

# INFLUÊNCIA DO BIOCÁRVÃO DE FIBRA DE COCO NOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS, TEXTURA E LIMITES DE CONSISTÊNCIA DE LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DE GUARATINGUETÁ (SÃO PAULO, BRASIL)

*Influence of coconut fiber biochar on the physicochemical parameters, texture and consistency limits of red yellow latosol from Guaratingueta (Sao Paulo, Brazil)*

*Influencia del biocarbón de fibra de coco en los parámetros fisicoquímicos, textura y límites de consistencia del latosol amarillo rojo de Guaratingueta (Sao Paulo, Brasil)*

**BEZERRA, L. S.<sup>1</sup>; TAVARES, A. S.<sup>2</sup>; KASEMODEL, M. C.<sup>3</sup>**

## Resumo

A maioria dos solos brasileiros tem severas limitações hídricas para o crescimento de culturas e, portanto, podem se beneficiar de correções orgânicas. Neste estudo foi avaliado o uso de 1% de biocárvão de fibra de coco (BFC) como material para melhoramento de latossolo vermelho-amarelo de textura arenosa, coletado no município de Guaratinguetá (estado de São Paulo, bioma Mata Atlântica). As amostras foram submetidas a ensaios de pH, condutividade elétrica (CE), massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ), granulometria (peneiramento), limite de plasticidade (LP), limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP). Foram observadas mudanças nos parâmetros físico-químicos e geotécnicos com a adição de BFC. Houve um aumento nos valores absolutos de pH (média de 4,8 para 6,3 e  $\Delta$ pH média de -0,6 para -1,3), CE (de 41,7 para 80,7  $\mu$ S cm<sup>-1</sup>), e nos parâmetros geotécnicos LP (3,1 a 3,3% para o solo natural e 3,4 a 4,1% para o solo modificado) e LL (13,9 a 17,2% para o solo natural e 17,2 a 19,6% para o solo modificado). Os solos modificados com BFC apresentaram menor  $\rho_s$  (2,65 a 2,69 g cm<sup>-3</sup> para solo natural e 2,33 a 2,35 g cm<sup>-3</sup> para solo modificado) e menor teor de finos. Observou-se correlação negativa (-0,99) entre teor de finos e IP. Conclui-se que a adição de 10% de BFC pode ser utilizada para a melhoria dos limites de consistência e parâmetros físico-químicos de um latossolo vermelho-amarelo com textura arenosa, porém, as alterações físico-químicas devem ser mais investigadas.

**Palavras-chave:** Limite de liquidez; Limite de plasticidade; Latossolo vermelho-amarelo.

<sup>1</sup> BEZERRA, L. S. - Leticia Santos Bezerra: Graduação em andamento em Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo - USP, le.bezerra.santos@usp.br, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5728-0425>

<sup>2</sup> TAVARES, A. S.. - Amanda Saraiva Tavares: Graduação em andamento em Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo - USP, amanda.s.tavares12@usp.br; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2674-2702>

<sup>3</sup> KASEMODEL, M. C.. - Mariana Consiglio Kasemodel: Profa. Dra. da Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo - USP, mariana.kasemodel@usp.br; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0384-8835>

Data da Submissão:  
25 de junho de 2024  
Data da Aprovação:  
07 de agosto de 2024  
Data da Publicação:  
31 de agosto de 2024

## COMO CITAR:

SANTOS BEZERRA, L.; SARAIVA TAVARES, A. .; CONSIGLIO KASEMODEL, M. MELHORAMENTO GEOTÉCNICO DE SOLO ARENOSO MODIFICADO COM BIOCÁRVÃO DE FIBRA DE COCO . Engenharia Urbana em Debate, [S. l.], v. 5, n. 1, 2024. DOI: 10.14244/engurbdebate.v5i1.87. Disponível em: <https://www.engurbdebate.ufscar.br/index.php/engurbdebate/article/view/87>.



## Abstract

Most Brazilian soils have severe water limitations for crop growth and, therefore, can benefit from organic amendments. In this study, the use of 10% coconut fiber biochar (CFB) was evaluated as a material for improving a red-yellow latosol with a sandy texture, collected in the municipality of Guaratinguetá (state of São Paulo, Atlantic Forest biome). The samples were subjected to tests for pH, electrical conductivity (EC), specific mass of solids ( $\rho_s$ ), granulometry (sieving), plasticity limit (PL), liquidity limit (LL) and plasticity index (PI). Changes in physicochemical and geotechnical parameters were observed with the addition of CFB. There was an increase in absolute pH values (average from 4.8 to 6.3 and average  $\Delta$ pH from -0.6 to -1.3), EC (from 41.7 to 80.7  $\mu$ S cm<sup>-1</sup>), and in the geotechnical parameters PL (3.1 to 3.3% for natural soil and 3.4 to 4.1% for modified soil) and LL (13.9 to 17.2% for natural soil and 17.2 to 19.6% for modified soil). Soils modified with CFB showed lower  $\rho_s$  (2.65 to 2.69 g cm<sup>-3</sup> for natural soil and 2.33 to 2.35 g cm<sup>-3</sup> for modified soil) and lower fines content. A negative correlation (-0.99) was observed between fines content and PI. It is concluded that the addition of 10% BFC can be used to improve the consistency limits and physicochemical parameters of a red-yellow latosol with a sandy texture, however, the physicochemical changes must be further investigated.

**Keywords:** Flexible pavements, Dimensioning methods, Urban planning and management.

## Resumen

La mayoría de los suelos brasileños tienen severas limitaciones de agua para el crecimiento de los cultivos y, por lo tanto, pueden beneficiarse de enmiendas orgánicas. En este estudio se evaluó el uso de biocarbón de fibra de coco (BFC) al 10% como material para mejorar un latosol rojo-amarillo de textura arenosa, recolectado en el municipio de Guaratinguetá (estado de São Paulo, bioma de Mata Atlántica). Las muestras fueron sometidas a pruebas de pH, conductividad eléctrica (CE), masa específica de sólidos ( $\rho_s$ ), granulometría (tamizado), límite de plasticidad (LP), límite de liquidez (LL) y índice de plasticidad (IP). Se observaron cambios en los parámetros fisicoquímicos y geotécnicos con la adición de BFC. Hubo un aumento en los valores absolutos de pH (promedio de 4,8 a 6,3 y  $\Delta$ pH promedio de -0,6 a -1,3), EC (de 41,7 a 80,7  $\mu$ S cm<sup>-1</sup>), y en los parámetros geotécnicos LP (3,1 a 3,3% para suelo natural y 3,4 a 4,1% para suelo modificado) y LL (13,9 a 17,2% para suelo natural y 17,2 a 19,6% para suelo modificado). Los suelos modificados con BFC mostraron  $\rho_s$  más bajos (2,65 a 2,69 g cm<sup>-3</sup> para suelo natural y 2,33 a 2,35 g cm<sup>-3</sup> para suelo modificado) y menor contenido de finos. Se observó una correlación negativa (-0,99) entre el contenido de finos y el IP. Se concluye que la adición de 10% de BFC se puede utilizar para mejorar los límites de consistencia y parámetros fisicoquímicos de un latosol rojo-amarillo de textura arenosa, sin embargo, se deben investigar más a fondo los cambios fisicoquímicos.

**Palabras-clave:** Límite de liquidez; límite de plasticidad; latosol rojo-amarillo.

## 1. Introdução

Biocarvão é um material rico em carbono produzido pela combustão lenta e incompleta de biomassa (BLANCO-CANQUI, 2017; LU et al., 2023), como podas e resíduos agroindustriais. Recentemente, o biocarvão ganhou atenção como um material sustentável que pode ser utilizado nos solos, promovendo a economia circular, possibilitando a reciclagem de resíduos orgânicos e a fixação de carbono nos solos (SANTOS et al., 2022).

Devido à variação da biomassa e das condições de reação térmica, o biocarvão pode apresentar características variadas (como pH, área superficial específica, hidrofobicidade, porosidade, grupos funcionais superficiais, etc). Estudos anteriores mostraram que o biocarvão está associado a elevados pH, capacidade de troca catiônica (CTC),

área superficial específica e grupos funcionais de superfície abundantes, tornando-o um aditivo popular em ciências ambientais (CHANG et al., 2021; SANTOS et al., 2022; HUSSAIN; RAVI, 2022; ADHIKARI, et al., 2022; LU et al., 2023).

Nos últimos anos, o biocarvão tem sido utilizado como corretivo para melhorar a qualidade do solo e reabilitar solos degradados (HAILEGNAW et al., 2019; HUSSAIN; RAVI 2022; ADHIKARI et al., 2022; LU et al., 2023). Foi demonstrado que o biocarvão é capaz de aumentar as bases trocáveis e a disponibilidade de nutrientes, diminuir a densidade do solo, restaurar a acidez do solo e melhorar a capacidade de retenção de água dos solos altamente intemperizados (CHANG et al., 2021; SANTOS et al., 2022; HUSSAIN; RAVI 2022; ADHIKARI et al., 2022; LU et al., 2023).

Mas as informações sobre o efeito do biocarvão nas propriedades físicas do solo ainda são limitadas.

Em estudos recentes foi relatado que o biocarvão altera a estrutura dos poros, além de aumentar o ângulo de atrito interno ( $\varphi$ ), diminuir a coesão entre os grãos e melhorar a resistência ao cisalhamento (HUSSAIN; RAVI, 2022). Neste contexto, os limites de consistência, como o limite de liquidez (LL) e o índice de plasticidade (IP), são fatores importantes para determinar a resistência ao cisalhamento do solo alterada pelo biocarvão (ZONG et al., 2016). Em estudos sobre os limites de consistência foi demonstrado que a adição de biocarvão altera o LL, o limite de plasticidade (LP) e o IP do solo (ZONG et al., 2016, LU et al., 2023).

A capacidade do biocarvão de melhorar a qualidade do solo depende das características do biocarvão e do solo a ser alterado. Nesse contexto, o latossolo é um dos principais tipos de solo presentes no território brasileiro e se caracteriza pelo intemperismo avançado, alta condutividade hidráulica, estrutura granular, baixa CTC e baixo teor de matéria orgânica (MO). Especificamente, o latossolo vermelho-amarelo é um tipo de solo muito particular dentro do grupo dos latossolos, pois é o que apresenta mais variações, com textura que pode variar de 15% a mais de 80% de argila, sendo encontrado tanto em regiões planas, quanto em relevos montanhosos (KER, 1997). Além disso, também se caracteriza por ser altamente ácido, com média concentração de hematitas, baixa saturação por bases e grande quantidade de alumínio trocável, tornando-se um desafio para o cultivo devido à sua alta acidez e baixa fertilidade química (ROSSI, 2017). Assim, este tipo de solo pode se beneficiar de modificação a partir da adição de biocarvão.

Dentre as diversas opções de biocarvão, uma das mais viáveis economicamente, devido ao seu alto potencial de carbonização e grande volume de resíduo, é a fibra de coco babaçu. O caroço do coco babaçu é utilizado na indústria para a produção de óleo alimentício, restando partes como epicarpo, mesocarpo e endocarpo, que podem ser utilizadas para outros fins, como a

produção de biocarvão.

Neste contexto, há uma necessidade de compreender o papel do biocarvão na alteração das propriedades do solo. Neste trabalho foram avaliados os parâmetros físico-químicos, textura e limites de consistência de um latossolo vermelho-amarelo complementado com biocarvão comercial de fibra de coco (BFC). O objetivo deste estudo foi descrever o efeito da adição de biocarvão nas propriedades físico-químicas selecionadas em um latossolo vermelho-amarelo, avaliando os possíveis benefícios do biocarvão na melhoria de solos altamente intemperizados.

## 2. Materiais e métodos

### 2.1. Biocarvão de fibra de coco comercial

O BFC com partícula de diâmetro variando de 2,40 a 2,90 mm foi adquirido diretamente com o fornecedor. A caracterização do material está disponível na Tabela 1 (KASEMODEL et al., 2022; KASEMODEL et al., 2023).

**Tabela 1. Caracterização físico-química do biocarvão de mesocarpo do coco babaçu**

Parâmetro	Valor
pH (H <sub>2</sub> O)	9,7
CE ( $\mu$ S cm <sup>-1</sup> )	3970
Teor de umidade (%)	11,3
Teor de cinzas (%)	6,6
Material volátil (%)	9,3
Carbono fixo (%)	84,1
Área superficial específica (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	484,9

Fonte: Kasemodel et al. (2022) e Kasemodel et al. (2023).

### 2.2. Coleta e preparo das amostras de solo

As amostras de solo foram coletadas no município de Guaratinguetá (estado de São Paulo), próximo ao quilômetro 1 da rodovia Paulo Virgínio (SP-171), em talude com feições erosivas, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1. Local de coleta das amostras de solo



Fonte: elaborado pelas autoras (2023).

A área de estudo está localizada na Serra do Quebra Cangalha, região de colinas entre o planalto do Vale do Paraíba e a Serra do Mar. A área amostrada corresponde a rochas alteradas do Complexo Embu, unidade paragnáissica. O Complexo Embu ocorre como uma faixa contínua de direção NE-SW, desde o Estado do Rio de Janeiro até a divisã de São Paulo com o Paraná (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM, 2006). Predominam muscovita-granada-sillimanita-biotita gnaisses migmatíticos e biotita gnaisses (CPRM, 2006).

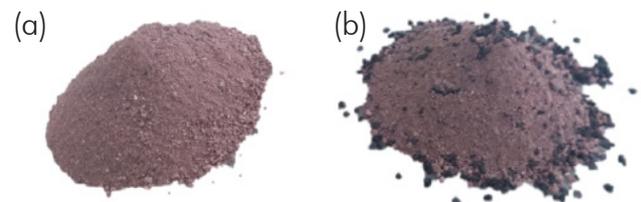
O solo da região é classificado como latossolo vermelho-amarelo. Os latossolos são resultado da evolução muito avançada com atuação expressiva de processo de latolização, resultando em intemperização intensa dos constituintes minerais primários, e secundários menos resistentes, e possuem baixa capacidade de troca de cátions (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2018). São solos bem drenados, ácidos e profundos (EMBRAPA, 2018).

A área onde foi realizada as coletas das amostras é uma área rural, com poucas construções, nas coordenadas geográficas 22°49'45,4" S 45°11'30,5" W e situada a aproximadamente 2,5 km do centro de Guaratinguetá. As amostras foram coletadas em três pontos no pé do talude, distantes aproximadamente 3 m uma da outra, denominadas de amostras solo natural (solo nat

1, solo nat 2 e solo nat 3). A coleta foi realizada em solo superficial (0 a 10 cm de profundidade) em uma área de aproximadamente 1 m<sup>2</sup> com o uso de uma pá. As amostras foram alojadas em sacos de polietileno até o momento do ensaio. Para os ensaios laboratoriais, as amostras foram secas ao ar durante 10 dias, destorroadas com almofariz de cerâmica e peneiradas utilizando a peneira #10.

O solo foi modificado a partir da adição de 10% de BFC comercial (Figura 2), conforme descrito em Hussain e Ravi (2022). As amostras modificadas foram denominadas de solo modificado (solo bio 1, solo bio 2 e solo bio 3).

Figura 2. Amostras utilizadas no estudo (a) solo natural e (b) solo modificado com 10% de BFC



Fonte: elaborado pelas autoras (2023).

### 2.3. Caracterização físico-química

Os ensaios de caracterização físico-química realizados com o solo natural e modificado estão descritos no Quadro 1, a seguir.

**Quadro 1. Descrição dos ensaios de caracterização físico-química.**

Ensaio	Descrição do ensaio	Referência
pH e ΔpH	Solução de água destilada/1M KCl e solo (1:2,5) mantidos a agitação constante por 5 min e descanso de 60 minutos até determinação de pH em eletrodo de vidro	EMBRAPA (1997)
CE	Solução de água destilada e solo (1:1) mantidos a agitação constante por 5 min e descanso de 60 minutos até determinação de CE com célula condutivimétrica	IAC (1991)

Fonte: Elaborado pelas autoras (2023).

## 2.4. Caracterização geotécnica

Os ensaios de caracterização geotécnica estão descritos no Quadro 2. Foram utilizadas as normas brasileiras (NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para a determinação da análise granulométrica, massa específica dos

sólidos ( $\phi_s$ ), e limites de liquidez e plasticidade. O grau de plasticidade e a coesão foram avaliados com base no IP, conforme descrito por Roy e Bhalla (2017).

**Quadro 2. Descrição dos ensaios de caracterização geotécnica.**

Ensaio	Descrição do ensaio	Referência
Análise granulométrica	O material granular foi peneirado e a massa retida em cada peneira foi pesada.	NBR 7181 (ABNT, 2016)
Massa específica dos sólidos ( $\phi_s$ )	Sistema contendo água e solo foram pesados em diferentes temperaturas.	NBR 6508 (ABNT, 1984)
Limite de liquidez	Ensaio realizado utilizando o equipamento Casagrande. Nesse ensaio o objetivo era atingir 25 golpes (Figura 4a).	NBR 6459 (ABNT, 2016)
Limite de plasticidade	Ensaio realizado com o auxílio de uma placa de vidro com face esmerilhada e um cilindro (gabarito) (Figura 4 b).	NBR 7180 (ABNT, 2016)
Índice de plasticidade	Índice de plasticidade foi determinado subtraindo LP de LL	NBR 7180 (ABNT, 2016)

Fonte: Elaborado pelas autoras (2023).

## 2.5. Análise estatística

Os dados obtidos na caracterização físico-química e geotécnica foram analisados em uma matriz de correlação de Pearson elaborada no Excel. Esta análise considera correlação entre os dados a partir do coeficiente de correlação de Pearson ( $p$ ), podendo ser diretamente proporcional (quando o coeficiente for próximo ou igual a 1,00), indiretamente proporcional (quando o coeficiente for próximo ou igual a -1,00) ou não apresentar correlação linear (quando o coeficiente for próximo ou igual a zero). Na análise, foram considerados os coeficientes de correlação  $p$  maiores que 0,9 ou menores que -0,9, para o qual foi aplicado uma escala de cores.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Caracterização físico-química

Os resultados das análises de caracterização físico-química estão descritos na Tabela 2.

**Tabela 2. Resultados da caracterização físico-química das amostras de solo natural e modificado**

Amostra	pH	$\Delta$ pH	CE ( $\mu$ S cm <sup>-1</sup> )
Solo nat 1	4,9	-0,7	38
Solo nat 2	4,9	-,07	53
Solo nat 3	4,5	-0,4	34
Solo bio 1	5,9	-1,3	64
Solo bio 2	6,9	-1,2	130
Solo bio 3	6,1	-1,4	48

Fonte: Elaborado pelas autoras (2023).

O solo coletado na base do talude em Guaratinguetá (SP) possui característica predominantemente ácida, com uma média de pH de 4,8,  $\Delta$ pH médio equivalente a -0,6, característicos de solos intemperizados, e CE média de 41,7  $\mu$ S cm<sup>-1</sup>.

Quando foi adicionado o BFC, verificou-se um aumento no valor de todos os parâmetros físico-químicos analisados. O solo modificado ficou com

característica ácida a neutra, com uma média de pH de 6,3,  $\Delta$ pH de -1,3 e, CE média de 80,7  $\mu$ S cm<sup>-1</sup>. Portanto, o acréscimo do BFC afetou o pH do solo, o que pode implicar em mudanças na CTC. A CTC do solo está associada ao pH do meio; geralmente em condições ácidas o solo possui baixa capacidade de retenção de cátions, o que pode implicar em perda de fertilidade. A baixa CTC condicionada pela mineralogia oxidada (óxidos de Fe e Al) ou silicática 1:1 (caulinita), comum nos ambientes tropicais, quando associada a condições de baixo pH favorecem a lixiviação e a disponibilidade de cátions (CAMPOS, 2011). Por outro lado, o aumento do pH no solo elevará os níveis de CTC (CAMPOS, 2011), podendo favorecer a retenção e disponibilidade de nutrientes no solo. Em solos não saturados, as moléculas de água aderem por adsorção a superfícies coloidais (ZHANG et al., 2022). Portanto, o aumento do pH pelo acréscimo de BFC, pode ter afetado a CTC do solo, que por sua vez pode afetar a capacidade do solo de reter água (ZHANG et al., 2022). Além disso,  $\Delta$ pH negativo indica uma rede carregada negativamente, que pode reter espécies catiônicas, como alguns nutrientes essenciais para o desenvolvimento vegetal.

Com maior retenção de água e outros nutrientes entre os grãos, ocorre também um aumento da CE, pois existe uma forte relação entre a CE e a concentração de sais e íons nas fases sólida e líquida do solo (CARMO; SILVA, 2016). Biocarvões normalmente têm pH e CE elevados. No caso, o BFC utilizado deste estudo possui valor de pH de 9,7 e valor de CE de 3970  $\mu$ S cm<sup>-1</sup> (KASEMODEL et al., 2022; KASEMODEL et al., 2023). Portanto, espera-se um aumento destes parâmetros em solo corrigido com 10% do BFC. O aumento dos parâmetros de pH e CE também foi observado por Santos et al. (2022) ao misturar biocarvão de lodo, resíduo de coco verde e bagaço de cana em três tipos de solos. A alteração desses parâmetros pode afetar a fertilidade do solo, o que deve ser investigado.

### 3.2. Caracterização geotécnica

Os resultados obtidos no ensaio de granulometria e massa específica dos sólidos estão descritos na Tabela 3.

**Tabela 3. Granulometria e massa específica dos sólidos das amostras de solo natural e modificado**

Amostra	Areia (%)	Silte e argila(%)	Massa específica dos sólidos (g cm <sup>-3</sup> )
Solo nat 1	81,5	17,6	2,69
Solo nat 2	97	2	2,65
Solo nat 3	79,5	20,3	2,69
Solo bio 1	83,3	15,8	2,35
Solo bio 2	97,3	1,7	2,33
Solo bio 3	81,6	18,3	2,35

Fonte: Elaborado pelas autoras (2023).

A partir da análise granulométrica, verificou-se que apesar de as amostras serem do mesmo talude, a fração granulométrica foi ligeiramente diferente em cada ponto amostrado, sendo que o segundo ponto (solo nat 2) é quase inteiramente composto por grãos de areia e, por isso, não foi possível determinar o LL e LP desta amostra. Enquanto a terceira amostra (solo nat 3) foi a que obteve maior teor de finos, mais de 20%, sendo, dentre as três amostras, a mais fácil de manipular para a determinação do LL e LP. Entretanto, apesar da variação no teor de finos (2,0 a 20,3%), a fração granulométrica predominante foi de areia. De acordo com Ker (1997), o latossolo vermelho-amarelo pode apresentar variações de textura de 15% até mais de 80% de argila.

Esta ocorrência também foi verificada por outros autores (BLANCO-CANQUI, 2017; VERHEIJEN et al., 2019; HUANG et al., 2021; SANTOS et al., 2022). O biocarvão pode reduzir diretamente a densidade aparente do solo (o biocarvão é um material leve) e indiretamente (o biocarvão estimula a agregação do solo) (SANTOS et al., 2022). Essa redução é mais evidente em solos arenosos, devido à baixa densidade do biocarvão.

Os resultados das análises do LL, LP e o cálculo do índice de plasticidade (IP) estão descritos na Tabela 4. O grau de plasticidade e coesão foram avaliados com base no IP, conforme descrito por Roy e Bhalla (2017).

A adição de BFC às amostras de solo resultou na redução da massa específica dos sólidos.

**Tabela 3. Granulometria e massa específica dos sólidos das amostras de solo natural e modificado**

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP	Grau de plasticidade	Grau de coesão
Solo nat 1	17,2	3,1	14,1	Plasticidade média	Coeso
Solo nat 2	13,9	-	-	-	-
Solo nat 3	16,1	3,3	12,8	Plasticidade média	Coeso
Solo bio 1	19,6	4,2	15,4	Plasticidade média	Coeso
Solo bio 2	18,1	-	-	-	-
Solo bio 3	17,2	3,4	13,8	Plasticidade média	Coeso

Fonte: Elaborado pelas autoras (2023).

Os resultados de modo geral variaram entre as amostras, sendo que na amostra 2 não foi possível realizar o ensaio de limite de plasticidade devido à predominância de areia em sua composição, o que impossibilitou modelar o solo. Ao acrescentar o BFC nas amostras observou-se alterações, principalmente no LL, aumentando a capacidade do solo de reter água sem se alterar para o estado líquido. O solo 2 apresentou menores valores LL devido ao seu elevado teor de areia. Os solos 1 e 3 apresentaram valores similares de LL, provavelmente devido à granulometria similar. O aumento dos valores dos limites de consistência nos solos modificados indica que os materiais utilizados aumentaram a capacidade de retenção hídrica sem causar alteração do estado de consistência do solo.

Além de ter sido observado aumento nos valores de LL e LP do solo modificado com BFC, notou-se que a adição de BFC permitiu o aumento do IP. O aumento do IP está associado à capacidade do solo de armazenar água entre os estados plástico e líquido. O IP de um solo aumenta linearmente com o aumento da porcentagem de argila no solo (ROY; BHALLA, 2017). Com o aumento do teor de areia, a plasticidade solo decresce, o que pode ser devido à diminuição de força de atração intermolecular (ROY; BHALLA, 2017). Devido à diminuição da força de atração, o LL do solo diminui, e consequentemente, o IP diminui. Mas à medida que o teor de argila aumenta, a força de atração intermolecular e o LL aumentam (ROY; BHALLA, 2017). O acréscimo de BFC no solo pode ter aumentado a capacidade de retenção hídrica, devido à alta porosidade, grande área de superfície específica, presença de domínios hidrofílicos e muitos grupos funcionais (CHANG et al., 2021; SANTOS et al., 2022; HUSSAIN; RAVI, 2022; ADHIKARI et al., 2022). O material pode ter agido no solo aumentando a atração intermolecular. O BFC possui grupos funcionais hidroxila (OH) e carbonila (C = O) (KASEMODEL et al., 2022; KASEMODEL et al., 2023) que são hidrofílicos e se ligam a água através de ligações do tipo ponte de hidrogênio. Apesar do aumento dos indicadores geotécnicos LL, LP e IP, a classificação do grau de plasticidade e coesão

do solo não foi alterada com o acréscimo de BFC.

A natureza hidrofóbica do biocarvão depende dos grupos funcionais presentes na superfície do biocarvão e da composição química da matéria-prima (ADHIKARI et al., 2022). A matéria-prima derivada de resíduos orgânicos vegetais, como o BFC, tem maior afinidade com a água e, portanto, aumenta a capacidade de retenção hídrica dos solos corrigidos com este biocarvão em comparação com o biocarvão de origem animal, independentemente da temperatura de pirólise (ADHIKARI, et al., 2022).

O uso de biocarvão proveniente de biomassa vegetal para melhoramento da capacidade de retenção hídrica já foi reportado por outros autores. O uso de biocarvão de coco verde e bagaço de cana melhorou a capacidade de retenção hídrica (por meio de ensaios de capacidade de retenção de água) de solos de textura grossa do tipo Argissolo e Luvisolo coletados no estado de Sergipe (SANTOS et al., 2022). Em solos argilosos, os autores relataram aumento da porosidade e transmissão de água (SANTOS et al., 2022). Kushwaha et al. (2021) aplicaram biocarvão de casca de arroz em aluvião calcário, coletado na Índia, de textura média a moderadamente grosseira, visando a redução de processos erosivos (por meio de ensaios de em campo). De acordo com os autores, a adição de biocarvão reduziu o escoamento superficial e a produção de sedimentos. Hussain e Ravi (2022) avaliaram o uso de biocarvão proveniente de madeira dura em solos utilizados em construção, coletados na Índia. Os autores concluíram que o biocarvão aumentou a resistência ao cisalhamento, o ângulo de atrito interno e capacidade de carga dos solos testados (HUSSAIN; RAVI, 2022).

Apesar da melhora em propriedades geotécnicas de solos em estudos anteriores, os parâmetros avaliados não foram os mesmos, o que dificulta comparações. Além disso, de acordo com Adhikari et al. (2022), as características do solo também influenciam na resposta de solos melhorados com biocarvão. Solos arenosos

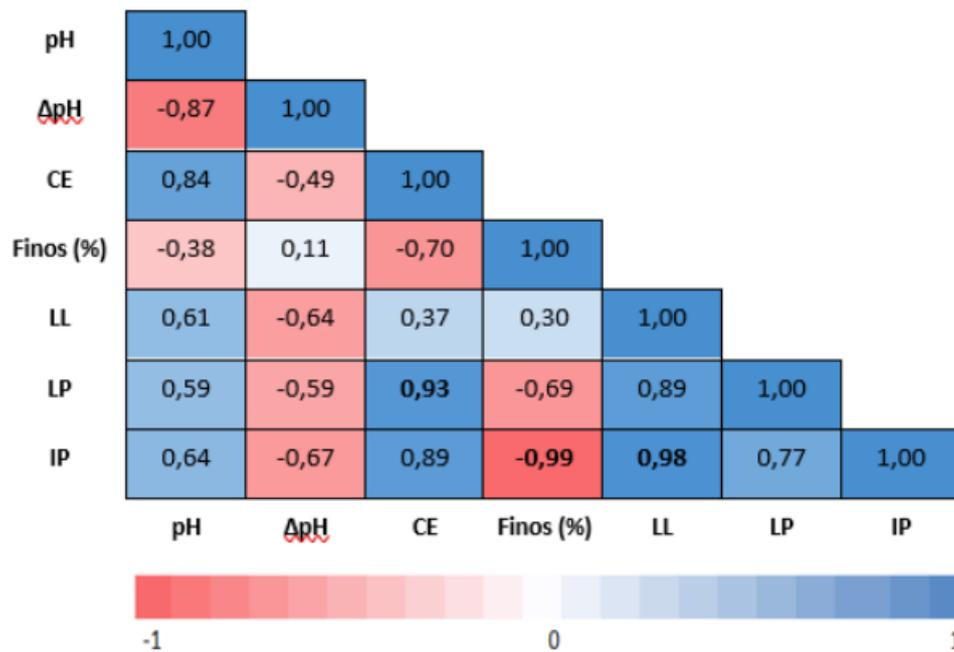
tendem a apresentar uma resposta melhor na capacidade de retenção hídrica do que demais solos (ADHIKARI et al., 2022). Ademais, o tamanho da partícula do biocarvão também afeta a capacidade de retenção hídrica devido à estrutura do poro (ADHIKARI et al., 2022).

Neste estudo, observou-se que a adição de BFC aumentou os valores dos indicadores geotécnicos LL, LP e IP de um latossolo vermelho-amarelo de textura arenosa, possibilitando maior retenção de água sem alteração do estado físico do solo. Além disso, o uso de BFC implicou em redução da acidez do solo.

### 3.3 Análise estatística

Os dados obtidos foram analisados utilizando uma matriz de correlação de Pearson (Figura 3).

Figura 3. Matriz de correlação de Pearson dos parâmetros físico-químicos e geotécnicos dos solos ensaiados



\*Observação: Valores em negrito e em vermelho indicam correlação diretamente proporcional ( $p > 0,90$ ). Valores em negrito e em azul indicam correlação inversamente proporcional ( $p < -0,90$ ).

As correlações diretamente proporcionais ( $p > 0,90$ ) estão apresentadas em negrito e coloração azul na Figura 3; as correlações indiretamente proporcionais ( $p < -0,90$ ) estão apresentadas em negrito em coloração vermelha na Figura 3.

A CE apresentou correlação positiva com o LP ( $p = 0,93$ ). Isso implica que o aumento da CE (ocasionado pela adição de BFC ao solo), resulta em um aumento diretamente proporcional do LP. Além disso, verificou-se que o acréscimo

de BFC aumenta a CE do solo de forma mais significativa do que ocorre com o aumento do pH (Tabela 3).

Foi obtida correlação negativa entre a fração de finos (silte e argilas) e o IP ( $p = -0,99$ ). Esta tendência não é esperada em solos naturais, uma vez que maior teor de finos implica em maior plasticidade do solo. No entanto, neste estudo, ao acrescentar 10% de BFC com diâmetro de partícula entre 2,40 e 2,90 mm, aumentou-se a

fração grossa e o IP do solo modificado.

De forma geral, notou-se que a adição de BFC ao solo arenoso coletado em Guaratinguetá aumentou os valores dos parâmetros físico-químicos e limites de consistência do solo. Estas alterações devem ser mais bem compreendidas a partir de ensaios com mais amostras e outros tipos de solos. Além disso, recomenda-se análises adicionais, como ensaio de retenção hídrica e germinação de sementes, para compreender melhor as implicações da adição de BFC no solo.

#### 4. CONCLUSÃO

O solo do talude estudado possui pH ácido, característico dos solos bem drenados; composição granulométrica predominantemente de areia; IP variando de 12,8 a 14,1.

A adição de 10% de BFC alterou as características físico-químicas, textura e limites de consistência do solo. O pH do solo modificado foi aumentado para próximo da neutralidade (5,9 a 6,9), característica que favorece a fertilidade do solo. Verificou-se que a adição de BFC aumentou o teor de partículas grossas (fração areia), aumentou os limites de consistência (LL e LP) e IP, e diminuiu a densidade específica dos sólidos.

Na análise de correlação de Pearson, verificou-se correlação positiva entre o LP e a CE ( $p = 0,93$ ), e correlação negativa entre a fração de finos e o IP ( $p = -0,99$ ). Demonstrando que a adição de BFC ao solo ocasionou um aumento proporcional da CE e LP, e redução proporcional do teor de finos e IP.

Desse modo, conclui-se que o BFC é um material interessante para a melhora das condições físico-químicas do solo e capacidade de retenção de água de solos.

#### 5. AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao Programa Unificado de Bolsas da Universidade de São Paulo (Edital 2022-2023) pela bolsa concedida.

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADHIKARI, S.; TIMMS, W.; MAHMUD, M. A. P. Optimising water holding capacity and hydrophobicity of biochar for soil amendment – A review. *Science of The Total Environment*, V.851, Part 1, p. 158043, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158043>

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira 4,8 mm: Determinação da massa específica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984, 7p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016, 8p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016, 3.p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984, 13 p.

BLANCO-CANQUI, H. Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society American Journal*, v. 81, n. 4, p. 687-711, 2017. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>

CAMPOS, M. C. C. Atributos dos solos e riscos de lixiviação de metais pesados em solos tropicais. *Ambiência*, v. 6, n. 3, p. 547-565, 2011.

CARMO, D. L. do; SILVA, C. A. Condutividade elétrica e crescimento do milho em solos contrastantes sob aplicação de diversos níveis de calagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* [online], v. 51, n. 10, pp. 1762-1772, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/vhKrBTyvQSmW8HJbTR3xhXB/?lang=pt#>. Acesso em: 14/12/2022.

CHANG, Y.; ROSSI, L.; ZOTARELLI, L.; GAO, B.; SHAHID, M. A.; SARKHOSH, A. Biochar improves soil physical characteristics and

- strengthens root architecture in Muscadine grape (*Vitis rotundifolia* L.) Yuru. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, v. 8, n. 7, 2021. <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00204-5>.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. EMBRAPA Solos (5ª edição). Brasília, DF. 355 p., 2018.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.
- HAJLEGNAW, N. S.; MERCL, F.; PRAČKE, K.; SZAKOVA, J. Mutual relationships of biochar and soil pH, CEC, and exchangeable base cations in a model laboratory experiment. *Journal of Soils and Sediments*, v. 19, pp. 2405–2416, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02264-z>
- HUANG, H.; REDDY, N. G.; HUANG, X.; CHEN, P.; WANG, P. Y.; ZHANG, Y.; HUANG, Y.; LIN, P.; GARG, A. Effects of pyrolysis temperature feedstock type and compaction on water retention of biochar amended soil. *Scientific Reports*, v. 11, 7419, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86701-5>
- HUSSAIN, R.; RAVI, K. Investigating biochar-amended soil as a potential lightweight material for embankments. *Ecological Engineering*, v. 180, 106645, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106645>.
- IAC – Instituto de Agrônomo de Campinas. Métodos de análise química mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas. Boletim Técnico 106. Campinas: IAC, 1991.
- KASEMODEL, M. C.; ROMÃO, E. L.; PAPA, T. B. R. Adsorption of Methylene Blue on Babassu Coconut (*Orbignya speciosa*) Mesocarp Commercial Biochar. *International Journal of Environmental Science Technology*, v. 21, p. 1671-1682, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05066-6>.
- KASEMODEL, M. C.; ROMÃO, E. L.; PAPA, T. B. R. Adsorption of Methylene Blue on Babassu Coconut (*Orbignya speciosa*) Mesocarp Commercial Biochar. *Research Square* (Preprint), 2022. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1510328/v1>.
- KUSHWAHA, D. P.; KUMAR, A.; CHATURVEDI, S. Determining the effectiveness of carbon-based stabilizers blends in arresting soil erosion and elevating properties of Mollisols soils of North Western Himalayas. *Environmental Technology & Innovation*, v. 23, 101768, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101768>.
- KER, J. C. Latossolos do Brasil: Uma Revisão. Universidade Federal de Viçosa - Minas Gerais, 1997. *Geonomos*, v. 5, n. 1, 1997. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v5i1.187>.
- LU, Y.; GU, K.; SHEN, Z.; TANG, C. S.; SHI, B.; ZHOU, O. Biochar implications for the engineering properties of soils: A review. *Science of the Total Environment*, v. 888 164185, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164185>
- ROSSI, M. Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: Revisado e Ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. Disponível em: [https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/wp-content/uploads/sites/234/2017/11/Livro\\_Solos1.pdf](https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/wp-content/uploads/sites/234/2017/11/Livro_Solos1.pdf). Acesso em: 14/12/2022.
- ROY, S.; BHALLA, S. K. Role of geotechnical properties of soil on civil engineering structures. *Resources and Environment*, v. 7, n. 4, pp. 103-109, 2017. <https://doi.org/10.5923/j.re.20170704.03>
- SANTOS, J. A.; GONZAGA, M. I. S.; SANTOS, W. M.; SILVA, A. J. Water retention and availability in tropical soils of different textures amended with biochar. *CATENA*, v. 219, 106616, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106616>
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL –

CPRM. Programa Geologia do Brasil - Mapa Geológico do Estado de São Paulo, Escala 1:750.000. Breve descrição das unidades litoestratigráficas aflorantes no Estado de São Paulo, 2006. Disponível em: [https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/2966/1/breve\\_descri%C3%A7%C3%A3o\\_unidades.pdf](https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/2966/1/breve_descri%C3%A7%C3%A3o_unidades.pdf). Acesso em: 24 jun 2023.

VERHEIJEN, F. G. A.; ZHURAVEL, A.; SILVA, F. C.; AMÁRO, A.; BEN-HUR, M.; KEIZER, J. J. The influence of biochar particle size and concentration on bulk density and maximum water holding capacity of sandy vs sandy loam soil in a column experiment. *Geoderma*, v. 347, pp. 194-202, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03044>

ZHANG, C.; WANG, J.; CHEN, R. Water adsorption isotherms on soil external particle surface by molecular simulation. *Computers and Geotechnics*, v. 139, 104432, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104432>

ZONG, Y.; XIAO, Q.; LU, S. Acidity, water retention, and mechanical physical quality of a strongly acidic Ultisol amended with biochars derived from different feedstocks. *Journal of Soils and Sediments* v. 16, pp.177–190, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1187-2>