

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS CURTAS DE COCO DISTRIBUÍDAS ALEATORIAMENTE NA CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DE UM SOLO ARGILOSO COMPACTADO

\* Antônio Italcy de Oliveira Júnior<sup>1</sup>  
José Fernando Thomé Jucá<sup>1</sup>  
Alice Jadneiza Guilherme de Albuquerque Almeida<sup>1</sup>  
Riadny Patrícia de Souza Ferreira<sup>1</sup>  
Fellipe José Reis Brandão<sup>1</sup>

## INFLUENCE OF RANDOMLY DISTRIBUTED SHORT COCONUT FIBERS ADDITION ON THE WATER RETENTION CHARACTERISTIC CURVE OF A COMPACTED CLAY SOIL

Recibido el 8 de abril de 2022. Aceptado el 8 de junio de 2022

### Abstract

*The disposal and treatment of coconut fruit, called coconut, in landfills of solid urban waste is a recurring problem in places where its consumption is quite high. The biological properties of this material, added to its large volume, contribute to reduce the useful life of landfills. As a way to search for alternatives for the use of this type of waste in the unsaturated geotechnical context, this work proposes the insertion of coconut fibers to improve the geotechnical behavior of compacted clay soils. For that, soil mixtures with fiber content in the proportions of 0, 0.5, 1 and 2% in dry weight of the soil were analyzed for a matrix of compacted clay soil. The water retention curve obtained experimentally and numerically was evaluated. The results showed that mixtures with 0.5 and 1% of coconut fibers showed an increase in saturation and residual volumetric humidity in relation to the natural soil, reflecting a higher level of suction for air intake. In order to find geotechnical applications of these mixtures, there was an improvement in significant characteristics in applications where the soil is subject to variations in the wetting and drying cycles, such as in the landfill cover layers and contaminant barriers. The insertion of these fibers tends to reduce the production of leachate and the emission of gases through layers of landfill cover or contaminant barriers.*

**Keywords:** soil improvement, geotechnical behavior, unsaturated soils.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil.

\*Autor correspondente: Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Avenida da Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE, CEP: 50.740-550.

Email: [antoniotalcy@hotmail.com](mailto:antoniotalcy@hotmail.com)

## Resumo

O descarte e tratamento dos resíduos do coco em aterros de resíduos sólidos urbanos é um problema recorrente em locais onde seu consumo é bastante elevado. As propriedades de biodegradação deste material, somadas ao seu grande volume, contribuem para a redução da vida útil dos aterros sanitários. Como forma de buscar alternativas para o aproveitamento desse tipo de resíduo no contexto geotécnico não saturado, este trabalho propõe a inserção de fibras de coco para melhorar o comportamento geotécnico de solos argilosos compactados. Para tanto, foram analisadas misturas de solo com teor de fibras nas proporções de 0, 0.5, 1 e 2% em peso seco do solo em uma matriz argilosa compactada. A curva de retenção de água obtida experimentalmente e numericamente foram avaliadas. Os resultados mostraram que as misturas com 0.5 e 1% de fibras de coco apresentaram aumento na saturação e umidade volumétrica residual em relação ao solo natural, refletindo em maior nível de sucção para entrada de ar. Visando aplicações geotécnicas dessas misturas, houve uma melhora significativa nas características em aplicações onde o solo está sujeito a variações de ciclos de umedecimento e secagem, como nas camadas de cobertura de aterros e barreiras de contaminantes. A inserção dessas fibras tende a reduzir a produção de chorume e a emissão de gases através de camadas de cobertura de aterros ou barreiras de contaminantes por reter mais água do que o solo natural.

**Palavras-chave:** melhoramento de solo, comportamento geotécnico, solos não saturados.

---

## Introdução

Os solos compactados são considerados solos não saturados, tendo em vista que em sua composição encontram-se uma fase sólida relacionada as partículas do solo, uma líquida relacionada ao conteúdo de água de compactação e outra gasosa referente ao ar remanescente que não foi expulso durante o processo de compactação.

A presença da fase gasosa nos vazios do solo proporciona o surgimento de uma tensão denominada de sucção que dentre diversos aspectos está relacionada fortemente com a estrutura do solo (Prakash *et al.*, 2019). Embora muito recente, sobretudo no Brasil, o entendimento dos solos em condições não saturadas é de extrema importância para a mecânica dos solos contemporânea, tendo em vista que o nível de sucção modifica o comportamento mecânico e hidráulico dos solos em relação a condição saturada.

A curva de retenção de água ou curva característica sucção-umidade tem sido utilizada como uma ferramenta eficiente para avaliação de solos não saturados por diversos pesquisadores e na prática da engenharia geotécnica (van Genuchten, 1980; Fredlund e Xing, 1994; Prakash *et al.*, 2019; Zhai *et al.*, 2019). A mesma corresponde a relação entre a sucção do solo e a quantidade de água retida pelo material poroso, podendo este conteúdo de água retida ser expresso em termos de umidade gravimétrica, umidade volumétrica ou grau de saturação.

Os solos argilosos compactados são comumente utilizados na geotecnia ambiental como materiais de construção para camadas de base e cobertura de aterros sanitários e na composição de barreiras para contenção de contaminantes. Nos últimos anos, um tema que tem apresentado crescimento em pesquisas é a valorização de resíduos fibrosos como reforço de solos argilosos compactados para a obtenção de novos materiais geotécnicos (Prabakar e Sridhar, 2002; Donato *et al.*, 2004; Mohamed, 2013; Oliveira Júnior *et al.*, 2019). As propriedades mecânicas têm ganhado mais atenção em pesquisas com misturas solo-fibra, no entanto pouca atenção tem sido dada a questão não saturada destas misturas.

A adição de fibras ao solo altera a fase sólida do material poroso, em linhas gerais as fibras aumentam a densidade e a porosidade, além de gerar alterações na estrutura (Tang, Shi e Zhao, 2010). Cabe ressaltar que a interação entre os componentes da fase sólida é de extrema importância para o comportamento de misturas solo-fibras. Anagnostopoulos, Tzetzis e Berketis (2014) relatam que é importante que haja adesão das partículas argilosas do solo a superfície das fibras em escala microscópica para que obtenha uma estrutura que proporcione melhores propriedades geotécnicas. Portanto, a estrutura matricial formada pelo conjunto de elementos sólidos solo-fibras pode provocar alterações significativas no comportamento de retenção de água.

As fibras de coco são materiais difícil degradação, propriedades mecânicas adequadas, baixo de custo de obtenção e abundantes no Brasil, principalmente na região Nordeste (Ferreira Neto *et al.*, 2002), sendo que frequentemente estes materiais são enviados para aterros sanitários e lixões (Silveira e Aragão, 2016). Portanto, as fibras de coco apresentam potencial para aplicação em reforço de solos.

Diante deste contexto, este trabalho tem por objetivo compreender os efeitos da adição de diferentes conteúdos de fibras em uma matriz de solo argiloso compactado na curva de retenção de água obtidas a nível experimental e numericamente. Convém ressaltar que o presente artigo é oriundo da dissertação de mestrado do primeiro autor (Oliveira Júnior, 2018).

## **Materiais e métodos**

### Materiais utilizados

O solo foi obtido em uma jazida proveniente da Região Metropolitana do Recife – RMR, em Pernambuco, Brasil situado na formação Barreiras na coordenada geográfica 8°10'0.68"S e 34°59'23.12"O (Figura 1). As propriedades físicas do solo são listadas na Tabela 1. Já na Tabela 2 é apresentado a composição química do solo. Todos os dados foram obtidos experimentalmente em laboratório.

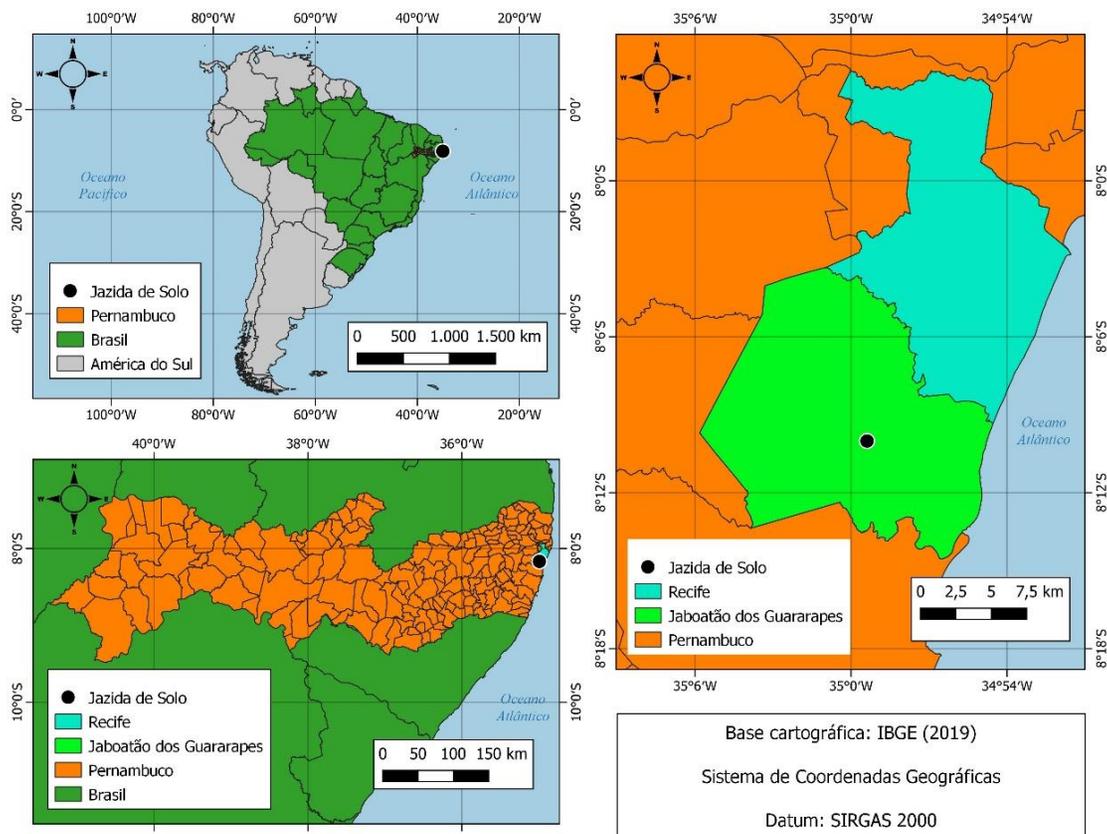


Figura 1. Mapa de localização da Jazida de Solo.

Tabela 1. Índices físicos do solo argiloso natural.

Propriedades do Solo	Valor
Massa Específica dos Grãos ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.618
Limite de Liquidez (%)	49
Limite de Plasticidade (%)	31
Índice de Plasticidade (%)	18
Classificação SUCS	CL
Pedregulho (%)	1
Areia (%)	37
Silte (%)	22
Argila (%)	40
Índice de atividade	0.45

Fonte: Os autores, (2022).

**Tabela 2.** Composição Química do solo argiloso natural.

Componente	Valor
pH	5.7
Ca (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0.7
Mg (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0.4
Al (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0.9
K (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0.2
Na (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0.5
P (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0.01
C.O. (g/kg)	2.62
M.O. (g/kg)	4.09
N (g/kg)	0.2
Relação C/N	13.1
Fe (mg/kg)	41.98

Fonte: Os autores, (2022)

As fibras de coco foram adquiridas já beneficiadas por uma comunidade situada no Brasil. As propriedades físicas e mecânicas e os componentes químicos das fibras de cocos são apresentadas na Tabela 3. Todos os dados foram obtidos experimentalmente em laboratório usando os métodos descritos por Satyanarayana *et al.* (2007).

**Tabela 3.** Propriedades físicas e mecânicas e componentes químicos das fibras de coco.

Propriedade/Componente	Valor
Físicas e Mecânicas	
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1.27
Diâmetro médio (µm)	250
Comprimento médio (mm)	22
Resistência à Tração (MPa)	110
Módulo de Elasticidade (MPa)	2550
Químicos	
α - Celulose (%)	42.51
Hemi Celulose (%)	15.36
Lignina (%)	41.02
Cinzas (%)	2.65
Extrativos (%)	3.32

Fonte: Os autores, (2022)

### Preparação das amostras

As misturas foram estudadas com teores de 0%, 0.5%, 1% e 2% de fibra de coco em relação a massa seca de solo. Estes conteúdos foram adotados com o intuito de avaliar a influência de percentuais dobrados de massa de fibra nas misturas. Alguns autores definem estas faixas de teores como possíveis proporções ótimas para o reforço de solos com fibras (Prabakar e Sridhar, 2002; Mohamed, 2013).

As misturas foram executadas em um recipiente metálica, sendo as fibras adicionadas aleatoriamente ao solo em pequenas parcelas. Logo após, as misturas foram revolvidas com auxílio de uma espátula visando obter a maior homogeneidade do material possível. Estes procedimentos foram repetidos até que todo o conteúdo de fibra estivesse visualmente incorporado à matriz.

Em seguida, corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura de 12.7 cm foram moldados. As compactações de todos os corpos de prova foram realizadas em suas respectivas densidades secas máximas e teores de umidade ótima, equivalente aos valores obtidos no ensaio Proctor normal de cada mistura, conforme Tabela 4 (Oliveira Júnior *et al.*, 2019). A partir dos corpos de prova compactados foi realizada a moldagem das amostras com anéis de metal de 40 cm<sup>2</sup> de tamanho e 2 cm de altura. Na Figura 2 é apresentado a sequência de preparação das amostras.

**Tabela 4.** Parâmetros de compactação do Solo Natural e das misturas Solo-Fibra de Coco.

Teor de Fibra (%)	Teor de Umidade Ótima (%)	Peso específico seco máximo (kN/m <sup>3</sup> )
0	19.2	16.80
0.5	19.4	16.60
1	19.6	16.43
2	20.5	15.84

Fonte: Oliveira Júnior *et al.*, (2019)



**Figura 2.** Preparação das amostras.

### Obtenção das curvas de retenção de água

As misturas com os diferentes teores de fibras foram submetidas ao ensaio de papel filtro para construção de suas respectivas curvas de retenção de água, conforme os critérios descritos na norma ASTM D5298 (Astm, 2010). A finalidade do ensaio foi analisar os efeitos da adição de diferentes percentuais de fibras de coco no comportamento da curva característica de retenção de água. Além de auxiliar na obtenção de parâmetros como o ponto/sucção de entrada de ar, capacidade de sucção ou capacidade diferencial de umidade, teor de umidade residual e capacidade de campo das misturas.

Inicialmente, as amostras foram saturadas com o auxílio de um recipiente com água, cujas amostras foram colocadas sobre uma pedra porosa e um papel de filtro para evitar perda de massa. A água foi introduzida nas amostras de forma ascendente, por ação capilar, a fim de retirar todo o conteúdo do ar. A verificação da saturação das amostras foi realizada calculando-se o grau de saturação obtido com base no peso das amostras após a absorção de água por capilaridade (Oliveira Júnior, 2018).

Após a constatação da saturação das amostras foi iniciado o ensaio de papel filtro. As curvas de retenção de água foram construídas através da secagem das amostras partindo da condição saturada em estágios correspondente a cada perda de 2% de umidade gravimétrica. O papel filtro utilizado foi o modelo Whatman nº 42 e a cada estágio de secagem os mesmos foram colocados em contato direto com amostras para determinação da sucção matricial correspondente ao conteúdo de água retido nas amostras (Oliveira Júnior, 2018).

Logo após, as amostras com os papéis filtros foram embrulhados em camadas de papel filme plástico (PVC), depois em camadas de papel alumínio e por fim colocadas em uma caixa de isopor vedada. O período de equalização da umidade do conjunto amostra-papel filtro adotado foi de 7 dias. Passado o tempo de equalização, os papéis filtros foram removidos das amostras com auxílio de uma pinça metálica, e foram imediatamente pesados em balança de precisão de 0,0001g para obtenção do peso úmido do papel. Em seguida, os papéis filtros foram secados em estufa à 100°C por 24 horas. Em seguida, o conjunto amostra e anel foram pesados para determinação do teor de umidade das misturas após equalização. Posterior a secagem, os papéis filtros secos foram postos em um dessecador com sílica e após foi realizado a pesagem novamente em balança de precisão, para aferição do peso seco do papel filtro.

Estes processos foram realizados sucessivamente até as amostras atingirem o teor de umidade de secagem constante, isto é, quando não era mais verificado perda de umidade na amostra. A sucção matricial equivalente aos diversos teores de umidade das amostras foi calculada utilizando o teor de umidade gravimétrica dos papéis filtros utilizando as equações 1 e 2, conforme

estabelecido por Chandler *et al.* (1992). As curvas de retenção de água de todas as misturas foram construídas através da relação entre a sucção matricial *versus* umidade volumétrica das amostras.

$$\psi = 10^{6.05 - 2.48 \log(wp)}, wp > 47\%$$

Equação (1)

$$\psi = 10^{4.84 - 0.0622 wp}, wp \leq 47\%$$

Equação (2)

Onde:

$wp$ : é a umidade do papel filtro em percentagem;

$\psi$ : é a sucção em kPa.

### Ajuste numérico das curvas de retenção de água

A partir dos dados experimentais foram realizados ajustes numéricos utilizando a equação 3, proposta por van Genuchten (1980), através do qual foram estimados os teores de umidade volumétrica em função da sucção.

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

Equação (3)

Onde:

$\theta$ : é a quantidade de água expressa em umidade volumétrica em %;

$\theta_r$ : é teor de umidade volumétrica residual em % obtido experimentalmente;

$\theta_s$ : é o teor de umidade volumétrica de saturação em % obtido experimentalmente;

$\psi$ : Sucção em kPa;

$a$  e  $n$ : são parâmetros de ajuste da curva.

$m$ :  $1 - 1/n$

A restrição para  $m = 1 - 1/n$  foi adotada com base nas sugestões de van Genuchten e Nielson (1985).

O software Excel foi utilizado nos ajustes das curvas de retenção de água, através de estimativas iniciais dos parâmetros  $a$  e  $n$  do modelo. Foram calculados os quadrados dos desvios entre os valores de umidade volumétrica medidos em laboratório e os valores de umidade volumétrica obtidos pelo modelo de van Genuchten (1980) para as estimativas iniciais dos parâmetros  $a$  e  $n$ . Logo após os valores foram somados, obtendo-se o somatório dos quadrados dos desvios. A partir da equação 4 foram obtidos os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) dos ajustes para os valores das estimativas iniciais dos parâmetros  $a$  e  $n$ .

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

Equação (4)

Onde:

$R^2$ : é o coeficiente de determinação;

$SQD$ : Soma dos quadrados dos desvios;

$n$ : número de medições de  $\theta$ ;

$s^2$ : variância das medições  $\theta$  obtidos experimentalmente;

Em seguida, os valores estimados de  $a$  e  $n$  dos parâmetros do modelo foram otimizados utilizando métodos iterativos com auxílio da ferramenta SOLVER do *software* Excel de forma a obter o conjunto dos valores de  $a$  e  $n$  equivalente a menor soma dos desvios quadrados e o maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ), conforme Oliveira Júnior, (2018).

#### Obtenção dos parâmetros de retenção de água

Através das curvas de retenção foram extraídos os valores referentes teor de umidade residual e ao ponto de entrada de ar de todas as misturas de forma gráfica. Em seguida, foi definido o teor de umidade respectivo a capacidade de campo, que consiste na umidade equivalente a sucção de 33 kPa. Por este método, foi estimado os valores da umidade volumétrica da capacidade campo ( $\theta_{cc}$ ). O parâmetro de capacidade de sucção ou capacidade diferencial de umidade ( $C$ ) das misturas foi definido a partir do cálculo da inclinação da reta de secagem, do trecho de tendência linear das curvas de retenção de água, sendo o cálculo efetuado conforme a equação 5.

$$C = \frac{\Delta\theta}{\Delta\log(\psi)}$$

**Equação (5)**

Onde:

$C$ : é a capacidade de sucção;

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

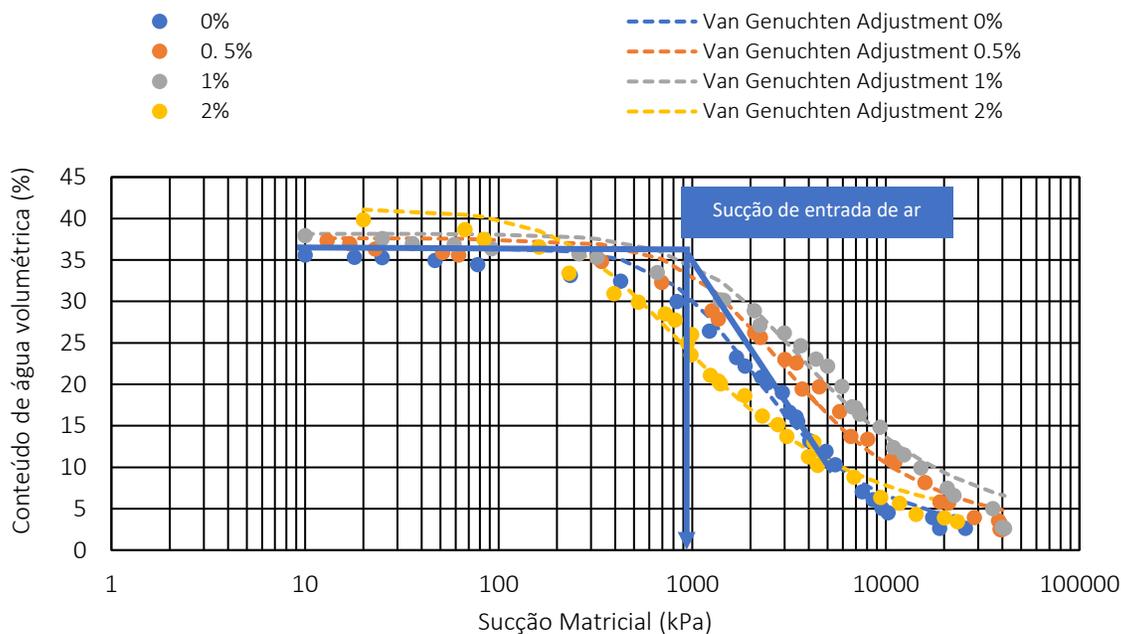
$\Delta\log(\psi)$ : variação do logaritmo da sucção.

### **Resultados e discussões**

Na Figura 3 são expressos os dados experimentais e o ajuste do modelo matemático de van Genuchten (1980) das curvas de retenção de água relacionando a sucção matricial e umidade volumétrica do solo natural e das misturas solo-fibra. Ao avaliar as curvas nota-se que tanto o solo natural quanto as misturas solo-fibra apresentam formato de curva unimodal.

Apesar da inclusão de fibras a matriz do solo argiloso elevar a porosidade das misturas, a compactação proporciona homogeneização dos poros e diminuição dos macroporos, sendo a retenção de água controlada pelos microporos (Farias *et al.*, 2011). Isto explicaria, o motivo pelo qual o solo e as misturas expressaram este comportamento. Além disto, a fibra de coco por ser um material flexível, bem como as forças de adesão solo-fibra, pode ter colaborado neste comportamento.

Os valores dos parâmetros de ajuste das curvas seguindo o modelo de van Genuchten (1980) que expressaram maior coeficientes de determinação ( $R^2$ ) são apontados na Tabela 5.



**Figura 3.** Curvas de retenção de água do solo natural e das misturas solo-fibra.

**Tabela 5.** Parâmetros da equação de van Genuchten (1980) e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos nos ajustes das curvas de retenção de água do solo natural e das misturas.

Teor de Fibra (%)	a	n	m	$R^2$
0	$7.00 \times 10^{-4}$	2.050	0.512	0.9847
0.5	$5.55 \times 10^{-4}$	1.839	0.456	0.9833
1	$4.88 \times 10^{-4}$	1.708	0.414	0.9866
2	$2.30 \times 10^{-3}$	1.610	0.379	0.9844

Fonte: Os autores, (2022).

Ao comparar a curva do solo natural com as curvas das diferentes misturas solo-fibra na Figura 3 verifica-se que as curvas das misturas com 0.5 e 1% de fibras estão localizadas do lado direito do gráfico tomando como referência a curva do solo natural. Isto sugere que a adição destes conteúdos de fibras de coco na matriz de solo argiloso eleva a retenção de água para os mesmos níveis de sucção em relação ao solo natural. Já a mistura com 2% expressou um trecho da curva, entre 200 e 5000 kPa de sucção, do lado esquerdo do gráfico em relação a curva do solo natural, sugerindo que neste trecho a retenção de água da mistura é menor do que o solo natural. Prakash *et al.*, (2019)

observaram maiores capacidades de retenção de água em solos reforçados com fibras vegetais em comparação ao solo compactado sem reforço, sendo relatado pelos autores um maior efeito deste aumento de retenção para os solos reforçados com fibras de coco.

As curvas das misturas com 0.5 e 1% de fibras de coco demonstraram comportamento muito similar entre si e com relação ao solo natural, mas é possível notar em ambas as misturas elevações nas umidades volumétricas de saturação e residual em comparação ao solo. As duas misturas expressam também pequenas elevações no trecho de saturação das curvas, isto é, no trecho anterior ao ponto de entrada de ar quando comparada ao solo natural, sugerindo com isto que a inclusão de 0.5 e 1% de fibras de coco ao solo argiloso elevou a sucção de entrada de ar.

Já a mistura com 2% de fibra de coco demonstrou comportamento divergente das demais curvas das misturas e do solo natural. Nota-se que para este conteúdo de fibras também há elevação nas umidades volumétricas de saturação e residual, mas o trecho anterior ao ponto de entrada de ar é menor do que o trecho das demais misturas e do solo natural, indicando que ocorreu diminuição do nível de sucção de entrada de ar desta mistura em relação as demais misturas e o solo natural.

A adição das fibras de coco eleva os vazios das misturas o que proporciona uma maior capacidade de armazenamento de água em relação ao solo natural, isto pode explicitar a razão pelo qual a umidade volumétrica de saturação demonstrou relação diretamente proporcional ao teor de fibra. Para Vanapalli, Fredlund e Pufahl (1999) a estrutura dos solos compactados é um dos fatores principais que influenciam na curva de retenção de água. Neste sentido, a elevação de vazios e a ausência de adesão solo-fibra possivelmente foram os fatores mais relevantes que ocasionaram a diminuição do ponto de entrada de ar obtido na mistura de 2% em relação as demais misturas e o solo natural. Apesar das misturas com 0.5 e 1% de fibras de coco possuírem maiores índices de vazios do que o solo natural, o que poderia explicar a elevação do ponto de entrada de ar nestas misturas são as forças de adesão solo-fibra serem maiores. Possivelmente a microestrutura destas misturas formaram uma organização estrutural mais consolidada que prejudicou a entrada de ar.

Os parâmetros extraídos a partir das curvas de retenção de água do solo natural e das misturas são expressos na Tabela 6. Nota-se que o ponto de entrada do solo natural foi cerca de 900 kPa e das misturas com 0.5, 1 e 2% foram de 1000, 1125 e 400 kPa, respectivamente. Em termos percentuais, estes valores correspondem a elevações da ordem de 11% para a mistura com 0.5% de fibras, 25% para a mistura com 1% de fibras e uma diminuição de 56% para a mistura com 2% de fibras, todos em relação ao solo natural. Estes resultados sugerem que as misturas com 0.5 e 1% de fibras por possuírem maior adesão solo-fibra proporcionou um nível maior de sucção para entrada de ar, e divergentemente da mistura com 2% que demonstrou maior porosidade e menor adesão solo-fibra proporcionou um nível menor de sucção para entrada de ar.

**Tabela 6.** Parâmetros obtidos através das curvas de retenção do solo natural e das misturas solo-fibra.

Teor de Fibra (%)	$\psi$ entrada de ar (kPa)	$\Delta$ de $\psi$ entrada de ar (%)	$\theta$ residual (%)	$\Delta$ de $\theta$ residual (%)	C (%)	$\Delta$ de C (%)	$\theta_{cc}$ (%)	$\Delta$ de $\theta_{cc}$ (%)	$WS_{max}$ (cm)	$\Delta$ de $WS_{max}$ (%)
0	900	-	2.21	-	2.7	-	36.46	-	1458	-
0.5	1000	11%	2.28	3%	3.62	34%	37.59	3%	1504	3%
1	1125	25%	2.31	5%	3.79	40%	38.14	5%	1526	5%
2	400	-56%	2.23	1%	3.24	20%	40.95	12%	1638	12%

Fonte: Os autores, (2022).

Com relação ao teor de umidade volumétrica residual, para o solo natural este parâmetro foi obtido um valor de 2.21%, para a mistura com 0.5% de fibras foi de 2.28% proporcionando uma elevação de 3 % em relação ao solo natural, na mistura com 1% de fibras foi de 2.31% correspondendo a 5% de elevação em relação ao solo natural e na mistura com 2% de fibras foi de 2.23% equivalendo a 1% de elevação em relação ao solo natural. O teor de umidade volumétrica residual demonstrou relação diretamente proporcional até 1% de fibras das misturas. Este desempenho pode estar ligado com a energia superficial preponderantemente polar das fibras vegetais conforme relatado por Rosário *et al.* (2011). Já o menor teor de umidade volumétrica residual verificado na mistura com 2% de fibra é possível que esteja ligado a maior porosidade que facilita a eliminação de água dos vazios.

A capacidade sucção ou capacidade diferencial de umidade foi obtida para o trecho inicial da curva umidade volumétrica *versus* sucção matricial que possui tendência linear (sucção até 100 kPa). O solo natural expressou valor de C cerca de 2.70%, na mistura com 0.5% de fibras este valor foi de 3.62%, na mistura com 1% foi de 3.79% e na mistura com 2% foi de 3.24%. Segundo Jucá (1990), a capacidade de sucção ou capacidade diferencial de umidade demonstra a relação entre o conteúdo de água que o material ganha ou perde com relação à alteração da sucção. Ou seja, a mistura com 0.5 e 1% de fibras apresentam capacidade maior de perder ou ganhar umidade para a mesma faixa de variação de sucção do que o solo natural e a mistura com 2% de fibras. Há relatos de elevações na capacidade de sucção nestes trechos com relação a inclusão de materiais de origem orgânica a matrizes de solos finos (Lopes, 2011).

No que se refere à capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) foram verificados valores da ordem de 36.46, 37.59, 38.14 e 40.95%, respectivamente, para o solo natural e as misturas com 0.5, 1 e 2%. Já quanto à capacidade de armazenamento de água máxima ( $WS_{max}$ ) foram verificados valores da ordem de 1458, 1504, 1526 e 1638cm, respectivamente, para o solo natural e as misturas com 0.5, 1 e 2%.

Os resultados obtidos de capacidade de campo do solo natural e das diferentes misturas indicam que a inclusão de fibras de coco ao solo argiloso elevou o conteúdo de água, depois que o material

saturado drena e atinge o equilíbrio por ação da gravidade, tendo em vista que o conteúdo de fibras de coco demonstrou relação diretamente proporcional com a capacidade de campo. Isto evidencia que a inclusão da fibra de coco ao solo argiloso proporcionou maior retenção de água. Já os resultados verificados de capacidade de armazenamento de água máxima ressaltam a elevação dos vazios em razão da inclusão de fibras de coco ao solo argiloso, conferindo por consequência em um volume maior de armazenamento de água. Em razão da capacidade de armazenamento de água máxima ter elevado na proporção em que o conteúdo de fibra foi elevado.

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

### Conclusões

As curvas características sucção-umidade indicam que a inclusão de fibras de coco ao solo argiloso elevou a capacidade de retenção de água do compósito, para as misturas com teores de fibras de 0.5 e 1% em razão do menor volume de vazios e interação solo-fibra maior destas misturas. As principais implicações verificadas com relação a inclusão de fibras de coco ao solo argiloso foi a elevação da capacidade de campo, capacidade de armazenamento máxima, do ponto de entrada de ar e do teor de umidade residual. Já a capacidade de sucção ou diferencial de umidade notou-se elevações em todas as misturas, mas a mistura com 1% de fibras foi a que obteve o maior valor.

### Referencias bibliográficas

- Anagnostopoulos, C. A., Tzetzis, D., Berketis, K. (2014) Shear strength behaviour of polypropylene fibre reinforced cohesive soils. *Geomechanics and Geoengineering*, **9**(3), 241-251.
- ASTM D5298-10 (2010) *Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper*. West Conshohocken, USA: American Society of Testing and Materials (ASTM) International.
- Chandler, R. J., Crilly, M. S., Montgomery-Smith, G. (1992) A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. *Proceedings of the Institute of Civil Engineering*, **92**(2), 82-89.
- Donato, M., Foppa, D., Ceratti, J. A. P., Consoli, N. C. (2006) Fibras de polipropileno como reforço para materiais geotécnicos. *Solos e Rochas*, **27**(2), 161-176.

- Farias, W.M., Carvalho, J. C. de, Silva, G.F., Campos, I.C.O., Santos Neto, P.M. (2011) Influência da Compactação nos Micro e Mesoporos Nanoestruturados e na Área Superficial Específica de um solo Laterítico. VII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, v. 1, Pirenópolis –Go, Kelps, p. 169-175.
- Ferreira Neto, M., Gheyi, H. R., Holanda, J. S. de, Medeiros, J. F. de, Fernandes, P. D. (2002) Qualidade do fruto verde de coqueiro em função da irrigação com água salina. *Rev. bras. eng. agrícola e ambiental*, **6**(1), 69-75.
- Fredlund, D.G, Xing, A. (1994) Equations for the soil water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, **31**, 521-532.
- Jucá, J.F.T. (1990) *Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada*. Tese (Doutoramento em Engenharia Civil) Universidad Politécnica de Madrid.
- Lopes, R.L. (2011) *Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco.
- Mohamed, A. E. M. K. (2013) Improvement of swelling clay properties using hay fibers. *Construction and Building Materials*, **38**, 242-247.
- Oliveira Júnior, A. I., Jucá, J. F.T., Ferreira, J. A., Guilherme, L. C. (2019) Geotechnical behavior and soil-fiber interaction of clayey soil mixed wit randomly dispersed coconut fibers. *Soils and Rocks*, **42** (2), 127-138.
- Oliveira Júnior, A. I. (2018) *Comportamento Geotécnico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras curtas de coco*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco.
- Prabakar, J., Sridhar, R. S. (2002) Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. *Construction and Building Materials*, **16**(2), 123-131.
- Prakash, A., Bordoloi, S., Hazra, B., Garg, A., Sreedeeep, S., Wang, Q. (2019) Probabilistic analysis of soil suction and cracking in fibre – reinforced soil under drying – wetting cycles in India. *Environmental Geotechnics*, **6**(4), 188-20.
- Rosário, F., Pachekoski, W. M., Silveira, A. P. J., Santos, S. F. dos, Savastano Júnior, H., Casarin, S. A. (2011) Resíduos de sisal como reforço em compósitos de polipropileno virgem e reciclado. *Polímeros*, **21**, 90-97.
- Satyanarayana, K. G., Guimarães, J. L., Wypych, F. (2007) Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **38**(7), 1694-1709.
- Silveira, V., Aragão, T. R. de P. (2016) Viabilidade financeira de instalação de uma unidade de beneficiamento de cascas de coco verde. *Revista iPecege*, **2**(3), 72-85.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufhal, D.E. (1999) The Influence of Soil Structure and Stress History on the Soil-Water Characteristics of a Compacted Till. *Géotechnique*, **49**(2), 143-159.
- van Genuchten, M.Th.; Nielsen, D.R. (1985) On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Ann. Geoph.*, **3**, 615-628.
- van Genuchten. M. Th. (1980) A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Proc. Soil. Soc. Am.*, **44**(5), 892-898.
- Tang, C.S., Shi., B., Zhao, L.Z. (2010) Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes*, **28**(1), 54-62.
- Zhai, Q., Rahardjo, H., Satyanaga, A. (2019) Uncertainty in the estimation of hysteresis of soil-water characteristic curve. *Environmental Geotechnics*, **6**(4), 204 – 213.