fibras de coco, de vidro e de sacos de cimento.



Fonte: KALITA et al. (2016).

Pelos estudos apresentados sobre o comportamento de solos com fibras de coco, percebe-se, de forma geral, a adição de fibras de coco em solos acarreta em pequena diminuição da densidade seca máxima desse novo material, e discreto aumento de sua umidade ótima. A adição desse tipo de fibra também trouxe um incremento de resistência ao compósito, elevando resistências de compressão, por vezes com menor deformação específica. A Tabela 9 traz um resumo de resultados do ensaio de compactação de pesquisas da literatura utilizando solos e fibras de coco, enquanto que a Tabela 10 apresenta resultados encontrados para as pesquisas com fibras do coco.

Tabela 9 - Valores da densidade seca máxima e umidade ótima em pesquisas da literatura referentes a misturas solo-fibra do coco.

Tipo de solo	Teor de fibras (%)	Yd máx. (kN/m <sup>3</sup> )			W ótm. (%)			Referências
		I	M	O	I	M	O	
Argilo-arenoso	0	15,75			24,5			Bolaños (2013)
	0,5	15,5			25,2			
	0,75	14,9			23,4			
	1	14,85			24,0			
	1,25	15,4			26,0			
	1,5	15,2			25,8			
Argila de alta plasticidade	0	17,28			18,1			Chaple e Dhatrak (2013)
	0,25	16,9			19,17			
	0,5	16,7			20,23			
	0,75	16,65			20,53			
	1	16,62			20,76			
Argila de alta compressibilidade	0	14,8			25,21			Ramasubbarao (2014)
	0,5	14,6			26,27			
	1	14,52			26,97			
	1,5	14,03			29,63			
Argila de alta compressibilidade	0	19,8			6,5			Soundara e Kumar (2015)
	0,5	18,6			12			
	1	17,7			16			
	1,5	17,2			19			
Argila-arenosa (I e M) e areia-argilosa má graduada (O)	0	17,92	19,04	16,64	16,38	15,04	11,29	Ayininuola e Oladotun (2016)
	0,1	18,05	20,30	16,85	17,42	15,33	13,87	
	0,3	18,10	20,35	17,77	19,26	17,86	14,19	
	0,5	18,23	20,75	18,51	21,6	18,94	14,49	
	0,7	18,32	21,08	18,79	22,52	19,51	16,10	
	0,9	18,37	21,42	18,95	22,86	20,41	16,44	
	1	18,43	21,66	19,01	23,13	21,33	17,76	
	1,2	18,63	22,43	19,16	23,49	22,00	18,54	
	1,5	18,01	21,19	18,77	24,89	23,04	18,72	
Argila		Fibras não tratadas	Tratadas com NaOH	Tratadas com CCl <sub>4</sub>	Fibras não tratadas	Tratadas com NaOH	Tratadas com CCl <sub>4</sub>	Khatri et al. (2016)
	0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	
	0,4	18,23	18,34	18,4	12,6	12,3	12,28	
	0,8	18,16	18,19	18,3	12,9	12,7	12,65	
	1,6	18,10	18,16	18,2	13,3	13,1	13,05	
Silte de alta plasticidade	0	15,6			20,4			Silva, Costa e Baptista (2017)
	0,5	15,5			22,3			
	1	15,4			21,9			
	2	14,9			21,6			
	4	15,5			21,7			

Fonte: Autor.

Tabela 10 – Resumo das principais pesquisas da literatura referente à resistência do solo e misturas solo-fibra do coco.

Ensaio	Solo	Fibras (mm)	Compósitos	Valores de Resistência (kPa) (°)				Referência	
				Pico		Residual			
Compressão simples e Cisalhamento direto	Argila de baixa compressibilidade	15		CS				Kar e Pradhan (2011)	
			S+0	88	40	27	40		25
			S+0,2	128	80	24	83		22
			S+0,4	148	97	27	87		27
			S+0,6	156	100	31	92		31
			S+0,8	132	110	33	108		31
	S+1	-	110	33	92	31			
Triaxial	Argila-arenosa	20			c'		φ'	Bolaños (2013)	
			S+0		30		25		
			S+0,5		54		26		
			S+0,75		42		29		
			S+1		68		30		
			S+1,25		64		29		
	S+1,5		86		29				
Compressão simples e cisalhamento direto	Areia-argilosa	20		CS			CD	Kar; Pradhan; Naik (2014)	
			S+0		90		45		26
			S+0,2		140		90		28
			S+0,4		160		110		32
			S+0,6		195		118		37
			S+0,8		210		120		39
	S+1		170		117	38			
Compressão simples	Argila	30 a 50	S+0			269,6		Singh e Mittal (2014)	
			S+0,25			284,4			
			S+0,5			443,3			
			S+0,75			520,7			
			S+1			620,7			
Triaxial	Areia uniforme	25 e 50			c'		φ'	Aguilar (2015)	
			S+0		0		33		
			S+0,25-25mm		19		37		
			S+0,25-50mm		21		37		
			S+0,5-25mm		16		41		
			S+0,5-50mm		50		39		
			S+0,75-25mm		8		45		
S+0,75-50mm		27		41					
Compressão simples e Tração por compressão diametral	Argila	5 a 15		CS			TCD	Anggraini et al. (2015)	
			S+0		300		10		
			S+0,5		305		13		
			S+1		400		16		
			S+1,5		350		20		
	S+2		310		18				
Compressão simples	Solo vermelho	-	S+0			115		Kalita et al. (2016)	
			S+0,25			220			
			S+0,5			230			
			S+0,75			260			
			S+1			280			
Cisalhamento direto	Solo arenoso (A) e areno-argiloso (B)	-			A		B	Norsyahariati et al. (2016)	
					c'	φ'	c'		φ'
			S+0		48	21	19		22
	S+1		34	23	16	30			

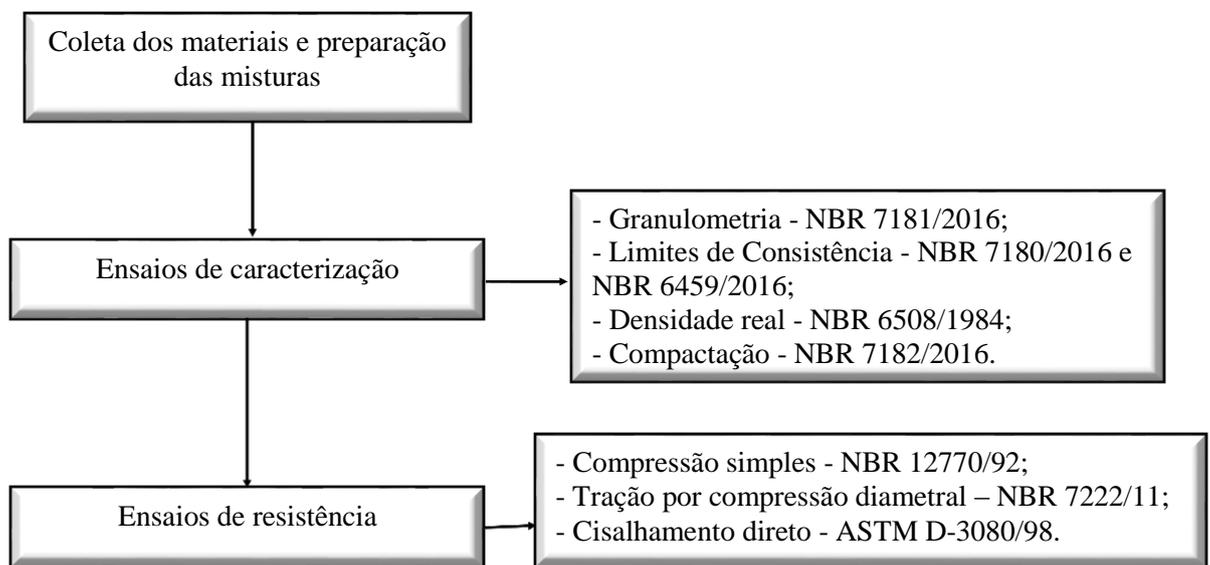
Fonte: Autor.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Introdução

O programa experimental desta pesquisa está dividido em três etapas, como pode ser visualizado na Figura 23. A primeira etapa consiste na coleta e preparação dos materiais a serem estudados (solo e fibras de coco). A segunda corresponde à caracterização física desses materiais. Por fim, para avaliação do comportamento mecânico, a terceira etapa compreende a execução de ensaios de resistência do solo e compósitos. O Quadro 4 mostra o quantitativo de ensaios realizados.

Figura 23 – Programa de investigação experimental realizado na pesquisa.



Quadro 4 – Quantitativo de ensaios.

Ensaio	Quantidades
Granulometria	5
Densidade real	15
Limites de consistência	10
Compactação	5
Compressão simples	25
Tração por compressão diametral	25
Cisalhamento direto	20
Total	105

Desta forma, os ensaios estabelecidos para a pesquisa permitirão o conhecimento das propriedades individuais de cada material assim como dos compósitos, avaliando-se com isso as possíveis alterações físicas e mecânicas a partir da inserção das fibras ao solo.

### 3.2 Coleta do solo e aquisição das fibras

O solo foi extraído na encosta Alto Reservatório, situado no bairro de Nova Descoberta, em Recife-PE (Figura 24a). Trata-se de uma área constituída de solos da Formação Barreiras, composto de sedimentos não consolidados, caracterizado por camadas sub-horizontais de granulometria diferenciada, apresentando um alto potencial de risco de instabilidade de taludes (MEIRA et al., 2006) e susceptível a erosão, e que já foi estudada em pesquisas anteriores (LAFAYETTE, 2000; LIMA, 2002; SÁ, 2006; MOURA, 2011; MACEDO, 2016). O solo estudado foi coletado da encosta por meio de pá e enxada, cerca de 100 kg. O material então foi acomodado em sacos plásticos fechados e encaminhados ao Laboratório de Mecânica dos Solos, na Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. O solo foi posteriormente disposto para secagem ao ar durante uma semana e destorroado.

Com relação às fibras (Figura 24b), cerca de 3 kg foram fornecidos por uma empresa atuante no ramo de máquinas agrícolas, situada em Fortaleza-CE, que fabrica a usina de beneficiamento da casca do coco. As fibras produzidas são prontas para o uso, porém foi necessário cortá-las, facilitando sua trabalhabilidade, em função da dimensão dos corpos de prova.

Figura 24 - Processo de coleta do solo (A) e as fibras de coco verde fornecidas (B).



Fonte: Autor

### 3.3 Preparação dos materiais

Para realização dos ensaios predeterminados nesta pesquisa, os materiais passaram por uma preparação prévia, conforme a NBR 6457 (ABNT, 1986). Dessa forma, o solo foi seco ao ar e destorroado, posteriormente passado na peneira nº 4 (4,8 mm) para retirada de possíveis grãos com tamanhos maiores.

No que se refere às fibras do coco verde, foi necessário reduzir o comprimento das mesmas. Foram utilizados tesoura e dois moldes quadrados de 20 mm, comprimento das fibras a ser

investigado, baseado em estudos prévios (BABU; VASUDEVAN; SAYIDA, 2008; BOLAÑOS, 2013; CHAPLE; DHATRAK, 2013; MALIAKAL; THIYYAKKANDI, 2013; KAR; PRADHAN; NAIK, 2014; AGUILAR, 2015), tendo em vista o diâmetro dos corpos de prova dos ensaios de resistência à compressão usado ser de 50 mm. Devido à natureza orgânica da fibra de coco, não se pode garantir um comprimento exato para todas, havendo uma variação para mais ou para menos, porém procurou-se obter o máximo de homogeneidade possível.

Em seguida, foram preparadas as misturas, nas proporções de 0,25, 0,5, 0,75 e 1% em relação ao peso do solo seco. Esses teores foram escolhidos com base em estudos anteriores (BOLAÑOS, 2013; CHAPLE; DHATRAK, 2013; MALIAKAL; THIYYAKKANDI, 2013; SINGH; MITTAL, 2014; TIWARI; MAHIYAR; 2014; AGUILAR, 2015; ANGGRAINI et al., 2015; AYININUOLA; OLADOTUN, 2016; KALITA et al., 2016; SUBRAMANI; UDAYAKUMAR, 2016). A Figura 25 apresenta a amostra de solo com 1% de fibra de coco.

Figura 25 - Solo e fibras antes da homogeneização.



Fonte: Autor.

É válido salientar que na preparação dessas misturas foram seguidas algumas etapas a fim de facilitar o trabalho com o material e produzir amostras com um mesmo padrão. Após o peneiramento do solo, as fibras foram misturadas, tentando obter máxima homogeneização, pois estas tendem a se aglomerar. Só então era acrescentada água gradualmente, para se atingir a umidade ótima e novamente misturado, tomando o cuidado para que as fibras não se aglomerassem em diferentes partes da amostra. Na Tabela 11 são apresentadas as amostras e suas proporções dos materiais utilizados.

Tabela 11 – Identificação das amostras e composição das misturas.

Amostra	Nomenclatura	% em peso de cada material	
		Solo	Fibra
Solo sem fibras	Solo	100	0
Solo com 0,25% de fibra	S+0,25%	99,75	0,25
Solo com 0,5% de fibra	S+0,5%	99,5	0,5
Solo com 0,75% de fibra	S+0,75%	99,25	0,75
Solo com 1% de fibra	S+1%	99,0	1,0

A determinação destes teores foi feita a fim de se analisar o comportamento do solo a partir da inserção gradual de fibras, verificando a influência destas nos parâmetros de resistência do solo, traçando um comparativo entre os quatro compósitos e o solo para estabelecer um teor ótimo de melhoramento do solo.

### 3.4 Caracterização física e mecânica do solo e misturas

A caracterização física dos materiais foi realizada por meio dos ensaios de Análise granulométrica, Determinação da densidade real dos grãos, de determinação do limite de liquidez, ensaios de limite de plasticidade, e ensaio de compactação.

Para a granulometria, foi utilizado 1 kg de cada amostra. No caso dos ensaios de densidade real dos grãos, foram utilizados bomba à de vácuo para retirada do ar das amostras, e picnômetro de 500 ml, para uma melhor precisão dos resultados no caso das fibras. Os ensaios de compactação foram realizados com energia Proctor Normal, utilizando 3 kg de cada amostra, compactadas em três camadas, com reuso de material.

Para conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais e das misturas solo-fibras foram realizados os ensaios de Resistência à compressão simples (RCS); Determinação da resistência à tração por compressão diametral (RTCD) de corpos de prova cilíndricos; e ensaios de resistência ao cisalhamento direto (RCD). A execução desses ensaios se dá pelo fato de essas tensões de compressão, tração e cisalhamento também se dão em encostas (RAMANATHAN; RAMAN, 1974) ou aterros (ZEH; WITT, 2007).

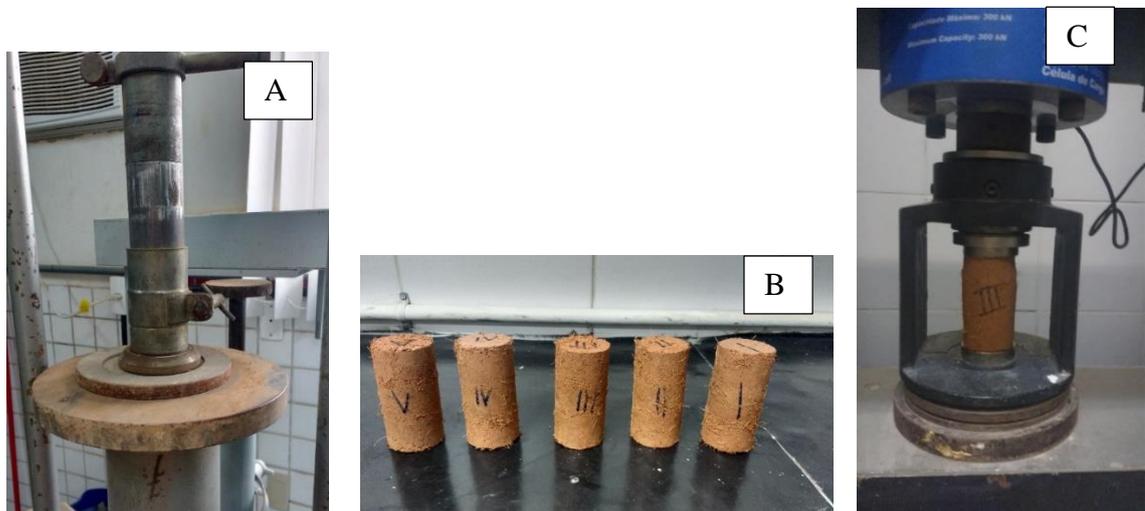
### 3.4.1 Ensaio de resistência à compressão simples

Para a obtenção dos corpos de prova, foram preparadas amostras de solo e de misturas, acondicionadas em sacos e recipiente de isopor durante um dia, tempo de determinar a umidade das amostras.

Foi realizada compactação estática das amostras em três camadas no interior de um molde cilíndrico de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Cada camada foi escarificada antes da sobreposição da camada superior, e foi aplicada vaselina na parte interna do cilindro para facilitar a retirada do corpo de prova após a moldagem. Ao final da compactação, os corpos de prova foram pesados e registradas suas alturas e diâmetros com auxílio de um paquímetro.

A Figura 26a apresenta o corpo de prova durante o processo de moldagem na prensa manual da marca Solotest, e a Figura 26b mostra os corpos de prova após sua extração do molde. Para cada mistura, foram moldados cinco corpos de prova, que deviam seguir a exigência do grau e compactação, entre 97% a 103%, proposto por Macedo (2013). Procedimento também conduzido para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (Item 3.4.2).

Figura 26 - Moldagem do corpo de prova para o ensaio de compressão simples (A); corpos de prova após compactação (B) e durante o ensaio (C).



Fonte: Autor.

Após a moldagem dos corpos de prova, estes foram levados a uma prensa, modelo DL 30.000 (Figura 26c). A célula de carga da prensa tem capacidade máxima de 300 kN. O ensaio foi feito a uma velocidade de 0,5 mm/min, calculada segundo a NBR 12.770/1992.

### 3.4.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Foi utilizada a norma NBR 7.222/2011, uma vez que não existe uma normatização desse ensaio para solos. Esse ensaio consiste em uma compressão diametral de uma amostra cilíndrica colocada longitudinalmente entre os pratos de uma máquina de compressão simples, em contato com frisos superior e inferior para melhor distribuição da carga (DIEMER, 2014).

Os corpos de prova foram moldados (Figura 26a) e levados à prensa para execução do ensaio (Figura 27), com velocidade de 0,25 mm/min, com base nos resultados do ensaio de compressão simples, para se atingir o mesmo nível de deformação. Para ambos os ensaios, houve medições da tensão axial para diferentes condições finais de deformação, tendo em vista que o ensaio de compressão simples havia um limite de deformação da prensa, porém para o ensaio tração por compressão diametral não havia esse limite, dependendo do rompimento dos corpos de prova.

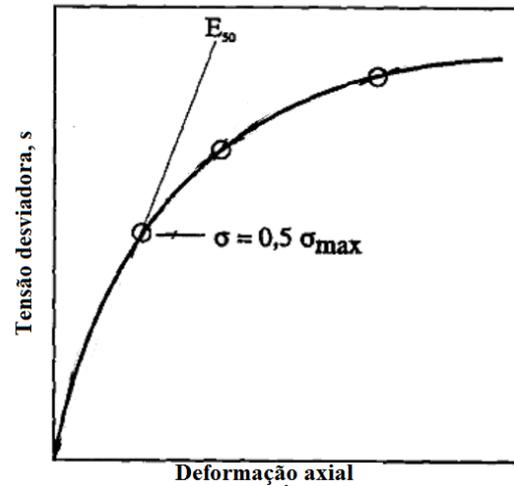
Figura 27 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral do solo.



Fonte: Autor.

Para ambos os ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral, foram calculados os módulos de elasticidade e rigidez, respectivamente, definidos para um nível de tensão de 50% da tensão de ruptura, que corresponderia ao módulo sob determinado nível de carregamento que provoca a ruptura do solo, indicando a sua deformabilidade (Figura 28). Critério também adotado por CUSTÓDIO (2013) e FREITAS (2016).

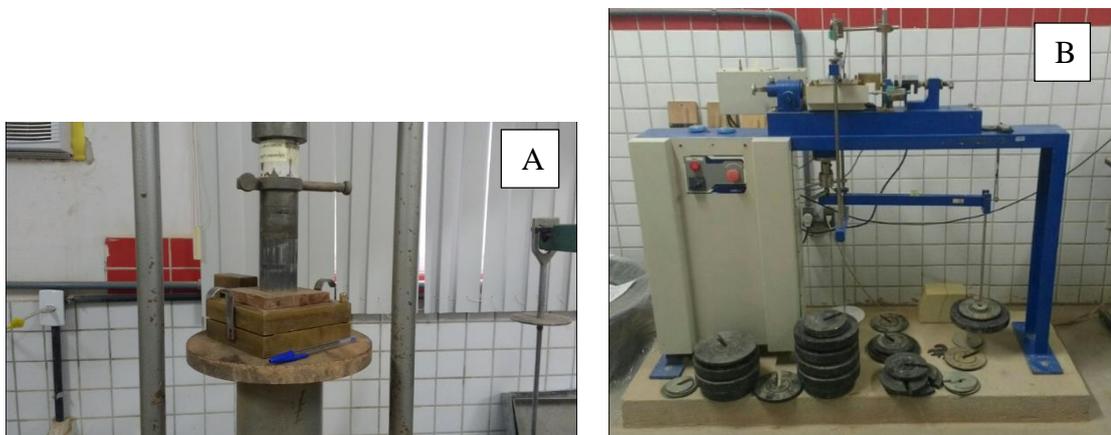
Figura 28 - Critério de definição do módulo de elasticidade do solo (adaptado de FREITAS, 2016).



### 3.4.3 Ensaio de resistência ao cisalhamento direto

A compactação estática dos corpos de prova (Figura 29a) foi feita em duas camadas, de forma que a primeira camada ficasse abaixo do eixo de corte da caixa de cisalhamento (40 mm de altura, por 100 mm de comprimento e largura). Os ensaios foram executados numa prensa (Figura 29b) com célula de carga com capacidade de 500 kgf. A velocidade foi calculada de modo que em 3 horas de ensaio fosse alcançado 15 mm de deslocamento horizontal, sendo a velocidade média padrão de 0,083 mm/min.

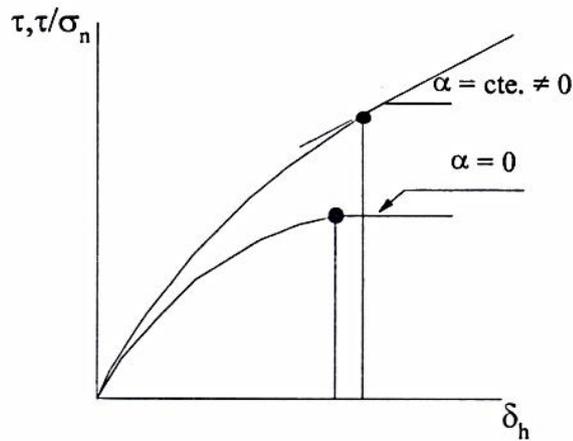
Figura 29 – Moldagem de corpo de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento direto (A) e Prensa do ensaio de resistência ao cisalhamento direto (B).



Foi adotado o ensaio adensado rápido não inundado, tomando como parâmetro de compactação das amostras a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo, com a aplicação das tensões normais 50, 100, 150 e 200 kPa, e tempo de consolidação 1 hora, para todas as amostras.

Para a análise dos resultados, foi utilizado um critério de ruptura para as curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal que não apresentaram pico de resistência definido. Esse critério adotado foi a partir do ponto em que a curva apresenta uma razoável inclinação constante (Figura 30). Critério seguido em Soares (2005), Macedo (2016) e Silva (2018).

Figura 30 – Definição da tensão de cisalhamento de ruptura (DE CAMPOS e CARRILLO, 1995).



## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos na investigação laboratorial do solo misturado com a fibra de coco.

### 4.1 Propriedades físicas do solo e misturas

#### 4.1.2 Análise granulométrica

As curvas granulométricas do solo e dos compósitos estão apresentadas na Figura 31, enquanto a Tabela 12 apresenta os dados provenientes de análise granulométrica. O solo possui uma distribuição de suas partículas predominantemente compreendidas entre as frações de 4,8mm (#4) e 0,05mm (#30), o que corresponde a areia. A granulometria das misturas não resultou em variação considerável em relação ao solo, devido ao baixo teor das fibras adicionadas; experiência igualmente verificada em Aguilar (2015).

Figura 31 - Curva granulométrica do solo e misturas.

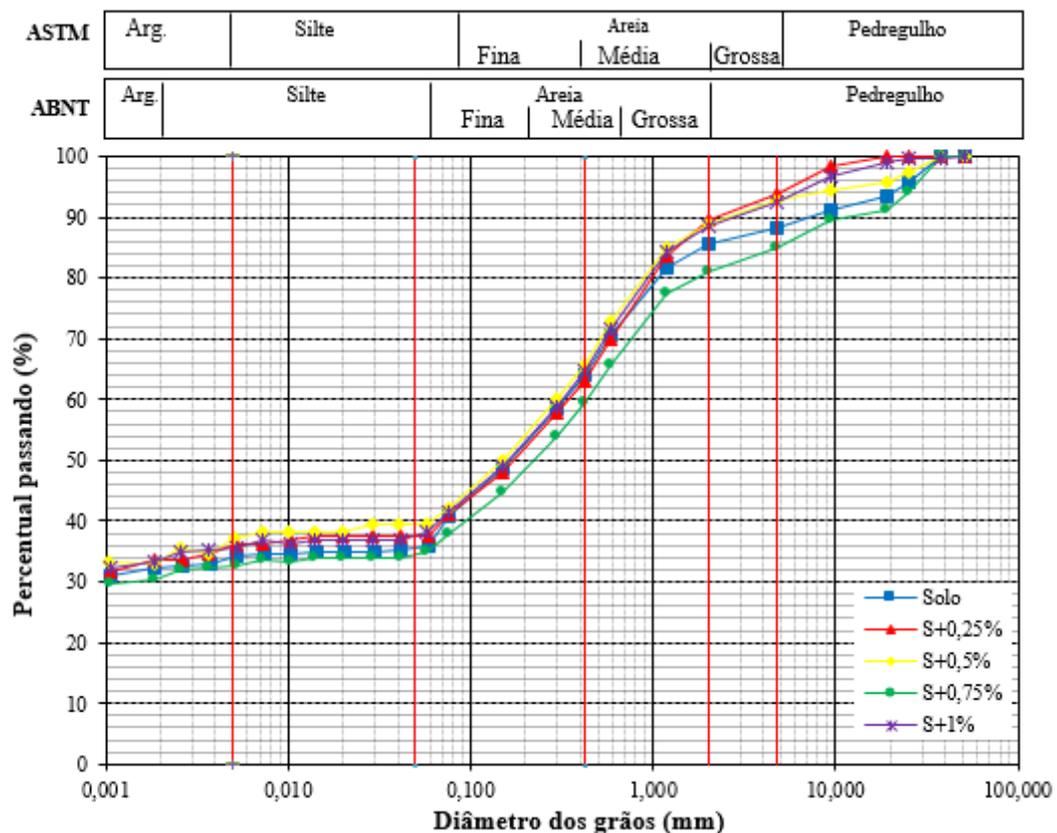


Tabela 12 – Frações granulométricas do solo e misturas.

Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)			Pedregulho (%)
			Fina	Média	Grossa	
Solo	33	1	30	21	3	12
S+0,25%	38	2	25	25	4	6
S+0,5%	38	2	15	16	17	13
S+0,75%	34	1	14	16	15	18
S+1%	36	2	27	24	4	8

#### 4.1.2 Densidade real

A Tabela 13 apresenta os valores da densidade real dos grãos dos materiais (solo, fibras e misturas). O resultado final foi obtido com a média do resultado de três ensaios. A análise dos resultados mostrou que o solo apresenta uma densidade real dos grãos de 2,63, valor próximo ao encontrado por Macedo (2016), de 2,66, que estudou o solo da mesma localidade. Os resultados das misturas se mostraram iguais ou próximos ao do solo, devido ao baixo teor da presença das fibras e ao baixo peso destas.

Tabela 13 - Densidade real do solo, fibras e misturas.

Amostras	Solo	Fibras	S+0,25%	S+0,5%	S+0,75%	S+1%
<b>G</b>	2,63	0,99	2,63	2,63	2,63	2,62

A densidade das fibras foi de 0,99, comprovando seu baixo peso frente ao solo. O resultado foi próximo dos encontrados por Motta, Agopyan e John (2007), de 1,29g/cm<sup>3</sup>, por Pereira (2012), de 1,4±0,02g/cm<sup>3</sup>, e por Toledo, Ghavami e England (2005), de 1,0g/cm<sup>3</sup>, também para fibras de coco.

#### 4.1.3 Limites de Consistência

Os resultados dos ensaios dos Limites de Consistência se encontram na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultado dos limites de Consistência.

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classificação	SUCS	TRB
Solo	44	23	21	Altamente plástico	SC	A-7-6
S+0,25%	43	30	13	Plasticidade média	SM	A-7-5
S+0,5%	44	30	14	Plasticidade média	SM	A-7-5
S+0,75%	41	27	14	Plasticidade média	SM	A-7-6
S+1%	43	31	12	Plasticidade média	SM	A-7-6

Houve um aumento do limite de plasticidade das misturas em relação ao solo, ocasionando uma diminuição do índice de plasticidade, fazendo considerar as misturas um material menos plástico que o solo. De posse dos resultados dos IP do solo e misturas (Tabela 12), foi possível obter o índice de atividade das argilas (A), através do método de Skempton (1953). As amostras obtiveram índices  $A=0,62$  (solo),  $A=0,34$  (S+0,25%),  $A=0,37$  (S+0,5%),  $A=0,41$  (0,75%), e  $A=0,34$  (S+1%), sendo consideradas inativas.

Comparando os resultados do solo com os encontrados em pesquisas que utilizaram o solo do mesmo local, houve algumas semelhanças e diferenças, tendo que em vista que a granulometria do solo da encosta pode variar entre areia-argilosa, argila-arenosa e areia-siltosa (LAFAYETTE, 2000). Lafayette (2000) obteve resultados do índice de plasticidade variando entre 16 a 20%, e limite de liquidez, entre 16 a 20%, para 0,5m de profundidade. Lima (2002) obteve resultados próximos,  $IP=16\%$  e  $LL=42\%$  (ombro da encosta) e  $IP=21\%$  e  $LL=44\%$  (base da encosta). Sá (2006) obteve  $IP=16\%$  e  $LL=28$ , obtendo uma argila de alta compressibilidade (SUCS) e solo do tipo A-6 (TRB), e  $A=0,38$  (inativo). Macedo (2016) encontrou resultados diferentes,  $IP=6\%$  e  $LL=27\%$ .

Conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), levando em consideração as frações do solo e os limites de consistência, o solo foi classificado como areno-argiloso (SC) e as misturas em areno-siltosas (SM). Experiência também relatada em Macedo (2016), com a inserção de fibras de pneu. Conforme o Sistema Transportation Research Board (TRB), as amostras pertencem ao grupo A-7-6 e A-7-5, sendo argilas de comportamento como subleito de fraco a pobre.

#### **4.1.4 Compactação Proctor Normal**

As curvas de compactação do solo e das misturas são apresentadas na Figura 32, enquanto que os valores relacionados ao peso específico aparente seco máximo e teor de umidade ótima são mostrados na Tabela 15.

O solo sem reforço apresenta um peso específico seco máximo de  $17,55 \text{ kN/m}^3$  e umidade ótima de 15,3%. Resultados foram próximos do de Macedo (2016), densidade máxima seca  $18,70 \text{ kN/m}^3$  e umidade ótima 14,90%, cujo solo foi extraído da mesma encosta, porém se apresentou mais arenoso; e também em Silva (2018), que encontrou valores de  $17,6 \text{ kN/m}^3$  e 17,5%.

Não houve diferenças com relação ao peso específico das misturas e do solo; enquanto que houve um ligeiro aumento (em torno de 1%) dos valores das umidades ótimas, devido à capacidade de absorção de umidade das fibras, porém sem grande variação significativa.

Figura 32 - Curvas de compactação do solo e misturas.

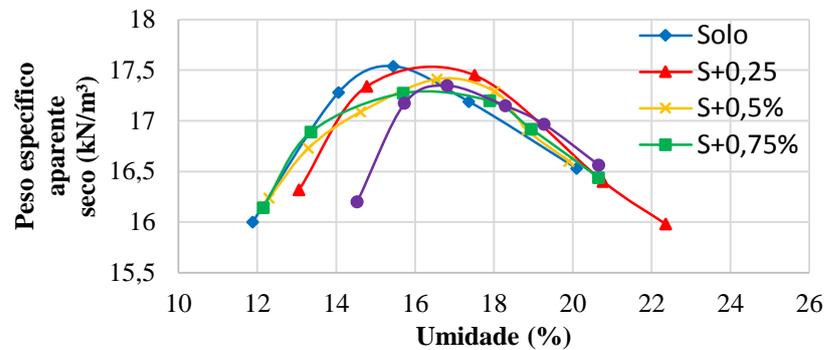


Tabela 15 – Valores do peso específico aparente seco e umidade ótima do solo e das misturas.

Misturas	$\gamma_d$ máx (kN/m <sup>3</sup> )	Wot (%)
Solo	17,55	15,3
S+ ,25%	17,50	16,5
S+0,5%	17,42	16,5
S+0,75%	17,29	16,3
S+1%	17,35	16,8

Com relação a pesquisas que utilizaram o solo da mesma encosta, resultados semelhantes foram encontrados em Lafayette (2000), cuja umidade média encontrada foi 18,2% e peso específico aparente seco máximo de 17,48 kN/m<sup>3</sup> (para 0,5m de profundidade), e em Sá (2006), umidade encontrada foi 19,3% e peso específico aparente seco máximo de 16,5 kN/m<sup>3</sup>.

Com relação a misturas solo-fibras de coco, em Chaple e Dhatrak (2013), para todos os teores, a densidade aparente seca máxima diminuiu de 17,28 kN/m<sup>3</sup> do solo para 16,62 kN/m<sup>3</sup> para o teor de 1% de fibra de coco, enquanto que para todas as misturas a umidade ótima aumentou de 18,1% do solo para 20,76% para o teor de 1%.

Em Anggraini et al. (2014), foi registrado a mesma tendência para um solo argilo-siltoso, com teores de fibra de coco 0,5, 1, 1,5 e 2%, e 5% de cal, relativos ao peso seco do solo. Soundara e Kumar (2015) obtiveram a mesma tendência de diminuição da densidade (19,8 kN/m<sup>3</sup> para o solo e 17,2 kN/m<sup>3</sup> para o teor de 1,5%), e aumento da umidade ótima, de 6,5% para o solo 19% para o teor de 1,5% de fibra.

## 4.2 Propriedades mecânicas do solo e das misturas

Nesse item são mostrados e avaliados os resultados para o ensaio de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, e resistência ao cisalhamento direto.

### 4.2.1 Resistência à compressão simples

A Tabela 16 apresenta os valores de resistência à compressão simples obtidos, assim como outros parâmetros importantes para as análises. Os índices físicos das amostras estão no Apêndice A. Com a obtenção do módulo de elasticidade e da deformação axial de ruptura, observou-se que a crescente adição de fibras tende a deixar o compósito menos rígido, provavelmente devido a fibra ser um material mais flexível que o solo. Os valores das deformações, crescentes com o aumento do teor de fibras, mostraram a tendência das misturas de se tornar um material mais dúctil que o solo sem o reforço.

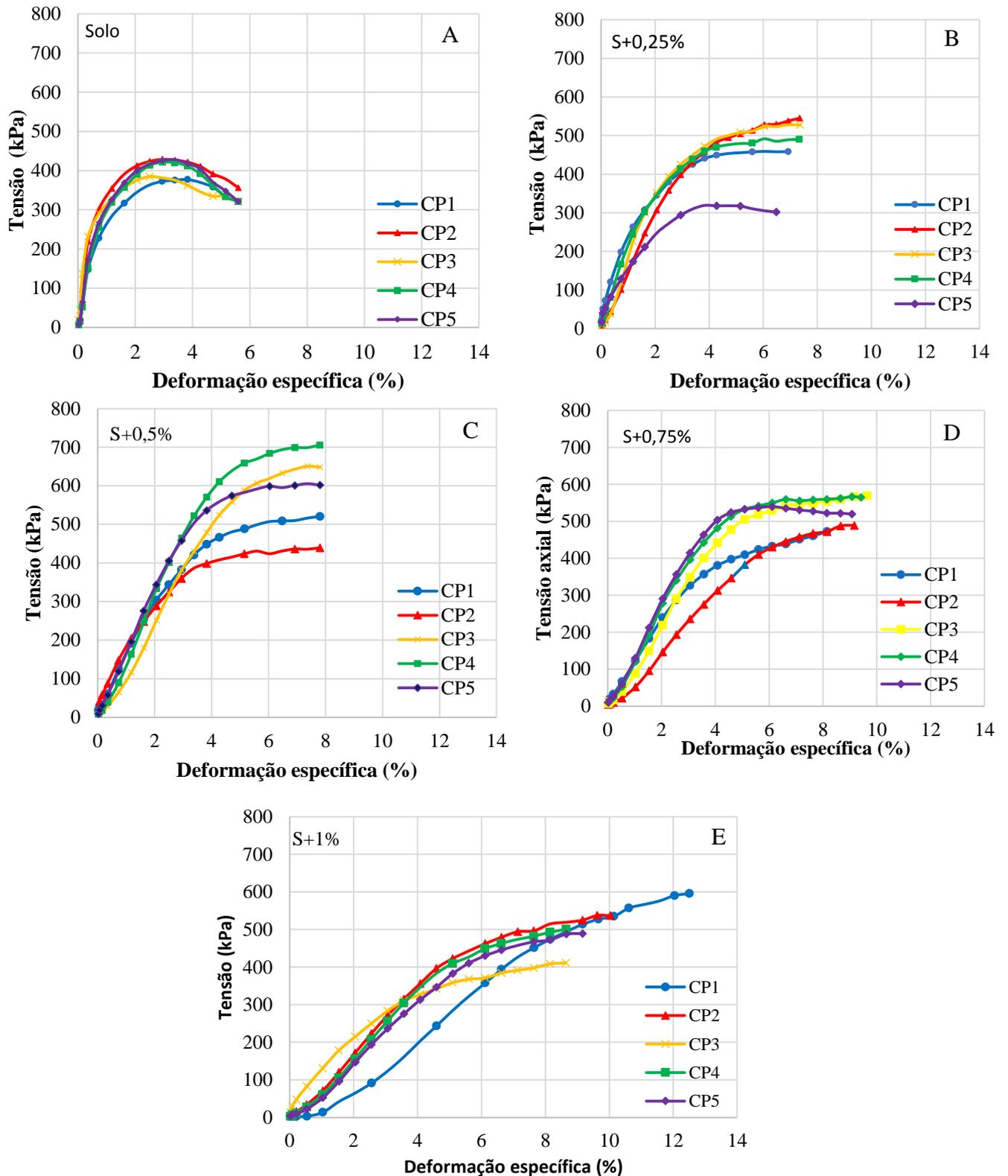
Tabela 16 – Resumo dos dados obtidos no ensaio de resistência à compressão simples.

	CP	RCS (kPa)	Média (kPa)	Coef. de variação (%)	Acréscimo médio resistência (%)	Módulo de elasticidade (MPa)	Média (MPa)	Coef. de variação (%)	Deformação axial de ruptura (%)	ME/RCS
<b>Solo</b>	1	383,3				13,4			3,5	34,9
	2	435,8				18			3,5	41,3
	3	388,6	413,8	6,2	-	19,6	16,4	14,9	3	50,4
	4	425,3				15			3	35,2
	5	435,8				16			3,5	36,8
<b>S+0,25%</b>	1	467,3				23			4,5	49,2
	2	551,3				15			4,5	27,2
	3	535,6	475,7	18,9	14,9	19	19,2	14,9	4,5	35,5
	4	498,8				20			4,5	40,0
	5	325,6				19			3,5	48,5
<b>S+0,5%</b>	1	530,3				16			6	30,2
	2	446,3				17			6	38,1
	3	677,4	597,5	18,7	44,4	12	15,6	13,4	6	17,9
	4	724,6				16,1			6	22,2
	5	609,1				17,1			6	28,0
<b>S+0,75%</b>	1	483,1				12,5			4,2	25,9
	2	519,8				12,4			5,8	23,9
	3	577,6	539,8	7,3	31,1	11,4	11,8	4,9	6	20,5
	4	572,3				11,4			6	19,9
	5	546,1				11,4			6	20,9
<b>S+1%</b>	1	603,8				5,3			7,5	8,79
	2	546,1				5			6	9,2
	3	414,8	519,8	11,0	30,4	11,6	7,4	36,2	4,7	27,9
	4	519,8				8,1			6	15,6
	5	514,6				6,9			6	13,4

\*Resistência à compressão simples – RCS; Módulo de elasticidade – ME.

As curvas tensão axial versus deformação específica de cada amostra investigadas são apresentadas na Figura 33.

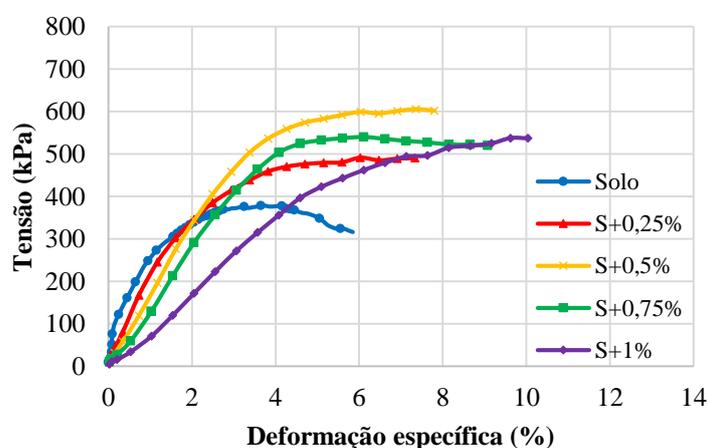
Figura 33 - Curvas tensão versus deformação específica axial do solo e misturas.



O solo (Figura 32a) apresentou comportamento de pico, típico de material friável, sendo registrado um aumento da resistência, entre 3 a 4% de deformação. Após esse ponto, ocorre um decréscimo das tensões aplicadas. Para as misturas (Figuras 33b, 33c, 33d, 33e), verifica-se um comportamento plástico com endurecimento, caracterizando um material mais dúctil que o solo. Foi observado um comportamento fora do padrão do CP5 na Figura 33b, que pode ter ocorrido devido a algum problema na homogeneização do solo-fibra. Ocorre um aumento constante de resistência para maiores deformações. Observações similares foram obtidas por Kar, Pradhan e Naik (2014), e Subramani e Udayakumar (2016).

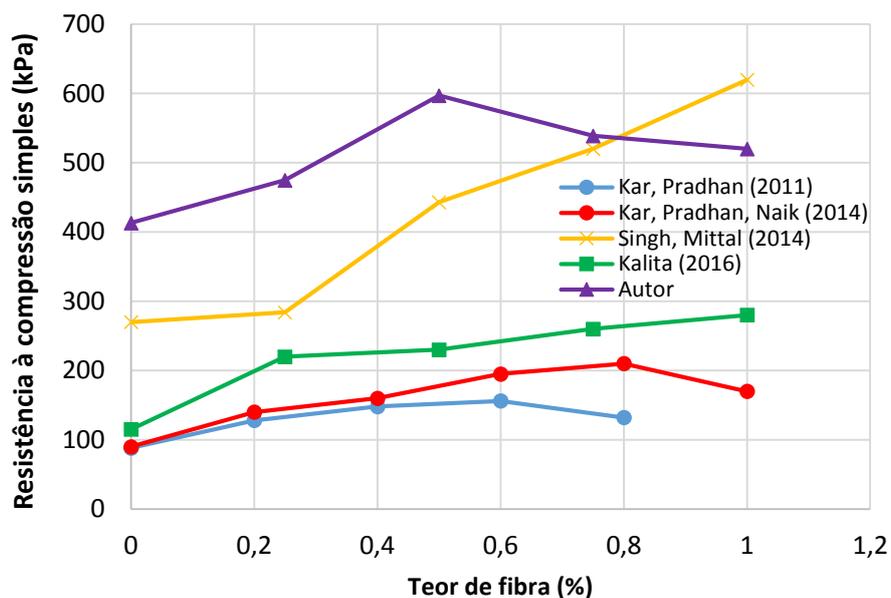
A Figura 34 mostra as curvas obtidas para cada amostra, com base nos valores médios dos teores. A curva do solo sem fibras mostrou um comportamento de material mais rígido e menos resistente, com um pico de deformação e ruptura frágil. Com a inclusão da fibra, houve uma alteração dessa característica, que indica um material menos rígido e mais dúctil, com uma ruptura plástica.

Figura 34 – Curvas tensão média versus deformação específica do ensaio de resistência à compressão simples.



A partir da Figura 35, constata-se que a resistência à compressão simples aumentou com a inserção de fibras do coco verde, atingindo maior valor com 0,5% de fibra (44,4% maior que o solo). Para os teores maiores 0,75% e 1%, houve um pequeno decréscimo da resistência, em relação à mistura S+0,5%, mostrando que não houve uma interação entre a matriz do solo e as fibras melhor que o teor de 0,5%.

Figura 35 - Variação dos valores da resistência à compressão simples em demais pesquisas da literatura.

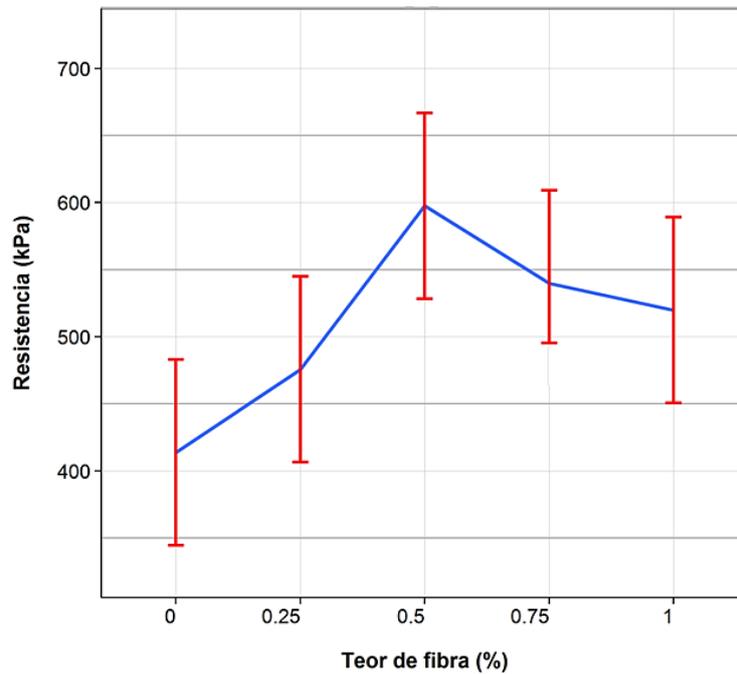


Foi comparado o comportamento dos valores da resistência à compressão simples com os de pesquisas anteriores, e foram observados resultados semelhantes nos estudos de Kar e Pradhan (2011), onde foi observada melhor capacidade de resistência o solo com 0,6% de fibra de 15 mm; em Chegenizadeh e Nikraz (2012), para 1% de fibra de 20 mm; Kar, Pradhan e Naik realizaram essa investigação em um solo areno-argiloso, com fibras de 20 mm, e observaram que o melhor teor foi o de 0,8%, conferindo um aumento de 57% à RCS.

Quando o solo reforçado é submetido a uma carga externa, as fibras são acionadas, aumentando o desenvolvimento da interligação entre as partículas do solo. Isso melhora a resistência ao atrito, gerando um aumento de resistência do compósito. Porém, estudos indicam que a adição de fibras acima do ideal poderia reduzir a eficácia dessa melhoria na resistência, pois as fibras passariam a interagir entre si, e não com o solo (SIVAKUMAR E VASUDEVAN 2008; ANGGRAIN, 2014).

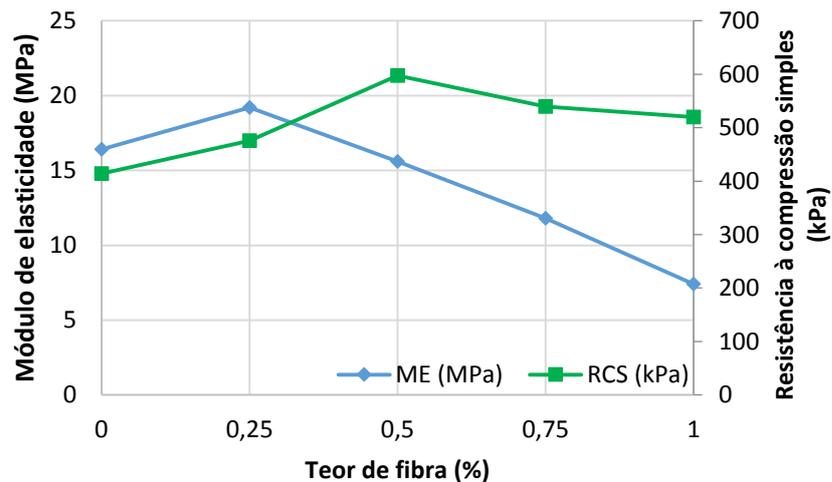
A Figura 36 mostra os intervalos de confiança a nível de 95% dos valores das resistências à compressão simples. Melhores resultados de resistência foram obtidos pelas misturas S+0,5% e S+0,75%. Foram observados maiores valores do coeficiente de variância, mostrando uma característica de heterogeneidade maior que o solo, principalmente para o teor de 0,5%.

Figura 36 – Intervalos a 95% das resistências à compressão simples.



Também foi comparado a tendência de acréscimo e decréscimo das resistências com relação ao módulo de elasticidade, reafirmando que este diminui com a inserção de fibras (Figura 37).

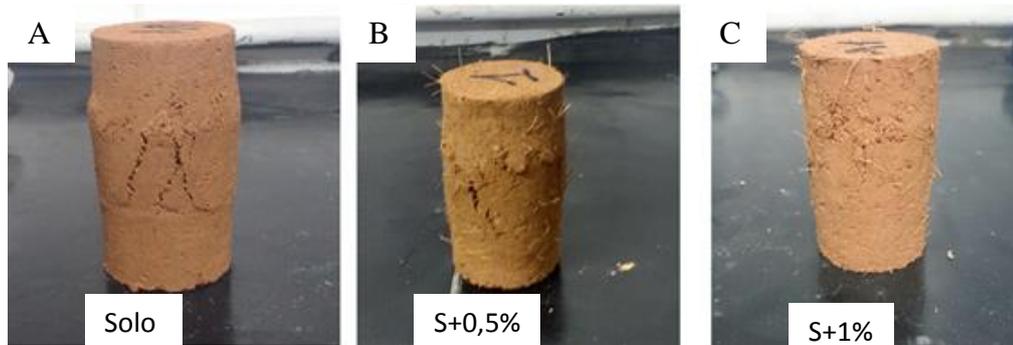
Figura 37 – Comportamento do módulo de elasticidade e da resistência à compressão simples conforme adição de fibras do coco.



Uma vista dos corpos de prova antes e depois do ensaio e foi verificado que à medida que o teor de fibras aumenta, as rupturas externas visíveis ocorrem com menos frequência (Figura

38). Maiores resistências foram obtidas pela mistura S+0,5%, porém a amostra S+1% mostrou-se mais dúctil, havendo menos rupturas aparentes, distribuídas por todo o corpo de prova.

Figura 38 - Modo de rupturas ocorridas nas amostras de Solo (a), S+0,5% (b) e S+1% (c) quando submetidas à compressão simples.



Este tipo de comportamento foi constatado por Bolaños (2013) e Maliakal e Thiyyakkandi (2013), para os maiores teores na ordem de 0,75%, 1% e 1,5%. Resultado semelhante encontrado em Kar e Pradhan (2011), para 0,4% de fibra, porém de 15mm, em um solo argiloso; e em Sebastian, Cyrus e Jose (2011), encontrando melhores resultados para 0,8% de fibra de 20 mm, em um solo argiloso.

#### 4.2.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Inicialmente, a Tabela 17 apresenta os valores de resistência à tração por compressão diametral obtidos, assim como demais parâmetros importantes para as análises. Os índices físicos das amostras utilizadas estão no Apêndice B.

Houve um ligeiro aumento dos valores do módulo de rigidez até o teor de 0,75%, uma vez que a resistência à tração por compressão diametral do solo é muito baixa. Há menor valor para 1% de fibras. Com o aumento dos valores da deformação de ruptura, foi identificada a tendência das misturas de se tornar um material mais dúctil do que o solo sem reforço.

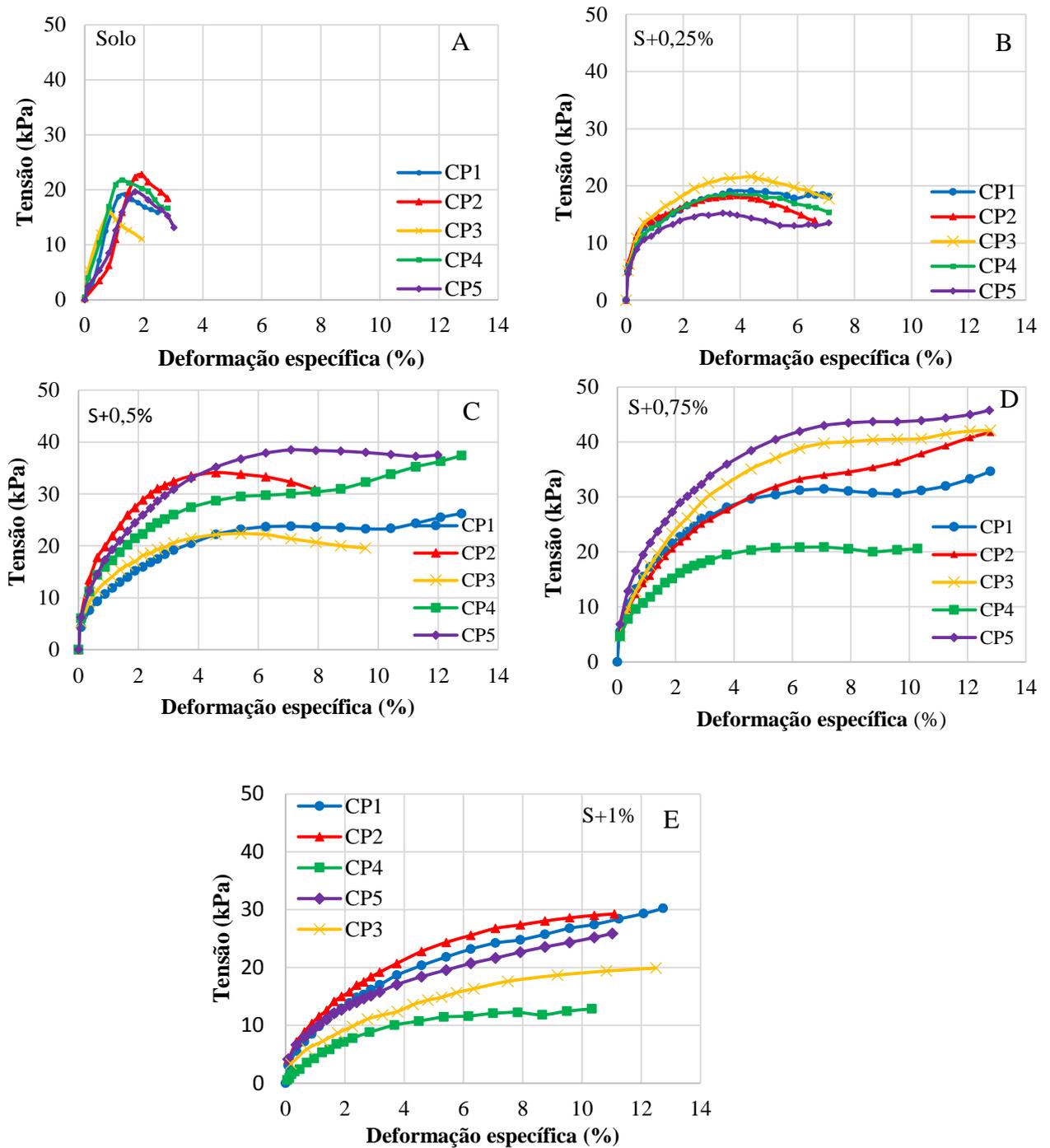
Tabela 17 – Resumo dos dados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

	CP	RTCD (kPa)	Média (kPa)	Coef. variação (%)	Acréscimo resistência (%)	Módulo de rigidez (MPa)	Média (MPa)	Coef. variação (%)	Deformação de ruptura (%)	MR/RTCD
<b>Solo</b>	1	19				0,86			1,3	45,3
	2	23				1,3			1,7	56,5
	3	16	19,4	13,3	-	1,3	1,1	16,3	0,7	81,3
	4	21				1,1			1,3	52,4
	5	19				1,1			1,7	57,9
<b>S+0,25%</b>	1	18				2,5			3	138,9
	2	18,2				2,5			3	137,4
	3	22	18,3	13,6	-5,6	2,9	2,4	11,9	4	131,8
	4	18,5				2,4			4	129,7
	5	15				2,0			3	133,3
<b>S+0,5%</b>	1	24				2,24			7	93,9
	2	34				2,3			5	67,6
	3	23	29,8	21,5	53,6	2,2	2,6	26,9	5	95,6
	4	30				2,3			7	76,7
	5	38				3,8			4	100
<b>S+0,75%</b>	1	32				3,4			7	106,3
	2	35				2,9			9	82,8
	3	40	34,6	26,2	78,4	3,1	2,9	24,9	9	77,5
	4	21				1,66			6	79
	5	45				3,41			9	75,8
<b>S+1%</b>	1	30				0,65			9	21,7
	2	28				1			10	35,7
	3	22	23,6	28,2	21,6	0,9	0,9	18,5	10	40,9
	4	13				1			8	76,9
	5	25				1,1			10	24,4

\*Resistência à tração por compressão diametral – RTCD; Módulo de rigidez – MR.

As curvas de tensão diametral versus deformação específica axial do solo e das misturas são mostradas na Figura 39. O solo apresentou baixa resistência à tração, o que é uma característica dos solos, apresentando pico de resistência, geralmente entre 1 e 1,5% de deformação, em que o solo rompeu por completo em sua seção longitudinal.

Figura 39 – Tensão diametral versus deformação específica do solo e misturas.



Com relação à mistura S+0,25% e (Figuras 39b) houve comportamentos de pico para as curvas apresentadas, e resultados de resistência próximos ao do solo, em média, menores que o solo, o que indica que essa baixa quantidade de fibra adicionada reduz ou pouco incrementa a resistência do material à tração por compressão diametral. As curvas da mistura S+0,5% (Figura 39c), algumas apresentaram pico de resistência, e outras com comportamento de um material mais dúctil. Para as próximas amostras S+0,75% e S+1%

(Figuras 39d e 39e), não foi observado pico de resistência, apresentando aumento de resistência ao longo da deformação específica, mostrando um comportamento plástico do compósito.

A Figura 40 mostra as curvas correspondentes aos valores médios de cada teor. A resistência à tração por compressão diametral do solo é muito baixa, e a inserção de fibras gerou um melhoramento, principalmente com o teor de 0,75%, que promoveu melhor interligação com as partículas do solo. Para o teor de 1%, houve um pequeno decréscimo da resistência comparado ao teor de 0,75% (Figura 41).

Figura 40 – Curvas tensão média versus deformação específica do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

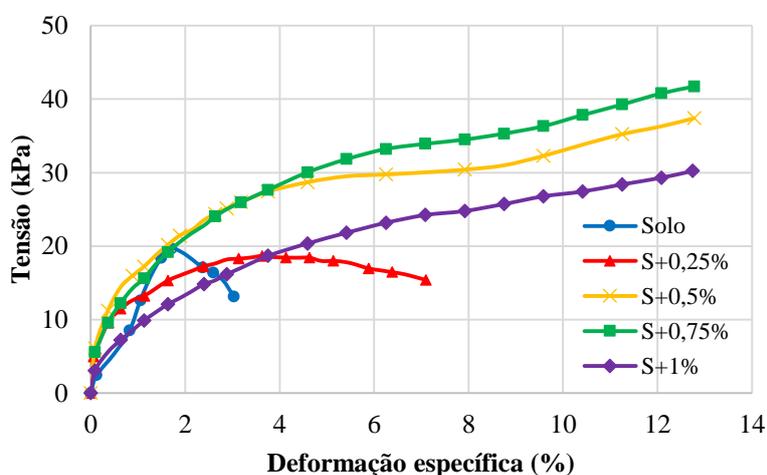
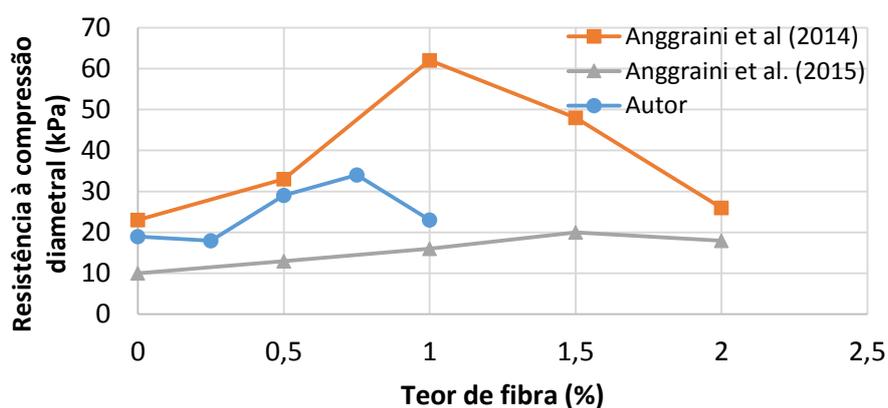


Figura 41 - Variação dos resultados da resistência à tração por compressão diametral.

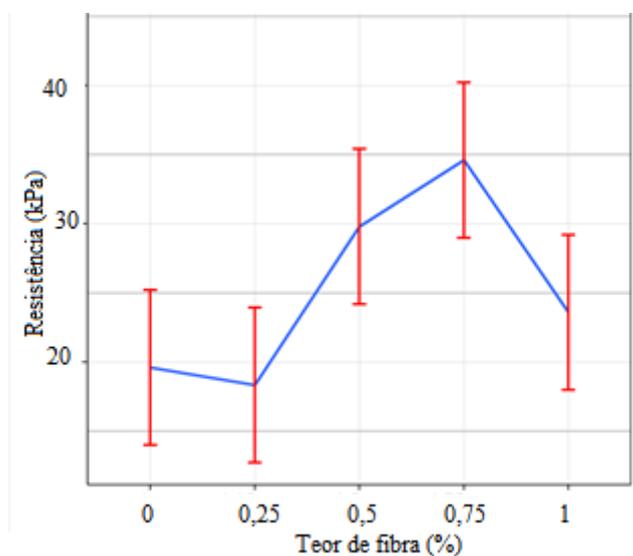


Os resultados dessa pesquisa corroboram com os obtidos Anggraini et. al (2014) e Anggraini et al. (2015), no sentido de haver um teor ótimo que proporciona melhores resultados de resistência à tração por compressão diametral, e a partir desse teor ótimo,

uma diminuição do valor da resistência, tornando-se quase o mesmo valor para o solo sem reforço.

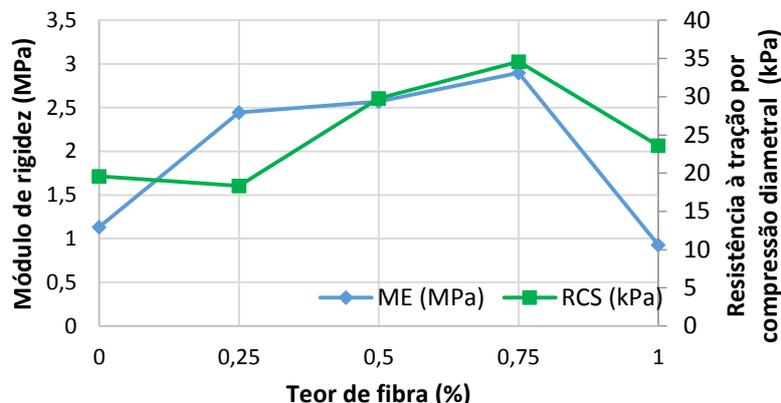
A Figura 42 mostra os intervalos de confiança de 95% dos valores de resistência à tração por compressão diametral. Melhores resultados foram obtidos pela mistura S+0,75%. Os valores do coeficiente de variância foram maiores para os maiores teores, correspondendo a uma dispersão média, mostrando que a inserção de fibras torna o material mais heterogêneo que o solo sem reforço.

Figura 42 – Intervalos de confiança a 95% das resistências à tração por compressão diametral.



Também foi comparado o comportamento da resistência à tração por compressão diametral, com relação ao módulo de rigidez, sendo observado um aumento do módulo de rigidez para as misturas, mostrando uma característica de material mais resistente que o solo, e atingindo valor menor que o solo para 1% de fibras (Figura 43).

Figura 43 – Comportamento da resistência à tração por compressão diametral e do módulo de rigidez com a inserção de fibras.



Com relação ao modo de ruptura dos corpos de prova do solo após o ensaio (Figura 44a), percebe-se um plano definido de ruptura vertical, na região de aplicação das tenções, característico de um material rígido. Os corpos de prova da amostra S+0,75% (Figura 43b) não apresentaram plano de ruptura definido, pois a pressão tendeu a se dissipar para outras regiões do corpo de prova que não a região diametral de aplicação de carga. Em função das fibras, há formação de fissuras radiais, porém o corpo de prova não se rompeu.

Figura 44 - Modo de ruptura do solo (A) e S+0,75% (B) quando submetidos à compressão diametral.



#### 4.2.2 Resistência à compressão simples versus resistência à tração por compressão diametral

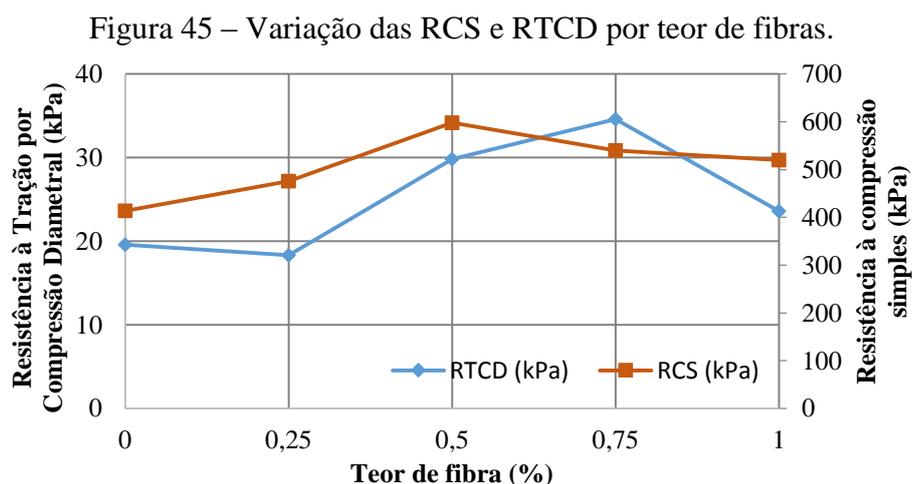
Comparando o comportamento dos valores médios de RCS e RTCD (Tabela 18), foi verificada aumento de resistência, de forma geral. A RCS foi mais atingiu maiores valores com 0,5% de fibra, e diminuiu ligeiramente a partir deste teor, enquanto que para a RTCD, não houve grande diferença entre o solo e o primeiro teor (S+0,25%), em termos numéricos, ainda que não houve rompimento do corpo de prova ao meio. Houve tendência

de aumento de resistência até 0,75% de fibra, decaindo ligeiramente para o teor de 1%. Os valores da RTCD foram em torno de 5% dos valores da RCS.

Tabela 18 – Comparação entre os valores das resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral.

Mistura	Resistência média (kPa)		Aumento da resistência (%)		RTCD/RCS (%)
	RCS	RTCD	RCS	RTCD	
Solo	413,8	19,4	-	-	4,8
S+0,25%	475,7	18,3	14,9	-5,6	3,9
S+0,5%	597,5	29,8	44,4	53,6	4,9
S+0,75%	539,8	34,6	31,1	78,4	6,4
S+1%	519,8	23,6	23,4	21,6	4,5

A Figura 45 apresenta graficamente os valores médios das RCS e RTCD, das amostras desenvolvidas e a comparação com os respectivos resultados.



#### 4.2.3 Ensaio de resistência ao cisalhamento direto

As curvas de resistência ao cisalhamento versus deslocamento horizontal, assim como as curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal dos materiais estudados estão apresentadas nas Figuras 46 a 50.

Analisando-se o solo (Figura 46), houve um comportamento de pico quando ocorrida a tensão normal de 50 kPa, com um pequeno aumento da tensão cisalhante até a faixa entre 2 mm e 3 mm de deslocamento horizontal e após este percurso um decréscimo. Para as tensões normais de 100, 150 e 200 kPa, não foi registrado um pico de resistência, havendo

um aumento constante para maiores tensões. Os gráficos de deslocamento horizontal versus deslocamento vertical apresentam comportamento típico para todos os casos analisados, após uma fase de dilatação inicial até cerca de 2 mm, depois segue-se uma compressão que ocorre com o aumento das resistências.

Figura 46 - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (A), e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (B) do Solo.

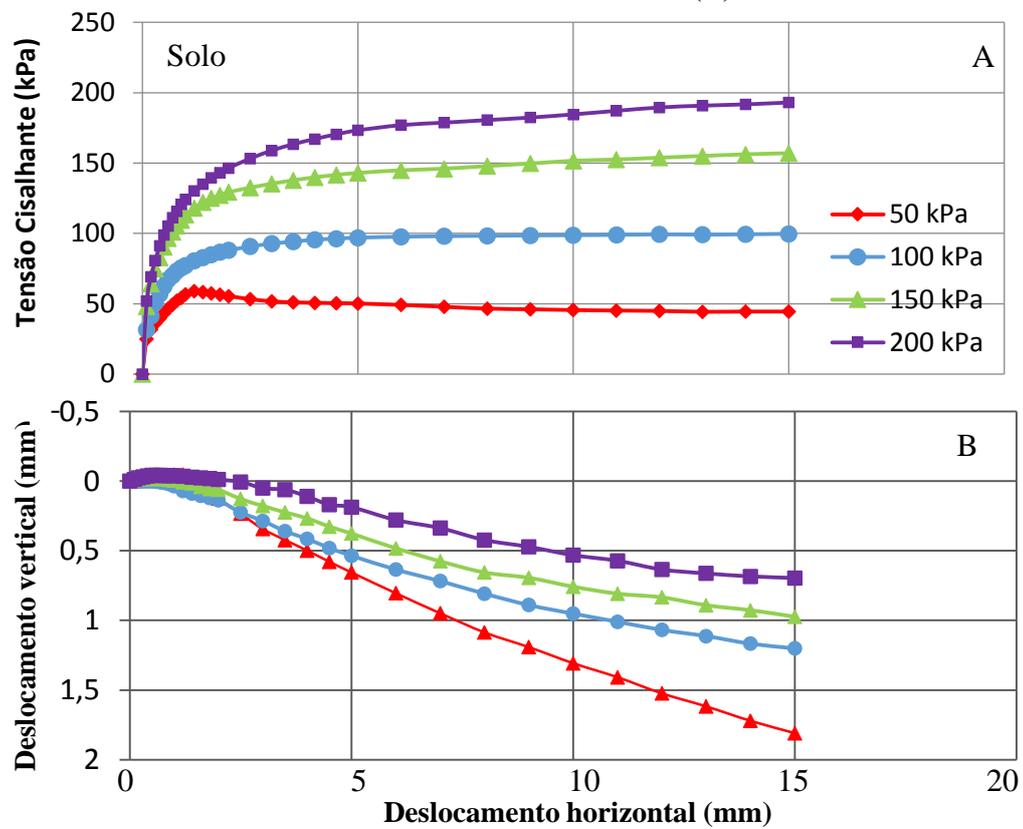


Figura 47- Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (A) e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (B) da amostra S+0,25%.

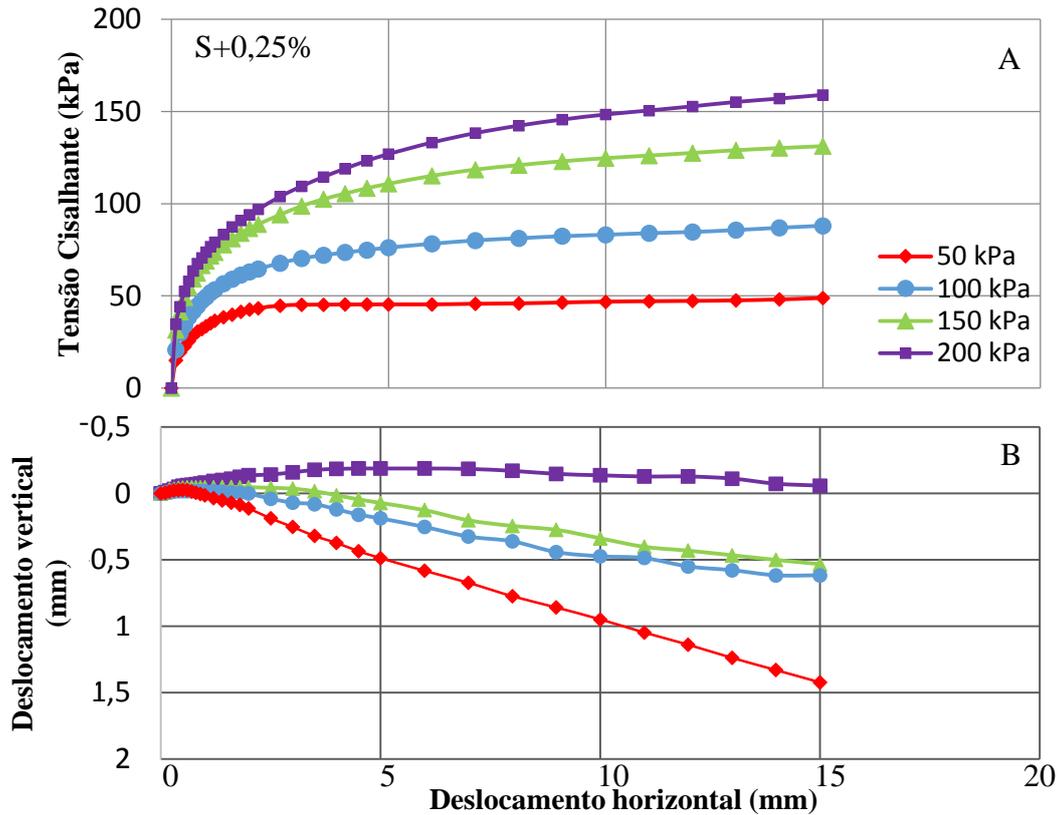


Figura 48 - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (A) e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (B) da amostra S+0,5%.

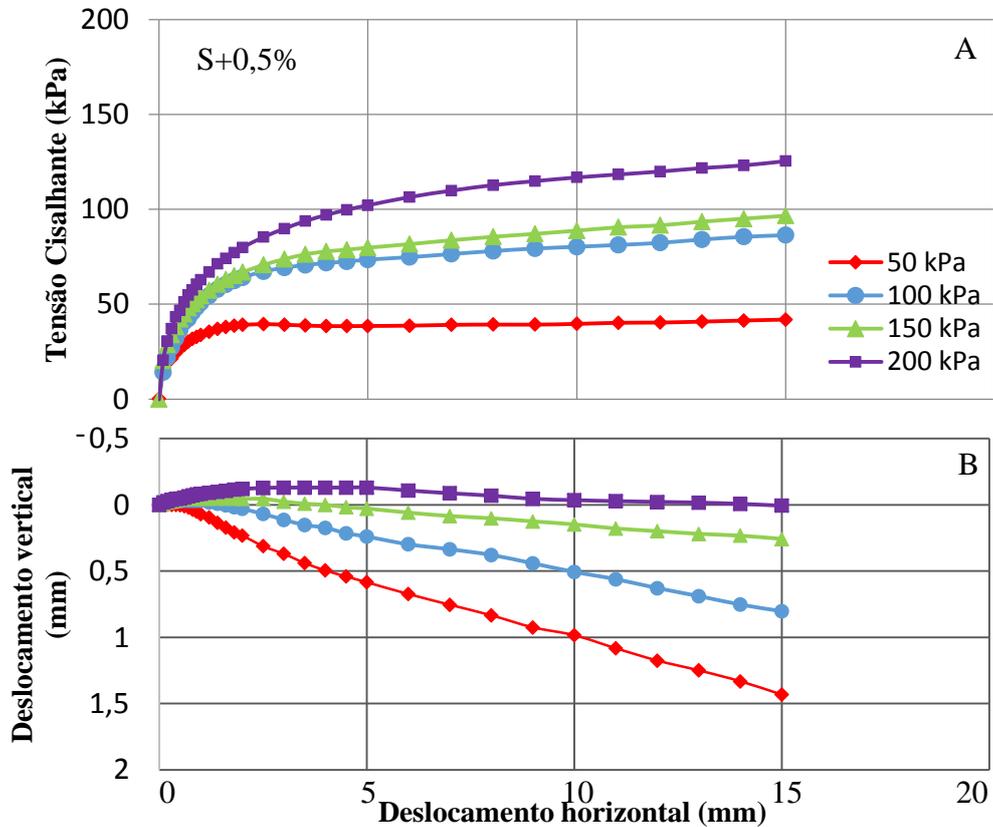


Figura 49 - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (A) e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (B) da amostra S+0,75%.

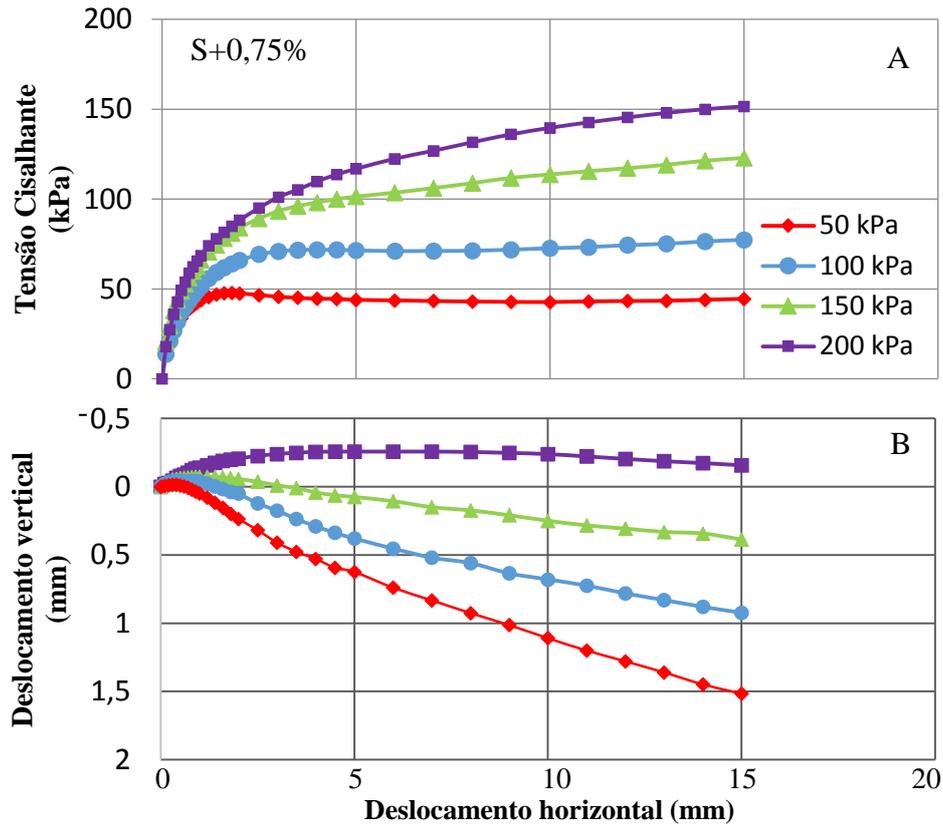
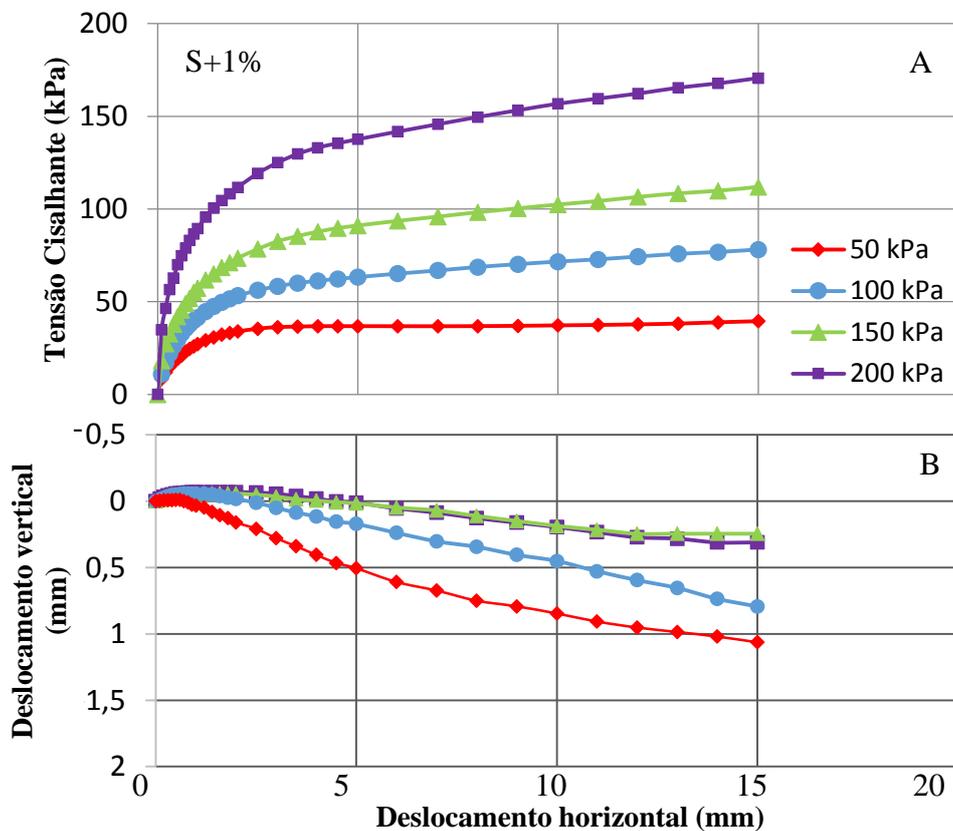


Figura 50 - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (A) e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (B) da amostra S+1%.



Com relação às misturas (Figuras 47 a 50), todas as amostras apresentaram comportamento tensão cisalhante versus deslocamento horizontal sem observação de pico de resistência, com crescimento constante da tensão a partir de aproximadamente 5 mm de deslocamento horizontal (exceção quando aplicada tensão normal de 50 kPa). O efeito da adição da fibra de coco se torna mais evidente com maiores tensões normais aplicadas (100, 150 e 200 kPa). Observou-se que as misturas apresentaram dilatação apenas para a tensão normal de 200 kPa (exceção para a amostra S+1%), ocorrendo em maior parte a compressão conforme o aumento da resistência.

A Figura 51 apresenta os gráficos tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para cada tensão, sendo observado que as misturas não atingiram maiores resistências que o solo sem reforço. A diminuição da resistência ao cisalhamento observada pode ser ocasionada pela redução da área de contato entre as partículas do solo e as fibras, cujo entrosamento não foi ideal para o aumento da resistência dos compósitos. As fibras são dispostas aleatoriamente, e não dispostas perpendicularmente ao eixo de corte da caixa de cisalhamento. Porém, observa-se com os ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral realizados que o solo reforçado com fibras é capaz de manter maiores resistências e maiores deformações de ruptura.

Figura 51 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para as diferentes tensões.

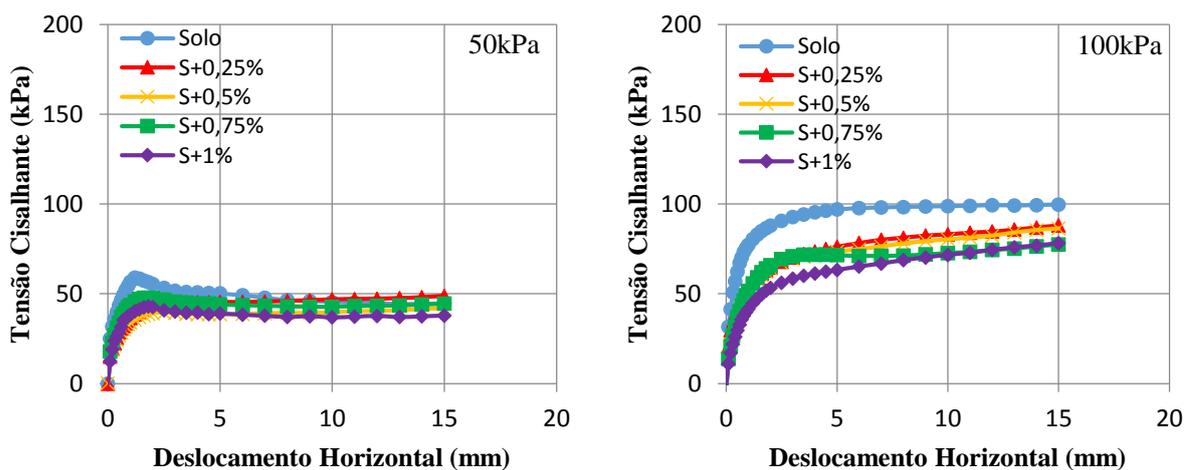
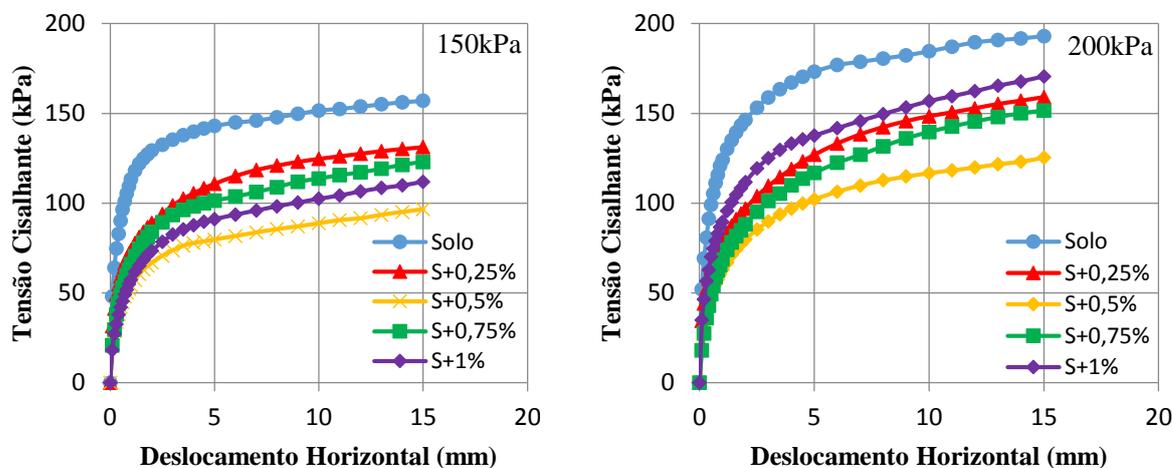


Figura 51 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para as diferentes tensões (continuação).



Para a tensão normal de 50 kPa, o solo e compósitos apresentam comportamento de material plástico, mais especificamente o solo apresenta leve comportamento de pico. Para a tensão normal de 100 kPa, o solo apresentou comportamento plástico e os compósitos, plástico com endurecimento; para 150 e 200 kPa, o solo e compósitos apresentam comportamento de material plástico com endurecimento.

A Figura 52 apresenta as envoltórias de Mohr-Coulomb para tensões cisalhantes máximas e obtidas com 5 mm e 10 mm de deslocamento horizontal. Os parâmetros de resistência estão apresentados na Tabela 19, assim como os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados em amostras de solo indeformado, com peso específico médio de 20 kN/m<sup>3</sup> e umidade ótima variando de 20% a 25%, da mesma área de estudo, a encosta Alto do Reservatório (LAFAYETTE, 2000; LIMA, 2002; MACEDO, 2016).

Figura 52 - Envoltórias de resistência Mohr-Coulomb: A) para tensões cisalhantes máximas; B) deslocamento horizontal de 5 mm; e C) deslocamento horizontal de 10 mm.

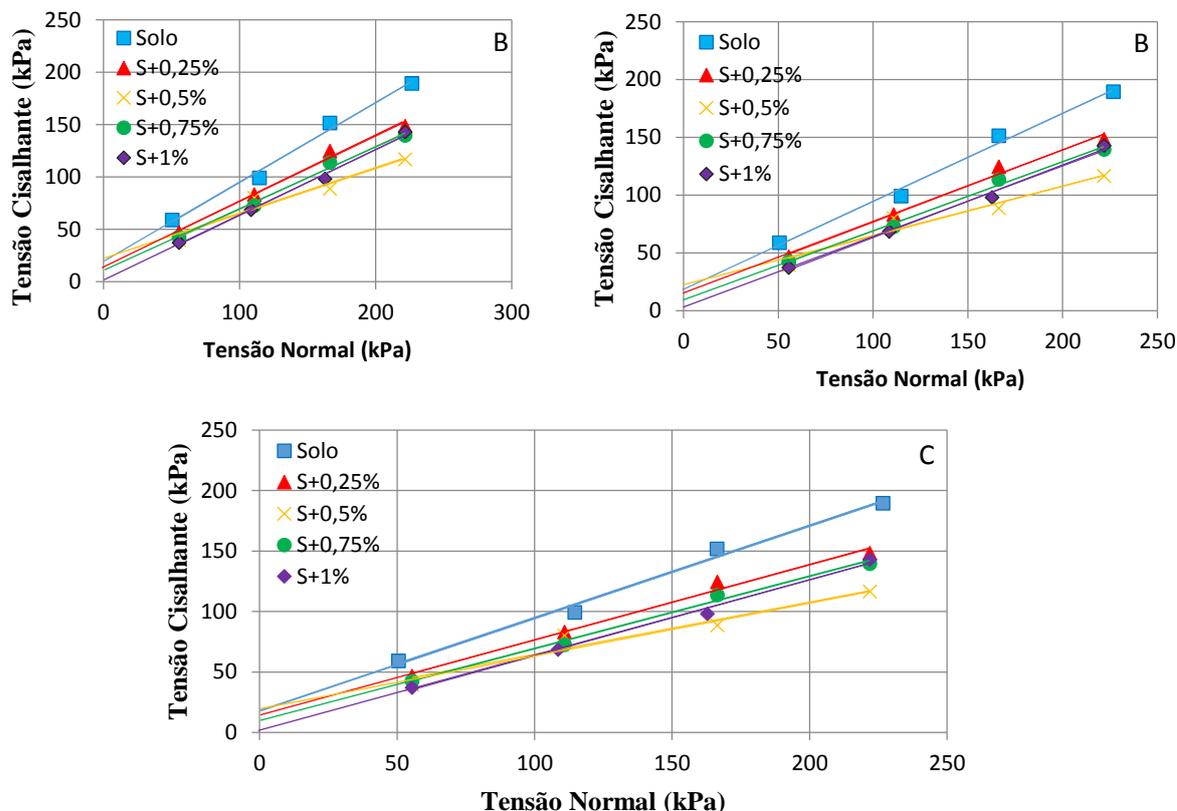


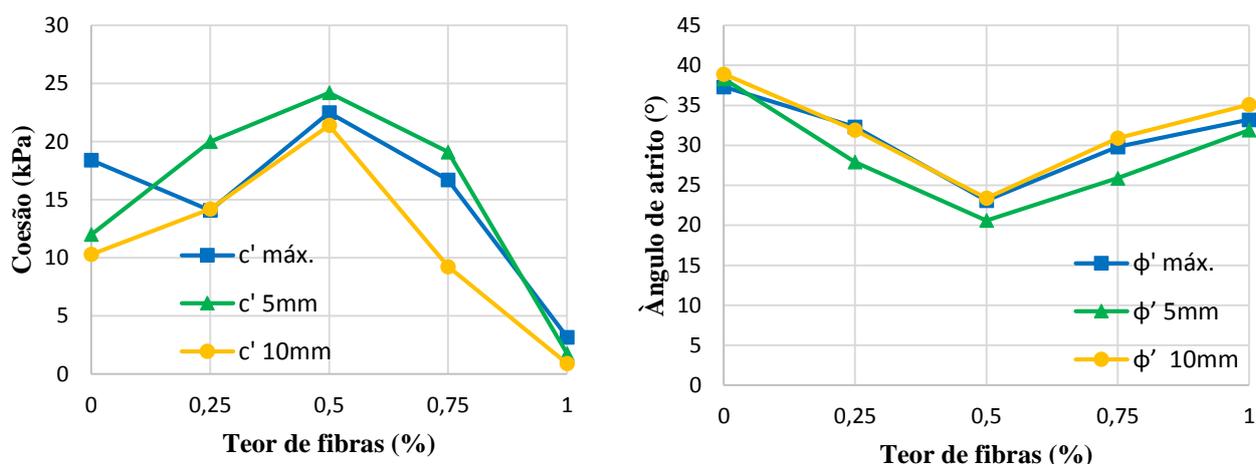
Tabela 19 - Valores de coesão e ângulo de atrito para a resistência máxima e a diferentes níveis de deslocamento do solo e das misturas.

	Máximo (critério de Campos e Carrillo)		Para deslocamento de 5 mm		Para deslocamento de 10 mm	
	c' (kPa)	$\varphi'$ (°)	c' (kPa)	$\varphi'$ (°)	c' (kPa)	$\varphi'$ (°)
Solo indeformado (LAFAYETTE, 2000)	25	28	38,1	16	25,8	29
Solo indeformado (SÁ, 2006)	12	33	-	-	-	-
Solo indeformado (LIMA, 2002)	28	31	6,9	29	13,9	29
Solo compactado (MACEDO, 2016)	25	34	8,4	36	7,5	35
Solo compactado (SILVA, 2018)	10	29	11	28	8,5	29
Solo compactado	18	37	12	38	10	39
S+0,25%	14	32	20	28	14	32
S+0,5%	23	23	24	21	21	23
S+0,75%	17	30	19	26	9	31
S+1%	3	33	2	32	1	35

Os resultados do solo compactado foram muito próximos aos resultados de Macedo (2016) e Silva (2018), e maiores que o das misturas. As misturas S+0,25% e S+0,75% obtiveram resultados melhores que Silva (2018). O acréscimo de fibras tornou os

compósitos um material plástico com endurecimento, indicando ganho de resistência com o processo de deformação. No solo compactado, à medida que os deslocamentos horizontais crescem, há redução da parcela da coesão de 18 kPa para 10 kPa e um ligeiro aumento do ângulo de atrito, de 37° para 39°. Essa variação para o solo e para as misturas está representada na Figura 53.

Figura 53 – Síntese dos valores de coesão e ângulo de atrito para diferentes teores e níveis de deslocamento de 5 mm e 10 mm, e resistência máxima).



O valor do ângulo de atrito, tanto para o deslocamento de 5 mm quanto para o de 10 mm, decresceu à medida que aumenta o teor de fibras até 0,5%, a partir do qual há um aumento para os teores de 0,75 e 1%. Comportamento praticamente inverso ocorreu com a coesão, cujos valores aumentam até 0,5% de fibras, e diminuem a partir desse teor.

A Figura 54 mostra graficamente o comportamento desses dois parâmetros em alguns estudos que realizaram ensaio de resistência ao cisalhamento direto. A maioria dos estudos pesquisados obtiveram aumento mais acentuado da coesão com o aumento do teor de fibras, e um aumento discreto do ângulo de atrito.

Em Norsyahariati et al. (2016) houve resultado diferente, em que a inserção de 1% de fibra diminuiu ligeiramente a coesão do compósito, em relação ao solo sem fibras, enquanto que o ângulo de atrito teve um aumento mais acentuado. A Tabela 20 mostra com mais detalhes os materiais e resultados obtidos pelos estudos mostrados na Figura 53.

Figura 54 – Comportamento da coesão e ângulo do atrito com a adição de fibras em diferentes estudos.

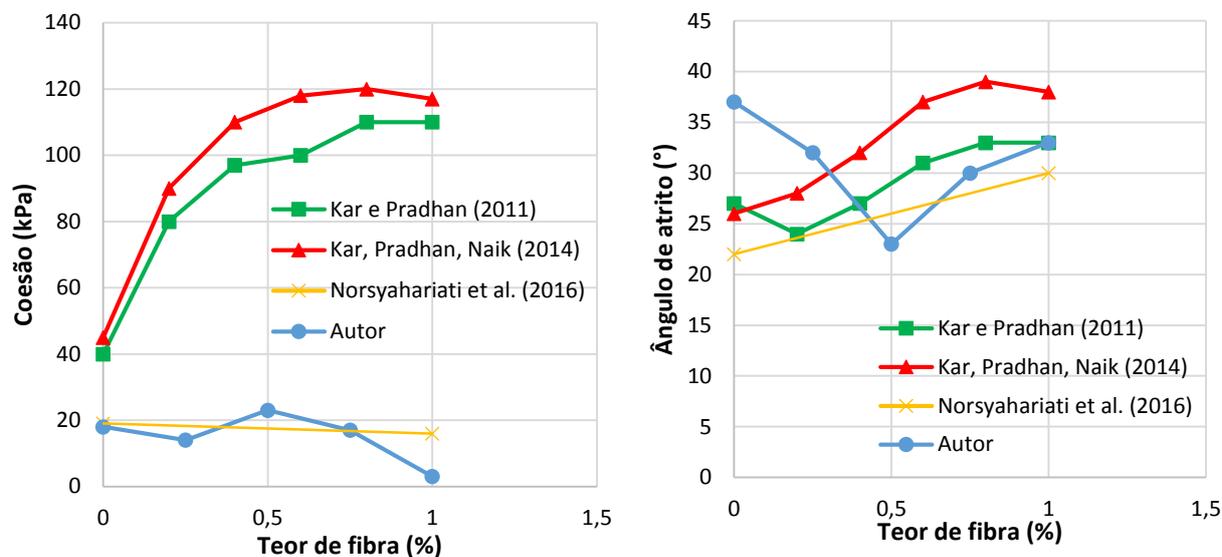


Tabela 20 – Valores detalhados das pesquisas que realizaram ensaio de cisalhamento direto para solos reforçados com fibras do coco.

Referência	Solo	Fibras (mm)	Teor (%)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)
Kar e Pradhan (2011)	Argila de baixa compressibilidade	15	0	40	27
			0,2	80	24
			0,4	97	27
			0,6	100	31
			0,8	110	33
			1	110	33
Kar, Pradhan e Naik (2014)	Areno-argilo	20	0	45	26
			0,2	90	28
			0,4	110	32
			0,6	118	37
			0,8	120	39
			1	117	38
Norsyahariati et al. (2016)	Argila	-	0	19,33	22,1
			1	15,66	30,0
Autor	Areno-argiloso	20	0	18	37
			0,25	14	32
			0,5	23	23
			0,75	17	30
			1	3	33

#### 4.2.4 Resumo da influência da adição das fibras da casca do coco verde nas características físicas e mecânicas do solo

No Quadro 5 apresenta as principais observações em relação às características físicas e mecânicas das misturas de solo com a adição de fibras da casca do coco verde.

Quadro 5 – Resumo das principais características físicas e mecânicas dos materiais.

Características		Observações
Física	Granulometria	Não houve diferenças da granulometria do solo para a das misturas.
	Plasticidade	A inclusão das fibras diminui a plasticidade. As misturas solo-fibras obtiveram uma plasticidade média, enquanto o solo teve uma alta plasticidade.
	Densidade real	Não foram observadas alterações.
	Compactação	Tendências não muito significativas de aumento da umidade ótima e de diminuição do peso aparente seco máximo.
Mecânica	Resistência à compressão simples	Aumento da resistência com incremento das fibras. Porém, esse aumento acontece até determinado teor (0,5%).
	Resistência à tração por compressão diametral	Aumento da resistência das misturas, se comparado com o solo sem fibras. Porém, esse aumento acontece até determinado teor (0,75%).
	Módulo de elasticidade	Diminuição do módulo de elasticidade, por causa da presença das fibras, que se trata de um material menos rígido e mais leve que o solo.
	Deformação na ruptura	Aumento da deformação de ruptura das misturas em comparação com o solo, deixando claro o comportamento dúctil do material, que suporta maiores esforços a maiores deformações.
	Coesão	Em geral, diminuiu, havendo ligeiro aumento até o teor de 0,5%, e acima desse teor houve decréscimo.
	Ângulo de atrito	Não houve maiores valores das misturas, se comparado ao solo.

## 5. CONCLUSÕES

### 5.1 Principais conclusões

A partir dos resultados e das análises obtidas, foi possível chegar as principais conclusões acerca dos materiais e misturas avaliadas nesta pesquisa.

O solo é uma areia argilosa, enquanto as misturas solo-fibras do coco verde foram consideradas uma areia siltosa, segundo o SUCS; e ambos uma argila de pouco uso como subleito (A-7-5 e A-7-6), segundo o TRB. A densidade real do solo e dos compósitos não foi alterada, devido ao peso da fibra ser muito menor que o do solo, e os acréscimos de fibra serem relativamente pequenos. Mostrou-se que a inserção da fibra não altera consideravelmente as propriedades físicas do solo. A umidade ótima aumenta e o peso específico aparente seco máximo diminui com o acréscimo de fibras.

Apesar do baixo percentual, a adição de fibras proporcionou um acréscimo de resistência ao solo. Houve teores mais indicados para cada ensaio, no caso da compressão simples, 0,5% de fibra foi o teor ideal com maior ganho de resistência (44%), e 0,75% para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (78% de acréscimo de resistência). A inserção das fibras gerou um material mais propenso a resistir a esforços, e proporcionou mais ductibilidade, que é um comportamento desejável, como em estabilização de encostas e taludes, aterros não estruturais, obras de solo reforçado sobre solos moles, e obras temporárias.

Com relação ao ensaio de cisalhamento direto, o solo e as misturas assumiram um comportamento plástico com endurecimento, conforme o aumento das tensões aplicadas. Porém, não houve maiores ganhos de resistência com a inclusão de fibras em relação ao solo. Este, sem a adição do reforço, resultou ser um material mais resistente que os compósitos quando imposto a uma tensão cisalhante.

A adição de fibras teve como principal vantagem o aumento de ductibilidade, em relação ao solo sem reforço. Portanto, vários fatores justificam o desenvolvimento de pesquisas quanto à aplicação das fibras do coco verde em conjunto com outros materiais de engenharia civil, pois as propriedades físicas do solo se mantêm semelhantes, porém há um ganho de resistência com a utilização desse novo material geotécnico, que deixa de

ser um passivo ambiental, tendo uma nova possibilidade de utilização. Espera-se que esse trabalho sirva como fomento de incentivo para pesquisas futuras, dando credibilidade à aplicação das fibras vegetais, mais particularmente às fibras do coco, nas aplicações da engenharia civil.

Além de viabilizar soluções alternativas para materiais de construção, o aproveitamento da fibra da casca do coco também pode trazer benefícios econômicos e ambientais, introduzindo novas alternativas no mercado de construção, trazendo maior incentivo ao reaproveitamento do resíduo na cadeia comercial e agroindustrial do coco.

### **5.2 Sugestões para pesquisas futuras:**

A seguir são listadas algumas sugestões para pesquisas futuras:

- Realizar os mesmos ensaios com os mesmos teores de fibras, porém reduzindo a quantidade de solo e substituindo por resíduos da construção e demolição de granulometria semelhante;
- Realizar os mesmos ensaios com os mesmos teores de fibras, porém de outros comprimentos;
- Realizar os mesmos ensaios com os mesmos teores de fibras, porém estas impermeabilizadas previamente;
- Realizar ensaios com outros tipos de solo, a fim de se investigar a interação da fibra de coco com diferentes matrizes;
- Realizar o ensaio de cisalhamento direto saturado com o solo e misturas;
- Estudar o efeito de fibras de coco para solos expansivos.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, D. G.; JEFFERSON, I.; BRAITHWAITE, P. A.; CHAPMAN, D. N. **Why is Sustainability Important in Geotechnical Engineering?** GeoCongress, Geotechnical Special Publication, Columbia. 2008.
- AGGARWAL, L. **Studies on cement bonded coir fibre boards.** Cement Conc. Comp., 14(1): 63-69. 1992.
- AGOPYAN, V.; SAVASTANO JR., H.; JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. **Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil:** An overview. Cement and Concrete Composites, 27(5), 527-536. 2005.
- AGUILAR, J. R. T. **Análise do comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras de coco.** 2015. 114 p. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2015.
- ALI, M. **Coconut Fibre – A Versatile Material and its Applications in Engineering.** In: International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2. Ancona, Itália. 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-3080.** Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. 1998.
- ANDRADE, A. M.; PASSOS, P. R. A.; MARQUES, L. G. C.; OLIVEIRA, L. B.; VIDAURRE, G. B.; ROCA, J. D. S. Pirólise de resíduos do coco-da-baía (*Cocos nucifera Linn*) e análise do carvão vegetal. **Revista Árvore** [online], vol.28, n.5, pp.707-714. 2004. ISSN 1806-9088.
- ANGGRAINI, V.; ASADI, A.; HUAT, B. B. K.; NAHAZANAN, H. Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil. **Elsevier**, v. 59, p. 372-381, 2014.
- ANGGRAINI, V.; HUAT, B. B. K.; ASADI, A.; NAHAZANAN, H. Effect of Coir Fibers on the Tensile and Flexural Strength of Soft Marine Clay, **Journal of Natural Fibers**, 12:2, 185-200, 2015.
- ASASUTJARIT, C.; HIRUNLABH, J.; KHEDARI, J.; CHAROENVAI, S.; ZEGHMATI, B.; SHIN, U. C. **Development of coconut coir-based lightweight cement board.** Construction and Building Materials, 21(2), p. 277-288. 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 6457.** Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro. 1986.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6459.** Solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro. 2016.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6508.** Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica. Rio de Janeiro. 1984.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7180.** Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 7181**. Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro. 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182**. Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro. 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**. Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 12770**. Solo – Resistência à compressão simples. 1992.

AYININUOLA, G. M.; OLADOTUN, P. O. Geotechnical Properties of Coconut Coir Fiber Soil Mixture. **Journal of Civil Engineering Research**. 6(4): 79-85. 2016.

BABU, G. L. S.; VASUDEVAN, A. K. Evaluation of strength and stiffness response of coir-fibre-reinforced soil. **Ground Improvement**, v. 11, n. 3, p. 111–116, 2007.

BABU, G. L. S.; VASUDEVAN, A. K.; SAYIDA, M. K. Use of Coir Fibers for Improving the Engineering Properties of Expansive Soils, **Journal of Natural Fibers**, 5:1, 61-75. 2008.

BANDEIRA, A. P. N. **Parâmetros técnicos para gerenciamento de áreas de riscos de escorregamentos de encostas na região metropolitana do Recife**. Recife, 2010. 369 p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

BEENA, K. S.; SANTHOSH, B. **Studies on strength characteristics of soil mixed with bio-waste**. In: Proceedings of Indian Geotechnical Conference. Rorkee, Índia, 2013.

BOLAÑOS, R. E. Z. **Comportamento Mecânico de um Solo Argiloso Reforçado com Fibras de Coco**. Rio de Janeiro, 2013. 143 p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

BLEDZEKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Elsevier**. v. 24, p 221–274, 1999.

BUTT, W. A.; MIR, B. A.; JHA, J. N. Strength Behavior of Clayey Soil Reinforced with Human Hair as a Natural Fibre. **Revista Geotechnical and Geological Engineering**, v. 33, n. 6. Novembro, 2015.

CABALA, G. V. E. **Estudo do comportamento mecânico de estruturas de solo-cimento reforçado com fibras de coco e hastes de bambu**. Natal, 2007, 113 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em engenharia mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2007.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**: v. 2, 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. 1987.

CARVALHO, R.; FANGUEIRO, R.; NEVES, J. Durability of Natural Fibers for Geotechnical Engineering. **Key Engineering Materials**, v. 634, p. 447-454, 12, 2015.

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

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

CASTRO, A. L. de.; TIBA, P. R. T.; PANDOLFELLI, V. C. Fibras de polipropileno e sua influência no comportamento de concretos expostos a altas temperaturas: revisão. **Cerâmica** [online], v.57, n.341, pp.22-31. 2011.

CHAPLE, P. M.; DHATRAK, A I. Performance of Coir Fiber Reinforced Clayey Soil. **The International Journal of Engineering and Science** (IJES). v.2, n.4, p. 54-64. 2013.

CHEGENIZADEH, A.; NIKRAZ, H. Effective Parameters on Strength of Reinforced Clayey Sand. **International Journal of Material Science** (IJMS), V.2 pp.1-5, 2012.

CONSOLI, N. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; COOP, M. R. Performance of a fibre reinforced sand at large shear strains. **Geotecnique**, v. 57, n. 00, p 1-6, 2007.

CORRADINI, E.; MORAIS, L. C.; ROSA, M. F.; MAZZETTO, S. E.; MATTOSO, L. H. C.; AGNELLI, J. A. M. **A preliminary study for the use of natural fibers as reinforcement in starch-gluten-glycerol matrix**. Macromolecular Symposia, 245-246, 558-564. 2006.

CORRADINI, E.; ROSA, M. F.; MACEDO, B. P.; PALADINI, P. D.; MATTOSO, L. H. C. Composição química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de coco verde. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, São Paulo, v. 31, n. 3, p.837-846, Setembro, 2009.

CORTE, M. B. **Misturas solo-cal-fibra: comportamento mecânico à compressão e tração**. 2013. P.70. Trabalho de conclusão de curso. UFRGS. Porto Alegre, 2013.

COUTINHO JR, J. C. M. **Contribuição para a destinação final dos resíduos de coco: geração de energia à base da casca**. Dissertação (Mestrado). 2007. Instituto Tecnológico de Pernambuco – ITEP. Recife, 2007.

CUSTÓDIO, D G. **Comportamento Mecânico do Solo Mole do Baixo Mondego Quimicamente Estabilizado Com Adição de Fibras de Polipropileno**. 2013. Dissertação (Mestrado). Universidade de Coimbra, Coimbra, Outubro, 2013.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. **Dissertação**. Portugal, 2001. Dissertação (Mestrado). 2001. Universidade do Minho, Portugal, 2001.

DE CAMPOS, T. M. P.; CARRILLO, C. W. **Direct shear testing on an unsaturated soil from Rio de Janeiro**. In: Proceeding of the First International Conference on Unsaturated Soils. Paris, França, 6-8. Vol. 1. September, 1995.

DIAMBRA A.; IBRAIM E, MUIR WOOD D, RUSSELL A. R. Fibre reinforced sands: Experiments and modelling. **Geotextiles and geomembranes**. V. 28, p. 238 – 250, 2010.

DIEMER, F. **Caracterização da resistência de um solo tropical a partir do ensaio de penetração dinâmica com energia variável (PANDA)**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiânia, 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Produção e Comercialização de Coco no Brasil Frente ao Comércio Internacional: Panorama 2014**. Sergipe. 2014.

ENZINE ARTICLES. **The History of Soil Stabilization**. Março, 2010. Disponível em: <[Enzinearticles.com/3917867](http://Enzinearticles.com/3917867)>. Acesso em: 06 out. 2016.

ESTABRAGH, A. R.; BORDBAR, A. T.; JAVADI, A. A. **A Study on the Mechanical Behavior of a Fiber-Clay Composite with Natural Fiber**. Geotech Geol Eng. Springer. 2012.

FÁBIO, A. C. **Fibra de coco da Bahia vira tapete contra deslizamento de terra**. 2013. Disponível em: <<https://economia.uol.com.br/agronegocio/noticias/redacao/2013/09/19/fibra-de-coco-da-bahia-vira-tapete-usado-contr-deslizamento-de-terra.htm>>. Acesso em: 19 nov. 2016.

FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H.; SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. **Progress in Polymer Science**. Maio, n. 37, p. 1552-1596, 2012.

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

FERREIRA, S. R. M.; A., LIMA. **Influência da variação da frente de umedecimento na análise da estabilidade da encosta do Alto do Reservatório no Recife**. In: COBRAE, Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 4, v. II. p. 583-589. Salvador. 2005.

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

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. 2000. 152 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

FORTALMAG. **Usina de Beneficiamento da casca do coco**. Disponível em: <[http://www.fortalmag.com.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=16&Itemid=18](http://www.fortalmag.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=16&Itemid=18)>. Acesso em: 24 mar. 2017.

FREITAS, M. C. **Avaliação de técnica de melhoria de solos colapsíveis por meio de colunas de solo laterítico compactado**. 2016. 201 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação e Área de concentração em Geotecnia. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

GHAVAMI, K.; TOLEDO FILHO, R. D.; BARBOSA, N. P. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. **Cement And Concrete Composites**, v. 21, p.39-48, 1999.

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

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

GUEDES, S. B. **Estudo do Desempenho Mecânico de Solo-Cimento Microreforçado com Fibras Sintéticas para Uso como Revestimento Primário em Estradas não Pavimentadas**. 2013. 515p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2013.

GUEDES, S. B.; COUTINHO, R. Q.; FONSECA, A. J. P. V. **Influência do Teor e do Comprimento de Fibras de Polipropileno na Resistência à Tração por Compressão Diametral de um Solo Cimento**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18, Belo Horizonte, 2016.

GUIMARÃES, J L; FROLLINI, E; SILVA, C. G.; WYPYCH, F; SATYANARAYANA, K. G. Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. **Industrial Crops and Products**, n. 30, p. 407-415, 2009.

HEZAJI, S. M.; SHEIKHZADEH, M.; ABTAHI, S. M.; ZADHOUSH, A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. **Elsevier**. v. 30, p. 100-116. Dezembro, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. **Produção agrícola municipal: lavoura permanente 2014**. Disponível em: <<http://cod.ibge.gov.br/1INR>>. Acesso em: 17 nov. 2016.

JONES, C. J. F. P. **Earth reinforcement and soil structures**. ASCE Press, Inglaterra, p. 395, 1996.

KALITA, D. M.; MILI, I.; BARUAH, H.; ISLAM, I. Comparative Study of Soil Reinforced with Natural Fiber, Synthetic Fiber and Waste Material. **International Journal of Latest trends in Engineering and Technology (IJLTET)**. v. 6, p.284-29. Março, 2016.

KAR, R. K.; PRADHAN, P. K. Strength and compressibility characteristics of randomly distributed fiber-reinforced soil. **International Journal of Geotechnical Engineering, IJGE**. N 5, p. 235-243. 2011.

KAR, R. K.; PRADHAN, P. K; NAIK, A. Effect of Randomly Distributed Coir Fibers on Strength Characteristics of Cohesive Soil. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering, EJGE** v. 19, p. 1567-1583, 2014.

KHATRI, V. N.; DUTA, R. K.; VENKATARAMAN, G.; SHRIVASTAVA, R. Shear Strength Behaviour of Clay Reinforced with Treated Coir Fibres. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**. 60(2), p. 135-143, 2016.

KULKARNI, A. G.; SATYANARAYANA, K. G.; SUKUMARAN, K. Mechanical behaviour of coir fibres under tensile load. **Journal of materials science**, 16, p. 905-914, 1981.

LAFAYETTE, K. P. V. **Comportamento Geomecânico de Solos de uma Topossequência na Formação Barreiras em uma Encosta na Área Urbana do Recife-PE.** 2000. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2000.

LI, Z.; WANG, L.; WANG, X. Cement composites reinforced with surface modified coir fibers. **J. Comp. Mat.**, 41(12): 1445-1457. 2007.

LIMA, A. F. **Comportamento Geomecânico e Análise de Estabilidade de uma Encosta da Formação Barreiras na Área Urbana da Cidade do Recife.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, 2002.

MACEDO, T. F. **Análise do desempenho mecânico da mistura agregado reciclado-solo-fibra-cimento para pavimentação.** 2013. 162 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife. 2013.

MACEDO, M. C. de. **Investigação sobre o comportamento geomecânico de misturas de solo com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição.** 2016. 117p. Dissertação (Mestrado), Universidade de Pernambuco. Recife, 2016.

MAHESHWARI, K.; SOLANKI, C. H. Behaviour of fiber reinforced soil. **Australian Geomechanics**, v. 44, n. 4, Dezembro, 2009.

MALIAKAL, T.; THIYYAKKANDI, S. Influence of Randomly Distributed Coir Fibers on Shear Strength of Clay. **Geotechnical and Geological Engineering**, v.31, p.425–433. Abril, 2013.

MATHURA, N. **Sustainable coastal engineering in the caribbean: a coir fibre approach.** ICE Young Professionals and Students Paper Competition. 2012.

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.** Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, p. 37, 2014.

MCGOWN, A.; ANDRAWES, K. Z.; AL-HASANI, M. M. Effect of inclusion properties on the behavior of sand. **Géotechnique**, Londres, v.28, n.3, p.327-346, 1978.

MEIRA, F. F. D. A.; COUTINHO, R. Q.; CANTALICE, J. R. B.; ALHEIROS, M. M. **Erosão do Solo em Encostas Ocupadas.** In: Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, 2, Nova Friburgo/RJ. 2006.

MISRA, A.; BASU, D. **Sustainability in geotechnical engineering.** Internal Geotechnical Report. Connecticut, 2011.

MOHAMMED, L.; ANSARI, N. M. N.; PUA, G.; JAWAID, M.; ISLAM, M. S. A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications. **International Journal of Polymer Science**. Volume 2015, ID 243947. 2015.

MONTARDO, J. P. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. 1999. Dissertação (Mestrado). 130p. Porto Alegre, 1999.

MOREL, J. C.; GOURC, J. P. Mechanical behaviour of sand reinforced with mesh elements. **Geosynthetics International**, v.4, n. 5, p. 481-508, 1997.

MOTTA, L. A. C., AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **Caracterização de Fibras Curtas Empregadas na Construção Civil**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2007.

MOURA, S. F. A. **Estudo da Interação Solo-Pneu para Utilização em Estrutura de Contenção**. Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica. Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Recife, 2011.

MWASHA, A.; AQUI, D. **Potential for the use of coir fibres in Trinidad and Tobago for ground engineering works**. Latin american and caribbean conference for engineering and technology, 5. Tampico, México, 2007.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 1 ed. – Ed. Edgard Blucher, p. 98-100. São Paulo, 2006.

NORSYAHARIATI, N. D. N.; NISA, A. J. F. N.; SADIQ, M. A. S.; JULIANA. G. A. Influence of Agricultural Wastes on Shear Strength Properties of Soil. **Matec Web of Conferences**. V. 47. 2016.

OGATA, B. H. **Caracterização das frações celulose, Hemicelulose e lignina de diferentes genótipos de cana-de-açúcar e potencial uso em biorrefinarias**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos: tipos e evolução nos últimos anos**. Seminário sobre aplicações de geossintéticos em geotecnia. Geossintéticos... Brasília, p.1-20, 1992.

PARAMASIVAM, P.; NATHAN, G.K.; DAS GUPTA, N. C. Coconut fibre reinforced corrugated slabs. **Int. J. Cement Comp. Lightweight Conc.**, 6(1): 19-27. 1984.

PASSOS, P. R. A. **Destinação sustentável de cascas de coco (*cocos nucifera*) verde: obtenção de telhas e chapas de partículas**. 2005. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

PERNAMBUCO. **Emenda modificativa n. 01 de 2017**. Altera a redação do art. 1º, modifica o item II do art. 9º, altera o Item III e IV do art. 11, altera o Item III do art. 14. do Projeto de Lei Complementar 1739/2017, que dispõe sobre a Região Metropolitana do Recife - RMR. 2017.

PEREIRA, C. L. **Aproveitamento do resíduo do coco verde para produção de compósitos destinados à construção rural**. 2012. Tese (Doutorado), Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2012.

PIRES, J. S. C. **Fibras naturais**: Características químicas e potenciais aplicações. 2009. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Biológicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2009.

RAMAKRISHNA, G.; SUNDARARAJAN, T. Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. **Cement and Concrete Composites**, 27(5), 575-582. 2005.

RAMANATHAN, B.; RAMAN, V. **Split tensile strength of cohesive soils**, **Soils Found.** n.14, p.71-76. 1974.

RAMASUBBARAO, G. V. Strength behaviour of kerosene coated coir fiber-reinforced expansive soil. *Facta Univeritatis Series: Architecture and Civil Engineering*. V. 12, N. 2, p. 113–120. 2014.

RAO, K. M. M.; RAO, K. M. **Extraction and tensile properties of natural fibers**: Vakka, date and bamboo. *Composite Struct.*, 77(3): 288-295. 2007.

REIS, J. M. L. Fracture and flexural characterization of natural fiberreinforced polymer concrete. **Constr. Build Mater.**, 20(9): 673-678. 2006.

RESCHETTI JÚNIOR, P. R. **Avaliação do comportamento mecânico de um solo arenoso fino laterítico reforçado com fibras para uso em pavimentação**. 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SÁ, W. B. **Estudo da interação solo-muro em concreto convencional, com resíduo de construção e demolição (RCD) e alvenaria de pedra**. 2006. Dissertação (mestrado, em engenharia civil. Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2006.

SALIT, M. S. **Tropical Natural Fibre Composites**: Properties, Manufacture and Applications. Malásia: Springer, 124 p., 2014.

SANTANA, R. G. de. **Análise de soluções de engenharia para estabilização de encostas ocupadas na Região Metropolitana do Recife – PE. Estudo de caso: Ruptura ocorrida em encosta com ocupação desordenada na UR 2, Ibura**. 2006. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. 2006.

SATYANARAYANA, K. G.; SUKUMARAN, K.; MUKHERJEE, P. S.; PAVITHRAN, C.; PILLAI, S. G. K. **Natural fibre-polymer composites**. *Cement and Concrete Composites*, 12(2), p. 117-136. 1990.

SAVASTANO JR., H.; SANTOS, S. F.; AGOPYAN, V. Sustainability of vegetable fibres in construction. **Sustainability of Construction Materials**, cap 3, p. 55-81, 2009.

SANTONI, R.L.; TINGLE, J.S.; WEBSTER, S.L. Engineering Properties of sand-fiber mixtures for road construction. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Nova York, v.127, n.3, p.258-268, 2001.

SEBASTIAN, B.; CYRUS, S.; JOSE, B. T. Effect of inclusion of coir fiber on the shear strength of marine clay. **Proceedings of Indian Geotechnical Conference**. P. 379-382, 2011.

SEDEC – Secretaria de Defesa Civil do Recife. **Relatório anual** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <matheus@recife.pe.gov.br> em 29 jan. 2018.

SEMAS - Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade. **Plano estadual de resíduos sólidos de Pernambuco**. 306 f. Recife, 2012.

SENHORAS, E. M. Oportunidades da Cadeia Agroindustrial do Coco Verde: do coco verde nada se perde, tudo se desfruta. **Revista Urutágua**, Maringá, n.5, 2004.

SERA, E. E.; ROBLES-AUSTRIACO, L.; PAMA, R.P. Natural Fibers as Reinforcement. **Journal of Ferrocement**, Bangkok., v. 20, n. 2. P.109-124, 1990.

SHANKAR, A. U. R.; CHANDRASEKHAR, A; BHATH PRAKASH, H. **Experimental Investigation on Lithomargic Clay Stablized with sand and Coir**. Indian Highways: A Review of Road and Road Transport Development. V.40, N.2, p.21-31. 2012.

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

SILVA, A. C. **Comportamento hidromecânico de um solo areno-argiloso adicionado com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição**. 2018. 144p. Dissertação (Mestrado), Universidade de Pernambuco. Recife, 2018.

SILVA, F. S.; COSTA, P. A.; BAPTISTA, H. M. **Estudo do comportamento de solos reforçados com fibras de coco**. Geobase, 2017.

SINDCCO - Sindicato nacional dos produtores de coco. **Indústria do coco cresce, mas alto desperdício gera desafio tecnológico**. Disponível em <[http://www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/2014/02/140207\\_coco\\_reciclagem\\_abre\\_pai.shtm](http://www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/2014/02/140207_coco_reciclagem_abre_pai.shtm)>. São Paulo, 2014.

SINGH R. R.; MITTAL, S. Improvement of local subgrade soil for road construction by the use of coconut coir fiber. **IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology**. V. 03, N. 05, 2014.

SIVAKUMAR, B. G. L.; A. K. VASUDEVAN. Strength and stiffness response of coir fiber-reinforced tropical soil. **Journal of Materials in Civil Engineering**. N 20, 571–577.

SKEMPTON, A. W. **The Colloidal Activity of Clays**, Proceedings, III ICSMFE, Zurique, Suíça, v. 1, p 57- 61. 1953.

SOARES, R. M. **Resistência ao cisalhamento de um solo coluvionar não-saturado do Rio de Janeiro, RJ**. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2005.

SOUNDARA, B.; SENTHIL KUMAR, K. P. Effect of Fibers on Properties of Clay. **International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)**. ISSN: 2394-3661, Volume-2, Issue-5, p. 123-128, May, 2015.

SOUZA, J. L. de. **Morfodinâmica e processos superficiais das unidades de relevo da planície do Recife.** 2013. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SOUZA, A. P. L. de. **Estudos geotécnicos e de estabilidade de taludes da encosta do Alto do Padre Cícero no município de Camaragibe-pe.** 2014. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

SPECHT, L. P. **Comportamento de misturas de solo-cimento-fibra submetidos a carregamentos estáticos visando à pavimentação.** 2000. 130p. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, 2000.

STAEL, G. C. **Preparação de Materiais Compósitos de Bagaço de Cana de Açúcar e Caracterização por Propriedades Mecânicas e RMN no Estado Sólido.** Campos dos Goytacazes, 1997. 160 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, 1997.

SUBRAMANI, T.; UDAYAKAMUR, D. Experimental Study on Stabilization of Clay Soil Using Coir Fibre. **International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management, IJAIEM.** V. 5, n. 5, Maio, 2016.

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

TIWARI, A.; MAHIYAR, H. K.; Experimental Study on Stabilization of Black Cotton Soil by Fly Ash, Coconut Coir Fiber & Crushed Glass. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, IJETAE.** v. 4, n. 11, Novembro. 2014.

TOLEDO, F. R. D.; GHAVAMI, K.; ENGLAND, G. L. Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. **Cement Conc. Comp.**, 27(5): 537-546. 2005.

TOMCZAK, F. **Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil.** 2010. 150 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

ULBRICH, L. A. **Aspectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras.** Porto Alegre, 1997. 122p. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, 1997.

VALE, A. C.; SOARES, J. B.; CASAGRANDE, M. D. T. **Aplicabilidade de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas tipo SMA.** In: Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 4. Campinas, São Paulo, 2007.

VELOSO, Y. M. da S.; SOUZA, I. E. S.; SANTOS, J. V. dos.; LEITE, M. S. **Reutilização da fibra da casca do coco verde para a produção de matéria prima industrial.**, Sergipe, v. 1, n.17, p. 91-98, 2013.

VENDRUSCOLO, M. A. **Comportamento de ensaios de placa em camadas de solo melhoradas com cimento e fibras de polipropileno.** 2003. 224p. Tese (Doutorado), Porto Alegre, 2003.

ZEH, R. M.; WITT, K. J. The Tensile Strength of Compacted Clays as Affected by Suction and Soil Structure. In: Schanz T. (eds) Experimental Unsaturated Soil Mechanics. **Springer Proceedings in Physics**, v. 112. Springer, Berlin, Heidelberg. 2007.

## APÊNDICE A – ÍNDICES FÍSICOS DOS CORPOS DE PROVA DO ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES.

Solo (Wot = 15,3;  $\gamma_d = 17,55 \text{ kN/m}^3$ ; G=2,63)

CP	Wi (%)	Wf (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)	RCS (kPa)	E (MPa)	RCS (kPa)		
									Med.	Máx.	Mín.
1	15,3	14,4	17,3	0,49	82,1	99,8	383,3	13,4	413,8	435,8	383,3
2	15,3	14,4	17,4	0,50	80,5	99,8	435,8	18			
3	15,3	14,5	17,3	0,49	82,1	99,8	388,6	19,6			
4	15,3	14,2	17,3	0,50	80,5	99,6	425,3	15			
5	15,3	14,4	17,3	0,49	83,5	98,8	435,8	16			

S+0,25% (Wot = 16,5;  $\gamma_d = 17,49 \text{ kN/m}^3$ ; G=2,63)

CP	Wi (%)	Wf (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)	RCS (kPa)	E (MPa)	RCS (kPa)		
									Med.	Máx.	Mín.
1	16,3	14,7	17,2	0,53	81,0	98,3	467,3	23	475,7	535,6	325,6
2	16,3	15,2	17,3	0,52	82,4	99	551,3	15			
3	16,3	15,2	17,3	0,52	82,4	99	535,6	19			
4	16,3	15,1	17,3	0,52	82,4	98,9	498,8	20			
5	16,3	15,4	17,3	0,52	82,4	98,9	325,6	19			

S+0,5% (Wot = 16,5;  $\gamma_d = 17,42 \text{ kN/m}^3$ ; G=2,63)

CP	Wi (%)	Wf (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)	RCS (kPa)	E (MPa)	RCS (kPa)		
									Med.	Máx.	Mín.
1	17,2	16,3	17,2	0,53	86,8	98,4	530,3	16	597,5	724,6	446,3
2	17,2	16,2	17,2	0,53	86,8	98,7	446,3	17			
3	17,2	16,2	17,2	0,53	86,8	98,7	677,4	12			
4	17,2	15,9	17,2	0,53	86,8	98,8	724,6	16,1			
5	17,2	15,7	17,2	0,53	86,8	98,7	609,1	17,1			

S+0,75% (Wot = 16,3;  $\gamma_d = 17,29 \text{ kN/m}^3$ ; G=2,62)

CP	Wi (%)	Wf (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)	RCS (kPa)	E (MPa)	RCS (kPa)		
									Med.	Máx.	Mín.
1	17,1	16,9	17,1	0,54	80,7	98,6	483,1	12,5	539,8	577,6	483,1
2	17,1	16,9	17,1	0,54	80,7	98,6	519,8	12,4			
3	17,1	16,7	17,1	0,53	80,3	99,8	577,6	11,4			
4	17,1	16,4	17,1	0,51	84,7	99,1	572,3	11,4			
5	17,1	16,2	17,1	0,53	81,7	99,1	546,1	11,4			

S+1% (Wot = 16,8;  $\gamma_d = 17,35 \text{ kN/m}^3$ ; G=2,63)

CP	Wi (%)	Wf (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)	RCS (kPa)	E (MPa)	RCS (kPa)		
									Med.	Máx.	Mín.
1	17,1	17,0	17,3	0,52	86,5	99,5	603,8	5,3	510,5	557,0	414,8
2	17,1	16,8	17,3	0,52	86,5	99,9	546,1	5			
3	17,1	16,2	17,4	0,51	88,2	100	414,8	11,6			
4	17,1	16,8	17,4	0,51	88,2	100	519,8	8,1			
5	17,1	15,7	17,3	0,52	88,2	99,7	514,6	6,9			

## APÊNDICE B - ÍNDICES FÍSICOS DOS CORPOS DE PROVA DO ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.

Solo (Wot = 15,3;  $\gamma_d = 17,55 \text{ kN/m}^3$ ; G=2,63)

CP	Wi (%)	Wf (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)	RTCD (kPa)	E (MPa)	RTCD (kPa)		
									Med.	Máx.	Mín.
1	15,6	15,4	17,48	0,50	81,3	99,6	19	0,79	19,4	23	21
2	15,6	15,5	17,56	0,49	82,4	100	23	1,04			
3	15,6	15,4	17,52	0,50	81,9	99,8	16	2			
4	15,6	15,6	17,55	0,50	82,3	100	21	0,64			
5	15,6	15,8	17,52	0,50	81,9	99,8	19	0,7			

S+0,25% (Wot = 16,5;  $\gamma_d = 17,49 \text{ kN/m}^3$ ; G=2,63)

CP	Wi (%)	Wf (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)	RTCD (kPa)	E (MPa)	RTCD (kPa)		
									Med.	Máx.	Mín.
1	17,0	15,6	17,3	0,52	85,9	98,8	18	2,48	18,3	22	15
2	17,0	16,5	17,3	0,52	85,9	99	18,2	2,45			
3	17,0	16	17,3	0,52	85,9	99	22	2,85			
4	17,0	16,2	17,3	0,52	85,9	99	18,5	2,43			
5	17,0	16,6	17,3	0,52	85,9	98,8	15	2,03			

S+0,5% (Wot = 16,5;  $\gamma_d = 17,42 \text{ kN/m}^3$ ; G=2,63)

CP	Wi (%)	Wf (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)	RTCD (kPa)	E (MPa)	RTCD (kPa)		
									Med.	Máx.	Mín.
1	17,1	16,6	17,3	0,52	88,5	99,5	24	0,34	29,8	38	23
2	17,1	16,2	17,3	0,52	88,5	98,4	34	1			
3	17,1	16,1	17,4	0,51	89,9	99,6	23	0,69			
4	17,1	15,9	17,4	0,51	89,9	99,7	30	4,28			
5	17,1	16,1	17,4	0,51	89,9	99,6	38	3,97			

S+0,75% (Wot = 16,3;  $\gamma_d = 17,29 \text{ kN/m}^3$ ; G=2,62)

CP	Wi (%)	Wf (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)	RTCD (kPa)	E (MPa)	RTCD (kPa)		
									Med.	Máx.	Mín.
1	16,7	15,3	17,2	0,52	83,6	99,5	32	2,61	34,6	45	21
2	16,7	16,1	17,2	0,52	83,6	98,4	35	0,81			
3	16,7	15,9	17,2	0,52	83,6	99,4	40	3,2			
4	16,7	16,6	17,2	0,52	83,6	99,6	21	2,53			
5	16,7	15,9	17,2	0,52	83,6	99,3	45	4,65			

S+1% (Wot = 16,8;  $\gamma_d = 17,35 \text{ kN/m}^3$ ; G=2,63)

CP	Wi (%)	Wf (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)	RTCD (kPa)	E (MPa)	RTCD (kPa)		
									Med.	Máx.	Mín.
1	16,5	16,2	17,4	0,51	84,8	100,39	30	0,24	23,6	30	13
2	16,5	16,9	17,3	0,52	83,4	99,79	28	1,02			
3	16,5	16,4	17,4	0,51	84,8	100,05	22	0,25			
4	16,5	16,6	17,4	0,51	84,8	100,26	13	0,4			
5	16,5	16,3	17,4	0,52	84,8	100,41	25	0,3			

## APÊNDICE C - ÍNDICES FÍSICOS DOS CORPOS DE PROVA DO ENSAIO CISALHAMENTO DIRETO.

Solo (Wot = 15,5;  $\gamma_d$  = 17,55 kN/m<sup>3</sup>; G=2,63)

Tensão (kPa)	Wi (%)	Wf (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)
50	15,5	14,5	17,40	0,51	81,3	99,6
100	15,6	15,5	17,52	0,52	82,4	100
150	15,6	15,4	17,58	0,51	81,9	99,8
200	15,6	15,6	17,55	0,51	82,3	100

S+0,25% (Wot = 16,5;  $\gamma_d$  = 17,49 kN/m<sup>3</sup>; G=2,63)

Tensão (kPa)	Wi (%)	Wf (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)
50	16,9	16,6	17,18	0,50	81,3	99,6
100	16,9	16,2	17,56	0,51	82,4	100
150	16,7	16,2	17,18	0,51	81,9	99,8
200	16,7	16,2	17,18	0,51	82,3	100

S+0,5% (Wot = 16,5;  $\gamma_d$  = 17,42 kN/m<sup>3</sup>; G=2,63)

Tensão (kPa)	Wi (%)	Wf (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)
50	16,6	16,4	17,48	0,51	84,6	99,9
100	16,8	16,6	17,56	0,51	84,6	99,9
150	17,5	16,2	17,52	0,52	87,6	99,2
200	17,3	16,7	17,55	0,52	87,5	99,4

S+0,75% (Wot = 16,3;  $\gamma_d$  = 17,29 kN/m<sup>3</sup>; G=2,62)

Tensão (kPa)	Wi (%)	Wf (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)
50	16,3	16,0	17,33	0,52	81,9	100
100	16,3	15,6	17,38	0,51	81,5	100
150	17,0	16,8	17,37	0,51	83,0	100
200	17,0	16,8	17,33	0,55	84,9	99,5

S+1% (Wot = 16,8;  $\gamma_d$  = 17,35 kN/m<sup>3</sup>; G=2,63)

Tensão (kPa)	Wi (%)	Wf (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)
50	17,4	16,5	17,25	0,52	88,51	99,4
100	17,5	17,3	17,27	0,42	88,51	99,5
150	17,4	15,5	17,28	0,52	89,53	99,6
200	17,4	17,2	17,25	0,52	88,51	99,4