

ESTUDO DO REFORÇO DO SOLO COM BAMBU APLICADO A INFRAESTRUTURA

Rafaela Quina de Aguiar (IC) e Kamila Rodrigues Cassares Seko (Orientadora)

Apoio: PIVIC Mackenzie

RESUMO

O presente trabalho visou analisar a viabilidade do uso de fibras de bambu como uma alternativa para o reforço de solo aplicados a infraestrutura. O objetivo principal foi examinar o comportamento mecânico do solo quando este é reforçado com diferentes teores de fibra de bambu. Para atingir esse objetivo, foram conduzidos ensaios para caracterizar as propriedades do solo, bem como para avaliar sua compactação e cisalhamento. Inicialmente, foram realizados ensaios como o de granulometria, limites de Atterberg e massa específica dos grãos para a caracterização do solo utilizado. Em seguida, foram preparadas amostras de solo com adição de fibras de bambu em diferentes proporções: 2%, 4% e 5% da massa total do solo. As fibras foram incorporadas de forma aleatória nas amostras para garantir uma distribuição homogênea. Os ensaios de compactação, cisalhamento e compressão simples foram então realizados para determinar o efeito do reforço com fibras de bambu sobre as propriedades mecânicas do solo. As medições obtidas foram comparadas com as do solo sem reforço, permitindo uma análise da influência da inclusão das fibras na resistência do solo. Os resultados obtidos oferecem informações sobre como as fibras de bambu quando adicionadas aleatoriamente, com um percentual de 4% de fibras sobre a massa total do solo podem modificar as características dele quanto a resistência ao cisalhamento, tornando o mais bem avaliado e com melhores resultados em comparação aos outros teores utilizados.

Palavras-chave: Reforço. Solo. Fibra de Bambu.

ABSTRACT

The present study aimed to analyze the feasibility of using bamboo fibers as an alternative for soil reinforcement applied to infrastructure. The main objective was to examine the mechanical behavior of the soil when reinforced with different bamboo fiber contents. To achieve this objective, tests were conducted to characterize the soil properties, as well as to assess its compaction and shear strength. Initially, tests such as grain size analysis, Atterberg limits, and specific gravity of the grains were carried out to characterize the soil used. Subsequently, soil samples were prepared with the addition of bamboo fibers in different proportions: 2%, 4%, and 5% of the total soil mass. The fibers were randomly incorporated into the samples to ensure a homogeneous distribution. Compaction, shear, and unconfined compression tests



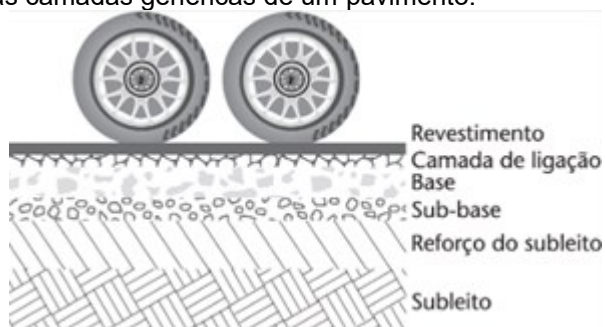
were then performed to determine the effect of bamboo fiber reinforcement on the mechanical properties of the soil. The measurements obtained were compared with those of the soil without reinforcement, allowing for an analysis of the influence of fiber inclusion on the soil's strength. The results provide information on how the randomly added bamboo fibers, with a percentage of 4% of fibers over the total soil mass, can modify the soil's characteristics regarding shear resistance, showing the best evaluation and results compared to the other proportions used.

Keywords: Reinforcement. Soil. Bamboo Fiber.

1. INTRODUÇÃO

O pavimento é uma estrutura em camadas que suporta o tráfego de veículos e pedestres, composta por subleito, sub-base, base e revestimento asfáltico. O subleito é considerado a fundação do pavimento. Os esforços são transmitidos a este e se dissipam geralmente no primeiro metro de profundidade. A camada de base é projetada para distribuir a carga do tráfego para o solo subjacente. Por fim, a camada de revestimento asfáltico é a camada superior do pavimento e é projetada para resistir ao desgaste causado pelo tráfego e proteger as camadas inferiores do pavimento (BALBO, 2007). Este conjunto de camadas é constituído, geralmente, por materiais granulares, como os solos ou suas misturas. Esta estrutura pode ser observada na Figura 1.

Figura 1. Esquemático das camadas genéricas de um pavimento.



Fonte: Balbo (2007).

Na Engenharia Civil, o solo pode ser definido como um material da crosta terrestre que serve de suporte às construções civis e que pode ser escavado mecanicamente, suporta construções e perde resistência ao contato com água (VARGAS, 1977). A variabilidade das partículas do solo afeta suas propriedades e trabalhabilidade, tornando-o fundamental na construção de pavimentos.

Consequentemente, o solo é um elemento fundamental na construção de um pavimento, uma vez que é a fundação sobre a qual a estrutura do pavimento será construída. Um solo de apoio inadequado pode levar a problemas de instabilidade, deformação e até mesmo o colapso da estrutura do pavimento. Já um solo adequado é fundamental para garantir que o pavimento tenha uma base sólida e estável, com capacidade de suporte adequada, garantindo a segurança dos usuários do pavimento e prolongando a vida útil do mesmo. Para garantir uma base sólida e estável, solos destinados ao subleito de rodovias podem requerer intervenções, como troca de solo, pré-carregamento, ou reforço com geossintéticos. O reforço melhora a estabilidade, capacidade de suporte e reduz deslocamentos e deformações.

Sendo assim, este artigo tem o objetivo de estudar uma alternativa para reforço de solo de baixa resistência considerando o aspecto ambiental e econômico por meio da utilização de fibras de bambu distribuídas aleatoriamente no solo, buscou-se analisar seu comportamento e as alterações geradas nas propriedades mecânicas deste material granular por meio da adição de fibra com variação do teor da mesma. Entende-se que pesquisas como esta são necessárias para compreender a potencialidade do uso de um material mais sustentável na construção de rodovias.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

É imprescindível que o solo para a construção de um pavimento seja de extrema qualidade com o objetivo de garantir a estabilidade e durabilidade do pavimento assim como a manutenção a longo prazo. Reforçar o solo consiste na introdução de elementos resistentes à tração, aumentando sua resistência e assim, diminuindo a sua deformabilidade. Uma forma efetiva de melhoramento do solo seria por meio da adição de fibras naturais.

Este reforço do solo pode ser conseguido através da adição de fibras tanto sintéticas quanto naturais. Segundo Hejazi *et al.* (2012), o emprego de fibras naturais com o intuito de melhoramento do solo é uma solução considerada antiga. Os mesmos autores elencam as fibras naturais da seguinte forma fibras de: coco, sisal, palma, juta, linho, palha de cevada, bambu e cana. Já as fibras sintéticas são de: polipropileno, poliéster (PET), polietileno (PE), vidro, nylon, aço e de álcool polivinílico.

De acordo com Takaikaew *et al.* (2021), atualmente é preferível o uso de fibras naturais, pois enquanto as fibras sintéticas são de alto custo inicial por serem produtos oriundos de indústrias, as fibras naturais são baratas devido à disponibilidade natural, além de promover uma sociedade mais sustentável.

A fibra de bambu é destacada como uma opção viável, especialmente em países em desenvolvimento, por ser abundante, renovável, ecológica, de baixa densidade e com boas propriedades mecânicas. Estudos diversos mostram que o bambu tem alta capacidade de resistência a tração e compressão sendo usado no reforço do concreto ou até mesmo em estruturas. O bambu é utilizado há séculos na construção, demonstrando alta resistência à tração e compressão (ADIER, 2023).

De acordo com Fialho *et al.* (2005, *apud* Nogueira *et al.*, 2017), o bambu pode ser considerado um tipo de matéria-prima mais competitivo quando comparado aos materiais sintéticos, e apresenta grande potencial agrícola. Este apresenta uma boa razão entre velocidade de crescimento e aproveitamento por área, com produção anual, renovável e que dispensa a necessidade de replantios. Similarmente, Kiranpriyaa e Rama (2023) destacam

que a fibra de bambu apresenta disponibilidade local e baixo custo, sendo que este último pode ser considerado um atrativo para aplicação geotécnica.

Apesar de suas vantagens, ainda há poucos estudos sobre a adição de fibras de bambu no solo para pavimentos. Assim, pretende-se contribuir para esta área.

Como citado anteriormente, a maneira de proporcionar o melhoramento do solo consiste na adição de fibras que podem proporcionar alterações benéficas no comportamento do solo e apresentar viabilidade econômica justificada a partir de comparações realizadas entre o solo com e sem reforço.

O bambu é uma planta conhecida por sua resistência, durabilidade e rapidez de crescimento. A adição de fibra de bambu ao solo pode melhorar significativamente suas propriedades mecânicas e apresenta vantagens econômicas e ambientais. O bambu é uma matéria-prima renovável, de baixo custo e facilmente disponível em muitas regiões do mundo.

Jevi e Dempfen (2016) estudaram as alterações nos parâmetros relacionados à resistência ao cisalhamento na condição drenada para um solo local sem e com reforço com fibra de bambu nos teores de 1%, 2%, 3%, 4% e 5%. Estes autores observaram que há um crescimento nos parâmetros das amostras com até 4% de teor de fibra, a partir do qual há a queda nos resultados.

3. METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos foram seguidos de acordo com as normas técnicas brasileiras. Os ensaios e metodologia realizados, no laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentos do Prédio 6 da UPM, tiveram o intuito de caracterizar a amostra de solo exposta com e sem reforço de fibras de bambu e seu comportamento mecânico.

Inicialmente, foi realizada a preparação da amostra do solo seguindo a norma ABNT NBR 6457 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2024) para a realização dos ensaios de compactação e ensaios de caracterização com o intuito de obter o teor de umidade no estado atual do solo (empregada a norma anteriormente citada), granulometria (sedimentação e peneiramento grosso e fino) de acordo com norma ABNT NBR 7181 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016), massa específica dos grãos conforme ABNT NBR 6458 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016) e Limites de Atterberg seguindo as normas ABNT NBR 6459 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016) e ABNT NBR 7180 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016).

Para a realização dos ensaios apresentados a seguir, uma quantidade de fibra de bambu da espécie *Bambusa vulgaris* foi separada manualmente no laboratório considerando um comprimento de aproximadamente 2 cm como ilustra a Fotografia 1. Esta figura também apresenta uma amostra do solo a ser estudado. As fibras utilizadas como um agente de reforço do solo, foram adicionadas aleatoriamente na amostra de solo equivalente as seguintes porcentagens estudadas: 2%, 4% e 5% em relação a massa total de solo utilizada em cada ensaio.

Fotografia 1. (a) Fibras de bambu e solo separados (b) Solo e 2% de fibra de bambu adicionadas.



Fonte: Os autores (2024).

Os ensaios de compactação do solo, segundo a ABNT NBR 7182 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016) com versão corrigida em 2020 foram realizados com amostras sem reforço e com reforço de 2%, 4% e 5% de fibras em relação ao valor de massa do solo e adicionadas aleatoriamente. Para isso, foram utilizados cilindros de Proctor e um equipamento de compactação com emprego da energia normal, onde houve o preenchimento do cilindro por meio de três camadas e compactadas individualmente com 26 golpes distribuídos. Esta metodologia é realizada com cinco diferentes teores de umidade. Após a compactação, a massa específica aparente seca teores de umidade são determinados. Sendo possível traçar gráficos que relacionam teor de umidade e massa específica aparente seca, a fim de identificar o teor de umidade ótimo e a massa específica aparente seca máxima.

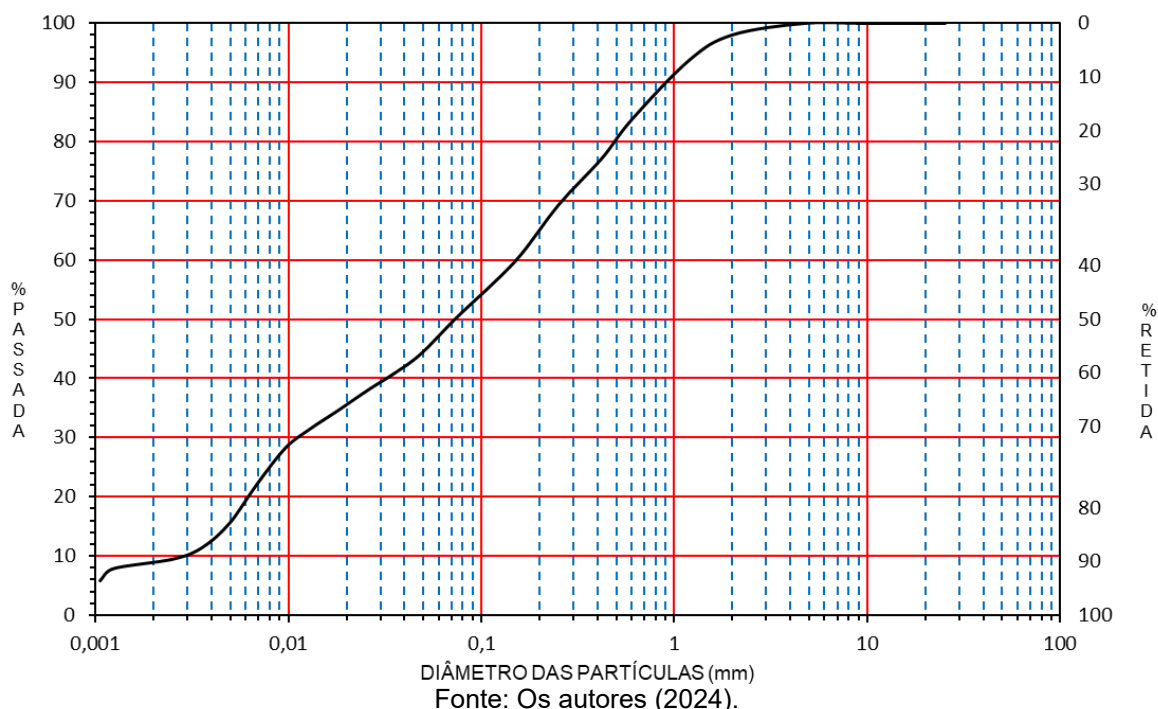
Os ensaios de cisalhamento, segundo as normas ASTM D3080/D3080M (ASTM INTERNATIONAL, 2020), foram realizados com amostras do solo compactado sem reforço e com reforço de 2%, 4% e 5% de fibras adicionadas aleatoriamente em relação a massa do solo. Foi optado neste caso a realização do teste rápido, quando não há adensamento, tendo sido determinada a velocidade de 0,05 mm/min para cada ensaio, totalizando ao final 200 minutos para cada ensaio realizado. Acrescenta-se que os corpos de prova ensaiados foram previamente compactados empregando os procedimentos e equipamentos segundo norma ABNT NBR 6457 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2024), adotando o teor de umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima para amostra de solo sem reforço e para cada teor de fibra já obtidos anteriormente. Ressalta-se que a compactação do solo com reforço foi feita utilizando cilindros grandes com medidas em torno de 15cm de diâmetro e 22cm de altura por ter sido realizada sem o espaçador e para isso, foi feito um cálculo para atingir a energia normal de compactação nessa condição em específico, realizando 8 camadas de solo aplicando 12 golpes em cada uma. Após compactado, foram talhados corpos de prova com seção quadrada, 10cmx10cm, na quantidade de 3 corpos de prova para cada porcentagem de fibra.

Inicialmente, estava prevista a realização de ensaios de compressão triaxial. Entretanto, apesar de esforços, não foi possível realizá-los por limitação no equipamento. Em substituição e com base nas diretrizes da norma ABNT NBR 12270 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022), foram realizados ensaios de resistência à compressão não confinada em amostras sem reforço e em amostras do solo com reforço para o teor de fibra que melhor desempenhou resultados no ensaio de cisalhamento. Durante esses ensaios, os corpos de prova foram analisados até o momento de ruptura, mediante a aplicação de carga axial, com controle de deformação, sendo que cada um havia sido compactado previamente apresentando teor de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima correspondente.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

A caracterização da amostra foi iniciada com a obtenção da curva granulométrica, conforme mostra o Gráfico 1, dados sobre a composição da amostra do solo ensaiado, o qual possui cerca de 7,80% de argila, 39,20% de silte, 51,04% de areia e 1,96% de pedregulho em sua composição, expressão dos resultados obtidos nos ensaios de Peneiramento Grosso, Peneiramento Fino e Sedimentação.

Gráfico 1. Curva granulométrica do solo estudado.



Foram usados os limites de Atterberg para caracterizar as propriedades do solo determinando primeiro o Limite de Plasticidade segundo ABNT NBR 7180 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016), obtendo seu resultado por meio do ensaio que consistiu em determinar a umidade média de uma porção de solo que, quando moldado sobre uma placa de vidro na forma de um cilindro de 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, começa a fraturar atingindo o início de seu estado plástico, ilustrado pela Fotografia 2. No cálculo da umidade de três amostras realizadas foi obtida uma média de 33,1%. Considerando uma variação de 5%, os valores das amostras estão compreendidos entre 31,4% e 34,7%, estando dentro da variação prevista por norma. Foi determinado que a amostra de solo apresenta um Limite de Plasticidade (LP) de 33%.

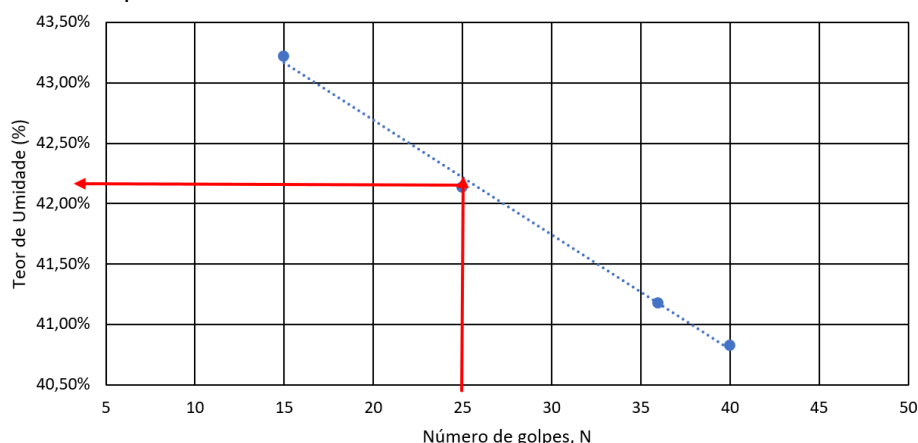
Fotografia 2. Ensaio de LP.



Fonte: Os autores (2024).

O Limite de Liquidez foi determinado através do ensaio realizado segundo a ABNT NBR 6459 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016), em que o solo é moldado no aparelho de Casagrande e, em seguida, é gradualmente submetido a impactos de energia padronizada. O Limite de Liquidez (LL) desse solo é de 42% obtido a partir do teor de umidade correspondente a 25 golpes, conforme ilustrado no Gráfico 2.

Gráfico 2. Limite de Liquidez.



Fonte: Os autores (2024).

O índice de plasticidade do solo foi determinado por meio da diferença entre o Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade, tendo o resultado de 9%. Acrescenta-se que o solo ensaiado foi caracterizado pelo método de Classificação Unificada (USCS), desenvolvido por Arthur Casagrande, como ML – Solo Siltsoso de Baixa Compressibilidade.

Para a determinação da massa específica dos grãos, foi realizado o ensaio segundo a norma ABNT NBR 6458 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016), no Anexo B, empregando o picnômetro, ilustrado abaixo na Fotografia 3, tendo como resultado massa específica aparente dos grãos de $2,65 \text{ g/cm}^3$ ($26,5 \text{ kN/m}^3$).

Fotografia 3. Ensaio de massa específica aparente no picnômetro.

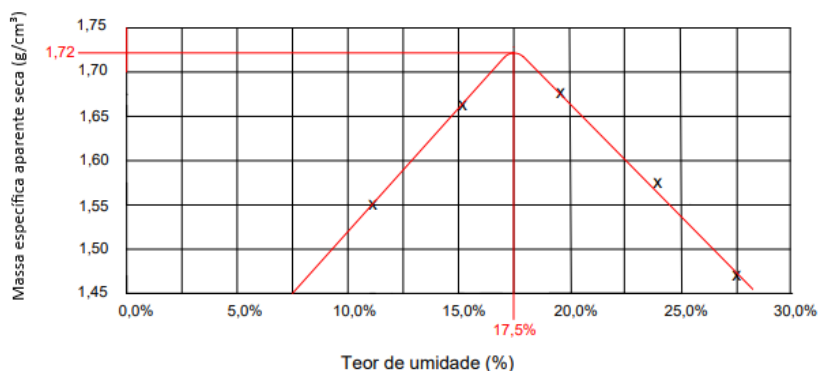


Fonte: Os autores (2024).



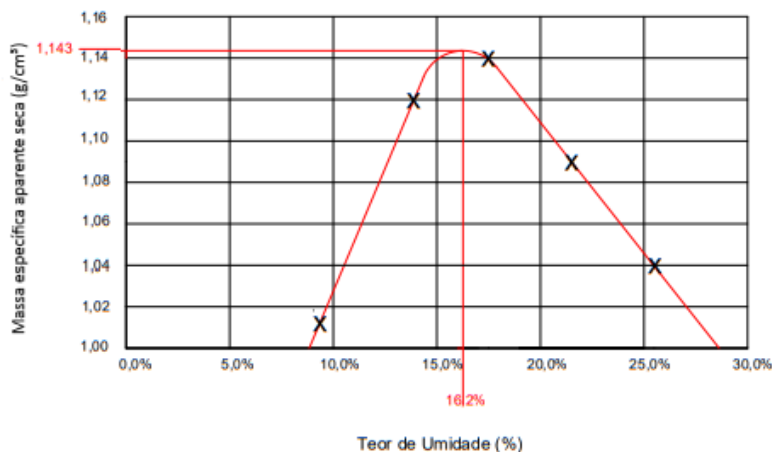
Nos ensaios de compactação, foram analisados e comparados os resultados dos solos sem adição de fibras, com adição de 2% de fibras, de 4% de fibras e de 5% de fibras de bambu, obtendo como resultado da curva de compactação, teor de umidade ótima igual a 17,5%, 16,2%, 19,1% e 17,8% e massa específica aparente seca máxima de 1,720 g/cm³ (17,20 kN/m³), 1,143 g/cm³ (11,43 kN/m³), 1,106 g/cm³ (11,06 kN/m³) e 1,108 g/cm³ (11,08 kN/m³), respectivamente conforme Gráfico 3 a Gráfico 6 e Tabela 1 com comparativos dos valores.

Gráfico 3. Curva de compactação do solo sem reforço.



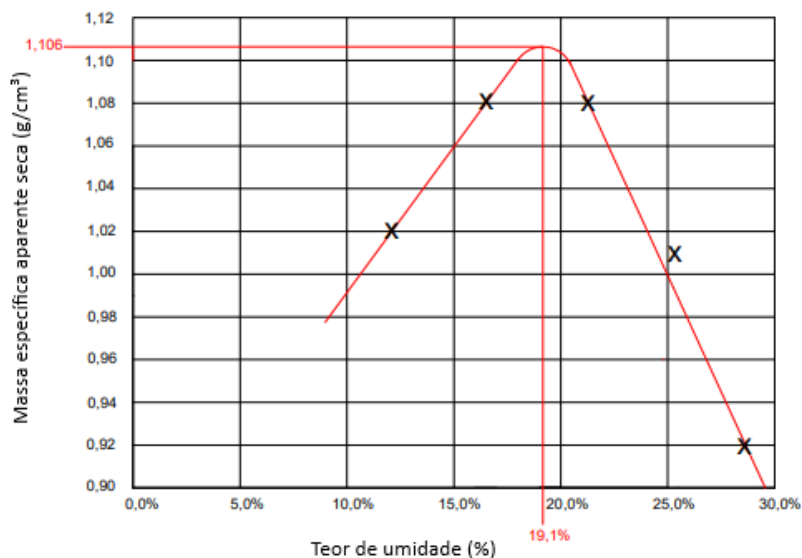
Fonte: Os autores (2024).

Gráfico 4. Curva de compactação do solo com adição de 2% de fibra.



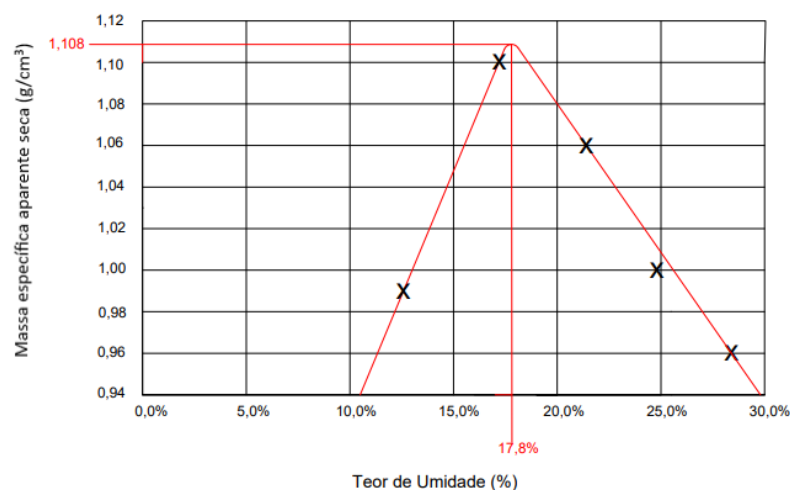
Fonte: Os autores (2024).

Gráfico 5. Curva de compactação do solo com adição de 4% de fibra.



Fonte: Os autores (2024).

Gráfico 6. Curva de compactação do solo com adição de 5% de fibra.



Fonte: Os autores (2024).

Tabela 1. Teor de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima das amostras de solo compactadas.

Amostra	Teor de umidade ótima (%)	Massa específica aparente seca máxima (g/cm³)
Sem fibra	17,5	1,720
Com 2% de fibra	16,2	1,143
Com 4% de fibra	19,1	1,106
Com 5% de fibra	17,8	1,108

Fonte: Os autores (2024).

Como afirmado anteriormente, a amostra de solo foi caracterizada como solo siltoso de baixa compressibilidade. Fato que foi claramente percebido ao realizar os ensaios de compactação, pois o solo, especialmente o que não continha adição de fibra, foi

extremamente trabalhoso e difícil de conseguir resultados satisfatórios, tendo o ensaio de ser refeito algumas vezes.

Após análises dos resultados dos ensaios de compactação, foi possível perceber que com a adição de fibra de bambu, houve diminuição gradativa na massa específica aparente seca máxima das amostras e aumento nos teores de umidade ótima, deixando claro que a adição de fibras aumenta a capacidade de retenção de água do solo devido à absorção pelas fibras. Segundo Firoozi *et. al* (2017), as fibras influenciam a estrutura do solo, melhorando a coesão e reduzindo a densidade seca máxima, o que demanda mais água para atingir a compactação.

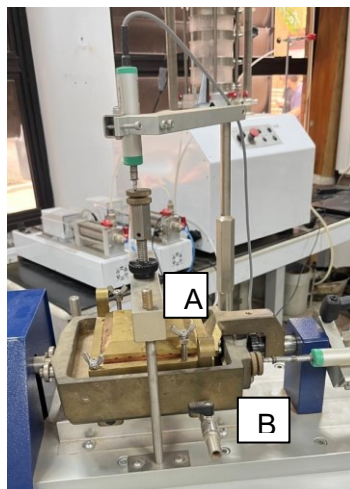
O ensaio de cisalhamento direto foi realizado em 12 corpos de prova ao todo, onde se ilustra um corpo de prova talhado no molde correspondente ao teor de 4% de fibra por meio da Fotografia 4. O corpo de prova foi transferido do molde quadrado para a caixa de cisalhamento, entre as pedras porosas umedecidas e placas dentadas, ilustrado na Fotografia 5 indicado com a letra (A), para depois ser transferido para a cuba da caixa de cisalhamento no quadro de carga, conforme apresentado na mesma fotografia e indicado com a letra (B). Após conectados e ajustados os dispositivos de medições, aplicou-se o carregamento através de peso previamente definido de 5 kg, 10 kg e 20 kg, aplicando-se assim tensões normais de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, respectivamente, para cada molde. Nas Fotografias 6 (a) e 6 (b), ilustra-se as amostras com e sem reforço após a ruptura, respectivamente.

Fotografia 4. Solo no molde quadrado antes do ensaio de cisalhamento.



Fonte: Os autores (2024).

Fotografia 5. (A) Molde quadrado dentro da caixa de cisalhamento. (B) Cuba da caixa de cisalhamento no quadro de carga.



Fonte: Os autores (2024).

Fotografia 6. (a) corpo de prova de solo sem reforço após a ruptura no ensaio de cisalhamento direto com tensão normal de 100 kPa (b) corpo de prova de solo com reforço de 4% após a ruptura no ensaio de cisalhamento direto com tensão normal de 200 kPa.



(a)



(b)

Fonte: Os autores (2024).

Após os dados coletados no ensaio, foi possível obter as tensões máximas de cisalhamento de cada amostra para as respectivas tensões normais realizadas, assim como é mostrado na Tabela 2. Pode-se observar que para a amostra de solo com adição de 4% de fibra de bambu foi obtido o maior valor de tensão de cisalhamento no valor de 204,22 kPa.

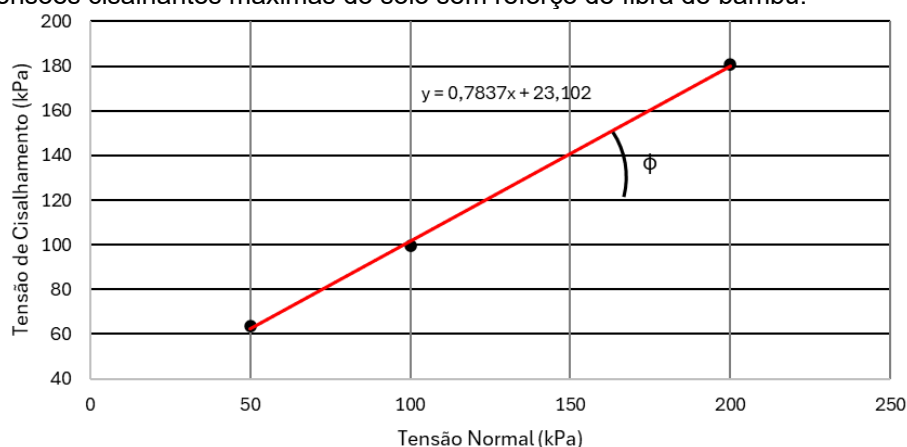
Tabela 2. Tensão normal (kPa) x Tensão máxima de cisalhamento (kPa).

Tensão normal aplicada	Tensão de cisalhamento máxima			
	Amostra sem fibra	Amostra com 2% de fibra	Amostra com 4% de fibra	Amostra com 5% de fibra
50 kPa	78,04	67,54	88,14	75,18
100 kPa	99,40	128,04	149,00	135,83
200 kPa	180,54	186,13	204,22	198,49

Fonte: Os autores (2024).

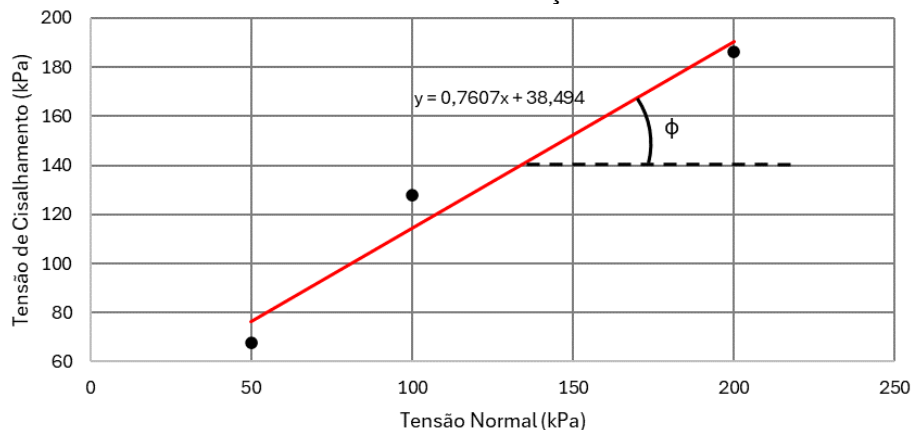
A partir dos valores das tensões máximas e tensões normais aplicadas nas amostras, foram construídos gráficos lineares para cada teor de fibra ensaiado como mostram Gráfico 7 a Gráfico 10, respectivamente para solo sem reforço em bambu, solo reforçado com 2% de fibra, solo reforçado com 4% de fibra e solo reforçado com 5% de fibra. Já o Gráfico 11 apresenta um comparativo entre diferentes superfícies de ruptura para as amostras em estudo. De acordo com Devi e Jempen (2016), os resultados de resistência ao cisalhamento dos solos reforçados com fibras aumentam até a adição de 4% de fibra ao solo, o que foi possível comprovar por meio dos ensaios de cisalhamento realizados.

Gráfico 7. Tensões cisalhantes máximas do solo sem reforço de fibra de bambu.



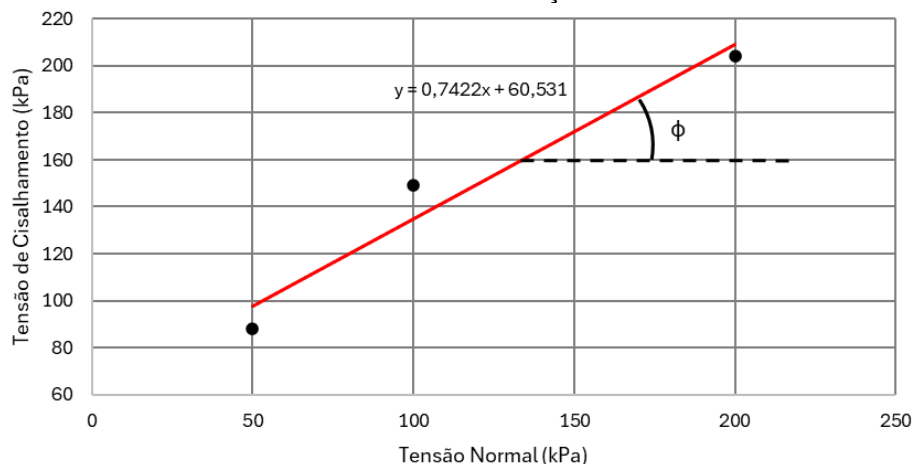
Fonte: Os autores (2024).

Gráfico 8. Tensões cisalhantes máximas do solo com reforço de 2% de fibra de bambu.



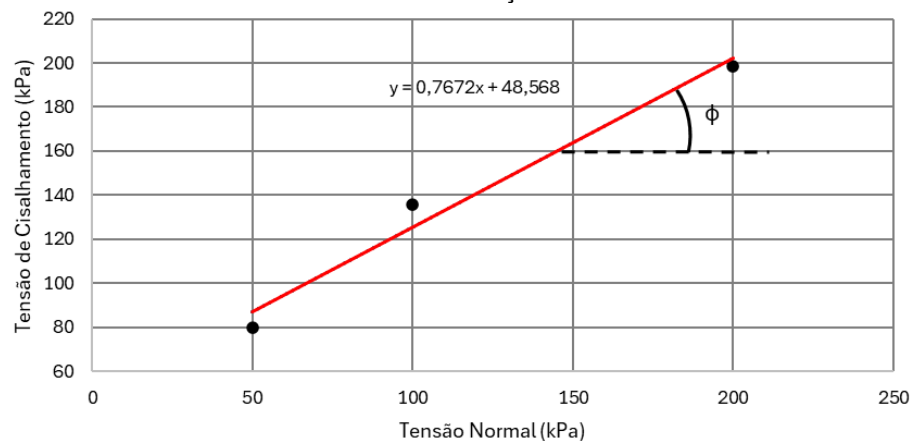
Fonte: Os autores (2024).

Gráfico 9. Tensões cisalhantes máximas do solo com reforço de 4% de fibra de bambu.



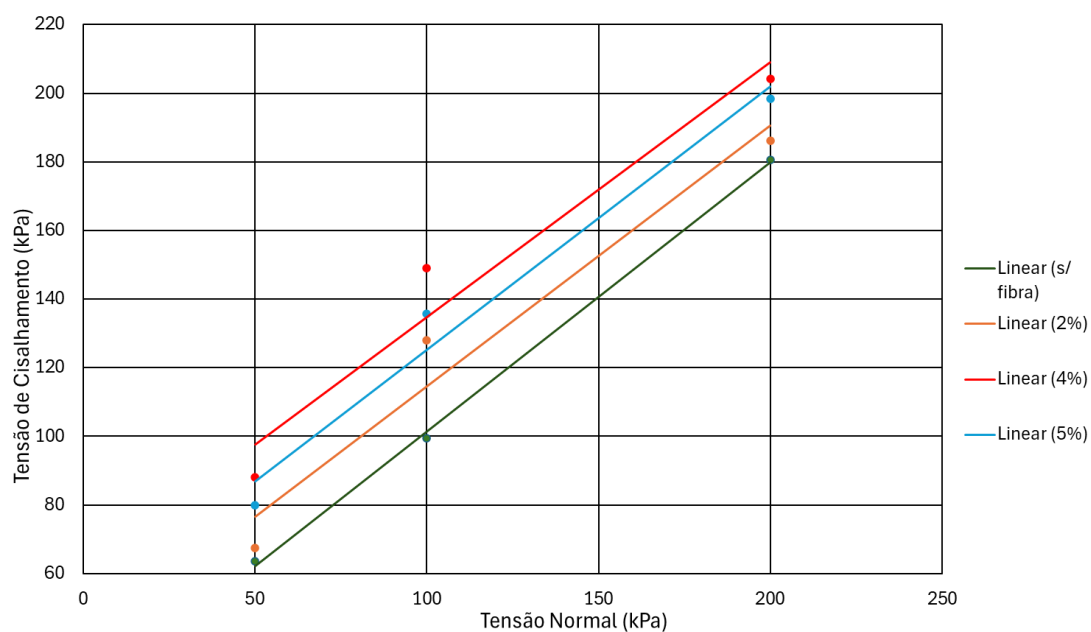
Fonte: Os autores (2024).

Gráfico 10. Tensões cisalhantes máximas do solo com reforço de 5% de fibra de bambu.



Fonte: Os autores (2024).

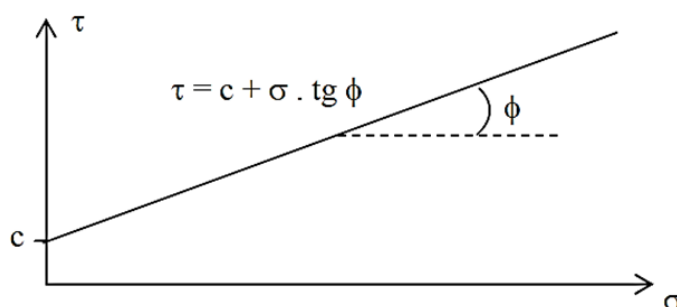
Gráfico 11. Comparativo entre as tensões cisalhantes máximas das amostras ensaiadas.



Fonte: Os autores (2024).

A partir dos gráficos foi possível obter o ângulo de atrito interno (ϕ) e a coesão (c) dos solos de cada amostra analisada. O ângulo de atrito interno representa a capacidade do solo de resistir ao cisalhamento devido ao atrito entre as partículas sólidas e foi calculado como a inclinação da linha de ajuste linear. A coesão refere-se à resistência ao cisalhamento que ocorre independentemente do atrito entre as partículas, representados na Figura 2.

Figura 2. Representação gráfica da resistência ao cisalhamento dos solos, onde: (τ) é a resistência ao cisalhamento do solo, (c) a coesão, (σ) a tensão normal vertical e (ϕ) o ângulo de atrito interno do solo.



Fonte: Massad (2010).

Com os dados obtidos a partir dos gráficos, pode-se apresentar os valores do ângulo de atrito (graus) e da coesão (kPa) das amostras ensaiadas na Tabela 3. Observa-se que com a adição de fibra de bambu, não houve alteração significativa no ângulo de atrito, entretanto, há expressivo crescimento no valor da coesão até o teor de 4% de adição com posterior queda para teor de 5% de fibra.

Tabela 3. Ângulo de atrito e coesão das amostras sem reforço e com diferentes teores de fibra.

Amostras	Ângulo de atrito (ϕ)	Coesão (kPa)
Sem bambu	38,09	23,10
2%	37,26	38,45
4%	36,58	60,53
5%	37,50	48,57

Fonte: Os autores (2024).

Para o ensaio de compressão não confinada foram ensaiados três corpos de prova para a amostra do solo sem reforço e três para o solo reforçado com 4% de fibra, cada um com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Para cada tipo de amostra, ao final do ensaio dos três corpos de prova, o Gráfico 11 e o Gráfico 12 foram elaborados. A Fotografia 7 apresenta o corpo de prova de solo com 4% de fibra de bambu no equipamento antes da realização do ensaio e o corpo de prova após a ruptura.

Fotografia 7. (a) corpo de prova de solo com reforço de 4% (b) corpo de prova de solo com reforço de 4% após a ruptura.



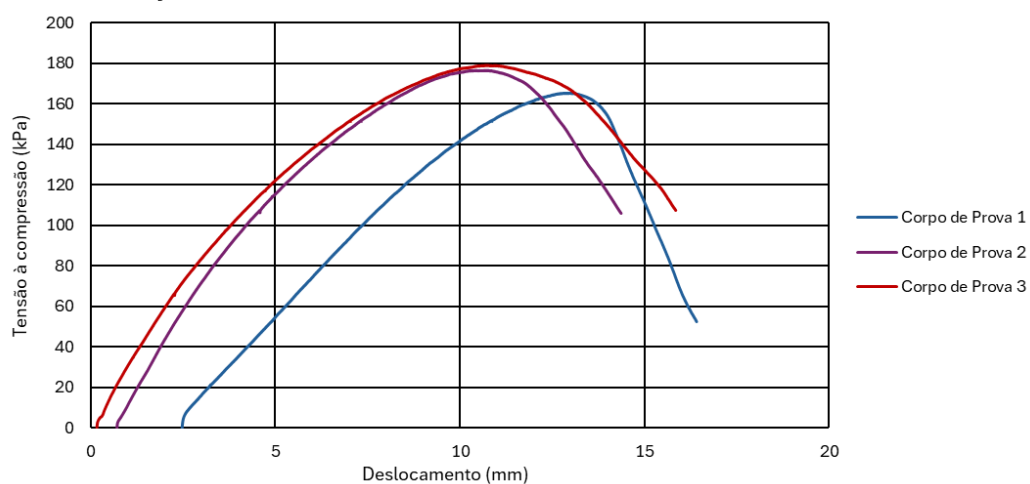
(a)



(b)

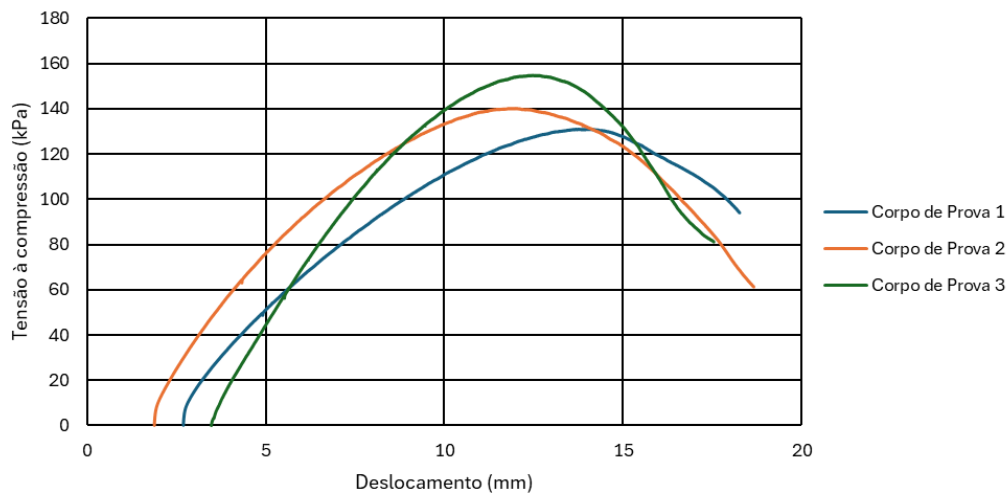
Fonte: Os autores (2024).

Gráfico 12. Comparativo entre as tensões resistentes à compressão máximas das 3 amostras ensaiadas sem reforço com fibra de bambu.



Fonte: Os autores (2024).

Gráfico 13. Comparativo entre as tensões resistentes à compressão máximas das 3 amostras ensaiadas com 4% de fibra de bambu.



Fonte: Os autores (2024).

Foram obtidos dados sobre a tensão de ruptura à compressão máxima de cada corpo de prova ensaiado e apresentados na Tabela 4. Ao analisar os resultados na tabela em questão, pode-se determinar os valores médios de 173,55 kPa e 141,98 kPa e de desvio padrão de 5,95 kPa e 9,78 kPa para amostras de solo sem e com adição de 4% de fibras de bambu, respectivamente. Desta forma, pode-se identificar uma redução de 18,19% na tensão de ruptura à compressão máxima entre os tipos de amostra considerados.

Tabela 4. Tensões à compressão máximas (kPa) do solo sem reforço e com 4% de fibra de bambu.

Amostras	Tensão de compressão máxima (kPa)	
	Amostra de solo sem bambu	Amostra de solo com 4% de fibra de bambu
Corpo de prova 1	165,26	131,00
Corpo de prova 2	176,43	140,18
Corpo de prova 3	178,95	154,75

Fonte: Os autores (2024).

Os resultados apresentados indicam que a amostra de solo com 4% de fibra de bambu distribuídas aleatoriamente apresentou menor tensão de ruptura à compressão simples, quando comparada com as tensões resultantes da compressão do solo sem adição de fibra de bambu. Ao observar a literatura, Kanawa (2018) chega à conclusão de que há um aumento na tensão de ruptura à compressão não confinada, entretanto, emprega valor de adição de fibra muito abaixo do que os considerados nesta pesquisa (valores entre 0,3% e 0,5% de adição).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento mostram que os parâmetros de resistência ao cisalhamento quando reforçado com fibras começam a aumentar até 4% de fibra para o comprimento das fibras de 20 milímetros que foram utilizados neste trabalho.

Quando comparados os valores de tensão cisalhante máxima de cada teor de fibra analisado, é possível concluir que o teor de 4% de fibra promoveu os resultados mais satisfatórios entre todos, com tensões cisalhantes máximas mais altas em relação aos outros teores, porém todos os teores de fibra apresentaram valores significativamente maiores que os valores do solo sem reforço, concluindo assim que o acréscimo de fibras de bambu distribuídas aleatoriamente no solo torna sua resistência ao cisalhamento maior quando proporcionada adequadamente.

Em contrapartida, quando foi realizado o ensaio de resistência à compressão sem confinamento, as fibras não demonstraram muita eficiência frente às tensões aplicadas,

apresentando resultados de menor resistência em comparação aos ensaios realizados com as amostras de solo sem reforço.

Ao idealizar a aplicação em reforço de subleito, a resistência a compressão é um parâmetro importante e ter essa redução neste parâmetro de resistência com a adição da fibra não viabiliza, neste momento, a aplicação deste tipo de reforço. Entretanto, destaca-se a ausência do confinamento nesta proposta de ensaio e que este material estará confinado durante o período de vida útil do pavimento. Sendo assim, recomenda-se para trabalhos futuros a realização de ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) em solos com e sem reforço com adição de fibras para compreender a aplicabilidade ou não deste reforço.

6. REFERÊNCIAS

ADIER, M. Fe V.; SEVILLA, M. E. P.; VALERIO, D. N. R.; ONGPENG, J. M. C. Bamboo as sustainable building materials: a systematic review of properties, treatment methods, and standards. **Buildings**, v. 13, n. 10, p. 2449, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Solos – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2024. p.7.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. p.10.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Determinação de limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. p.9.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502** - rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Solo - Determinação de limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. p.7.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. p.16

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. p.13.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12770**: Solo - Determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. p.8.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3080/D3080M**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. 2020.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.



DEVI, Dipika; JEMPEN, Boken. Shear strength behaviour of bamboo fiber reinforced soil. **Int. Res. J. Eng. Technol**, v. 3, n. 8, p. 433-437, 2016.

FIROOZI, Ali Akbar; OLGUN, C. Guney; FIROOZI, Ali Asghar; BAGHINI, Mojtaba Shojaei. Fundamentals of soil stabilization. **International Journal of Geo-Engineering**, [s.l.], v. 8, n. 1, p. 1-16, 2017.

HEJAZI, S. M.; SHEIKHZADEH, M.; ABTAHI, S. M.; ZADHOUSH, A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 100-116, 2012.

KANAWA, F. Strength characteristics of stabilized soils containing bamboo fiber extracted by steam explosion. **International Journal of Environmental and Rural Development**, v. 9, n. 1, p. 156-161, 2018.

KIRANPRIYAA, K.; RAMA, M. Comparison on the Behaviour of Bamboo and Polypropylene Fibre in Soil Stabilization. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)**, v. 11, n.6, p. 3442-3450, 2023.

MASSAD, Façal. **Mecânica dos solos experimental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

NOGUEIRA, J. S.; COSTA, F. H. da S.; VALE, P. A. A. do; LUIS, Z. G.; SCHERWINSKI-PEREIRA, J. E. Micropropagação de bambu em larga-escala: princípios estratégias e desafios. In: **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia**. Organização Patrícia Maria Drumond, Guilherme Wiedman. - 1. ed. - Rio de Janeiro: ICH, 2017.

TAKAIKAEW, T.; HOY, M.; HORPIBULSUK, S.; ARULRAJAH, A.; MOHAMMADINIA, A.; HORPIBULSUK, J. Performance improvement of asphalt concretes using fiber reinforcement. **Heliyon**, v. 7, n. 5, p. e07015, 2021.

VARGAS, Milton. **Introdução à mecânica dos solos**. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1977.

Contatos: rafaelaquina@hotmail.com e kamila.seko@mackenzie.br