



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

CHRISTIAN ARTHUR DE CARVALHO BEDÊ MAIA

**USO DE MODELO TEÓRICO PARA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE
RESISTÊNCIA DE SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO**

FORTALEZA

2024

CHRISTIAN ARTHUR DE CARVALHO BEDÊ MAIA

USO DE MODELO TEÓRICO PARA ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE
RESISTÊNCIA DE SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO

Trabalho de Conclusão de Curso referente ao curso de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M185u Maia, Christian Arthur de Carvalho Bedê.

Uso de modelo teórico para estimativa de parâmetros de resistência de solos reforçados com fibras de polipropileno / Christian Arthur de Carvalho Bedê Maia. – 2024.
53 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

1. Fibras de polipropileno. 2. Parâmetros de resistência. 3. Modelo de previsão. I. Título.

CDD 628

CHRISTIAN ARTHUR DE CARVALHO BEDÊ MAIA

USO DE MODELO TEÓRICO PARA ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE
RESISTÊNCIA DE SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO

Trabalho de Conclusão de Curso referente ao curso de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Aprovada em: 12/09/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Mariana Vella Silveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

M.sc. Deyvid de Sousa Elias
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda a minha família, em especial aos meus pais, Grace Neves e Wilson Maia, à minha tia Mônica Neves e à minha avó Maria Odete, por todos os valores transmitidos, por terem me proporcionado uma educação de excelência e, mais importante, por todo o amor e carinho.

Aos meus irmãos José, Danielle e Luana, por também terem me criado e amado como um de seus filhos.

À minha namorada, Rebeca, que tem compartilhado a vida comigo nos últimos doze anos e tem sido uma fonte inesgotável de amor, companheirismo e suporte. Agradeço por viver comigo os momentos de alegria e tristeza, por acreditar em mim e por me permitir o prazer de crescer ao seu lado.

Aos meus amigos de longa data, Yasmin, Paulo, Gabriela e Isabel, por todas as incríveis memórias compartilhadas desde a adolescência, as quais se perpetuarão por toda a minha vida. Obrigado por todos os conselhos e abraços nos momentos de dificuldade.

Aos amigos que fiz durante minha jornada na universidade, Andresa, Bruno, Meryellen e Stefany, por compartilharem comigo os desafios da graduação e por tornarem todo esse processo mais leve.

Ao professor Anderson, por todos os ensinamentos transmitidos ao longo do curso, por aceitar ser meu orientador e por fazê-lo com extrema competência, didática e compreensão.

Aos membros da banca examinadora, Dra. Mariana Vella Silveira e M.Sc. Deyvid de Sousa Elias, pelo tempo dedicado, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Todos vocês têm uma parcela significativa de importância neste momento, e serei eternamente grato a cada um.

RESUMO

A utilização de misturas de solo com fibras de polipropileno tem sido abordada por diversos estudos nos últimos anos. A inclusão de fibras ao solo tende a melhorar as propriedades geotécnicas do solo, principalmente a resistência ao cisalhamento. A melhoria nos parâmetros de resistência pode ser avaliada através de ensaios como o cisalhamento direto e o ensaio triaxial. Recentemente, modelos teóricos foram desenvolvidos para prever a envoltória de resistência de misturas solo-fibras, sem a necessidade da execução de ensaios de resistência no compósito. O objetivo desse trabalho é verificar a aplicação de um modelo teórico para prever os parâmetros de resistência de compósitos misturados com fibras de polipropileno, a partir da comparação dos resultados fornecidos pelos modelos com os resultados de ensaios de resistência obtidos em misturas de solo com fibras, com diferentes teores de fibra. Os resultados indicaram que o modelo teórico apresentou diferenças significativas em relação aos dados experimentais, com erro percentual médio de 41% para a coesão e 30% para o ângulo de atrito. Observou-se uma tendência do modelo em superestimar o ângulo de atrito. No caso da coesão, o modelo tendeu a subestimar os valores, para valores de tensões normais abaixo de 100 kPa, e superestimar a coesão, para tensões superiores a essa. A precisão do modelo foi melhor para estimativa de coesão, para relações entre o comprimento (L) e diâmetro da fibra (D) mais baixas, recomendando-se sua aplicação apenas para essas condições. Já para o ângulo de atrito, não foi possível verificar uma tendência com a relação L/D. Por fim, o modelo gerou valores crescentes dos parâmetros de resistência com o aumento do teor de fibras, comportamento que nem sempre foi confirmado pelos resultados experimentais, que sugerem a existência de um teor ótimo de fibras.

Palavras-chave: Fibras de polipropileno; Parâmetros de resistência; Modelo de previsão.

ABSTRACT

Several studies have addressed using soil mixtures with polypropylene fibers in recent years. Including fibers in the soil improves its geotechnical properties, especially its shear strength. The improvement in resistance parameters can be assessed through direct shear and triaxial tests. Recently, theoretical models have been developed to predict the strength envelope of soil-fiber mixtures without the need to perform strength tests on the composite. This work aims to verify the application of a theoretical model to predict the strength parameters of composites mixed with polypropylene fibers by comparing the results provided by the models with the results of strength tests obtained on soil-fiber mixtures with different fiber contents. The results indicated that the theoretical model showed significant differences from the experimental data, with an average percentage error of 41% for cohesion and 30% for friction angle. There was a tendency for the model to overestimate the friction angle. In the case of cohesion, the model tended to underestimate the values for normal stresses below 100 kPa and to overestimate cohesion for stresses above 100 kPa. The model's accuracy was better for estimating cohesion for lower ratios between length (L) and fiber diameter (D), and its application is recommended only for these conditions. As for the friction angle, verifying a trend with the L/D ratio wasn't possible. Finally, the model estimated increasing values for the strength parameters as the fiber content increased. The experimental results did not always confirm this behavior, suggesting there is an optimum fiber content.

Keywords: Polypropylene fibers; Strength parameters; Prediction model.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - FLUXOGRAMA.....	25
FIGURA 2 - COESÃO EXPERIMENTAL X PREVISTA.....	37
FIGURA 3 - ÂNGULO DE ATRITO EXPERIMENTAL X PREVISTO	37
FIGURA 4 - COESÃO X L/D PARA TEORES DE FIBRAS DE 0,1% (PRADHAN; KAR; NAIK, 2011)....	38
FIGURA 5 - COESÃO X L/D PARA TEORES DE FIBRAS DE 0,2% (PRADHAN; KAR; NAIK, 2011)....	39
FIGURA 6 - COESÃO X L/D PARA TEORES DE FIBRAS DE 0,3% (PRADHAN; KAR; NAIK, 2011)....	39
FIGURA 7 - COESÃO X L/D PARA TEORES DE FIBRAS DE 0,4% (PRADHAN; KAR; NAIK, 2011)....	39
FIGURA 8 - COESÃO X L/D PARA TEORES DE FIBRAS DE 0,5% (PRADHAN; KAR; NAIK, 2011)....	40
FIGURA 9 - COESÃO X % FIBRAS PARA L/D 75 (PRADHAN; KAR; NAIK, 2011).....	41
FIGURA 10 - COESÃO X % FIBRAS PARA L/D 100 (PRADHAN; KAR; NAIK, 2011).....	41
FIGURA 11 - COESÃO X % FIBRAS PARA L/D 125 (PRADHAN; KAR; NAIK, 2011).....	41
FIGURA 12 - ÂNGULO DE ATRITO X L/D PARA TEORES DE FIBRAS DE 0,1% (PRADHAN; KAR; NAIK, 2011).....	42
FIGURA 13 - ÂNGULO DE ATRITO X L/D PARA TEORES DE FIBRAS DE 0,2% (PRADHAN; KAR; NAIK, 2011).....	42
FIGURA 14 - ÂNGULO DE ATRITO X L/D PARA TEORES DE FIBRAS DE 0,3% (PRADHAN; KAR; NAIK, 2011).....	43
FIGURA 15 - ÂNGULO DE ATRITO X L/D PARA TEORES DE FIBRAS DE 0,4% (PRADHAN; KAR; NAIK, 2011).....	43
FIGURA 16 - ÂNGULO DE ATRITO X L/D PARA TEORES DE FIBRAS DE 0,5% (PRADHAN; KAR; NAIK, 2011).....	43
FIGURA 17 - ÂNGULO DE ATRITO X % DE FIBRAS PARA L/D 75 (PRADHAN; KAR; NAIK, 2011) ..	44
FIGURA 18 - ÂNGULO DE ATRITO X % DE FIBRAS PARA L/D 100 (PRADHAN; KAR; NAIK, 2011)	44
FIGURA 19 - ÂNGULO DE ATRITO X % DE FIBRAS PARA L/D 125 (PRADHAN; KAR; NAIK, 2011)	44
FIGURA 20 - COESÃO X L/D PARA TEORES DE FIBRAS DE 0,1% (JIANG; CAI; LIU, 2010).....	45
FIGURA 21 - COESÃO X L/D PARA TEORES DE FIBRAS DE 0,2% (JIANG; CAI; LIU, 2010).....	45
FIGURA 22 - COESÃO X L/D PARA TEORES DE FIBRAS DE 0,3% (JIANG; CAI; LIU, 2010).....	46
FIGURA 23 - COESÃO X L/D PARA TEORES DE FIBRAS DE 0,4% (JIANG; CAI; LIU, 2010).....	46
FIGURA 24 - COESÃO X % FIBRAS PARA L/D 192 (JIANG; CAI; LIU, 2010).....	47
FIGURA 25 - COESÃO X % FIBRAS PARA L/D 288 (JIANG; CAI; LIU, 2010).....	47
FIGURA 26 - COESÃO X % FIBRAS PARA L/D 384 (JIANG; CAI; LIU, 2010).....	47
FIGURA 27 - COESÃO X % FIBRAS PARA L/D 480 (JIANG; CAI; LIU, 2010).....	48
FIGURA 28 - ÂNGULO DE ATRITO X L/D PARA TEORES DE FIBRAS DE 0,1% (JIANG; CAI; LIU,	

2010).....	48
FIGURA 29 - ÂNGULO DE ATRITO X L/D PARA TEORES DE FIBRAS DE 0,2% (JIANG; CAI; LIU, 2010).....	49
FIGURA 30 - ÂNGULO DE ATRITO X L/D PARA TEORES DE FIBRAS DE 0,3% (JIANG; CAI; LIU, 2010).....	49
FIGURA 31 - ÂNGULO DE ATRITO X L/D PARA TEORES DE FIBRAS DE 0,4% (JIANG; CAI; LIU, 2010).....	49

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS DE ENTRADA	29
TABELA 2 - COESÃO PREVISTA X EXPERIMENTAL	33
TABELA 3 - COESÃO PREVISTA X EXPERIMENTAL (CONTINUA)	34
TABELA 4 - ÂNGULO DE ATRITO PREVISTO X EXPERIMENTAL	35
TABELA 5 - ÂNGULO DE ATRITO PREVISTO X EXPERIMENTAL (CONTINUA)	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PEAD	Polietileno de Alta Densidade
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos

LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma_{n,crit}$	Tensão normal crítica
$\sigma_{f,ult}$	Resistência à tração última
η	Razão entre comprimento e diâmetro da fibra
$c_{i,c}$	Razão entre adesão solo-fibra e coesão do solo
c	Coesão do solo
$c_{i,\varphi}$	Razão entre tangente do ângulo de atrito solo-fibra e a tangente do ângulo de atrito do solo
φ	Ângulo de atrito do solo
$S_{eq,p}$	Resistência ao cisalhamento equivalente
$c_{eq,p}$	Coesão equivalente
$(\tan \varphi)_{eq,p}$	Tangente do ângulo de atrito equivalente
σ_n	Tensão normal
α	Coefficiente empírico relacionado à orientação das fibras
χ	Teor volumétrico de fibras
γ_n	Peso específico natural
w	Teor de umidade
V	Volume total
m_{solo}	Massa do solo
g	Aceleração da gravidade
V_f	Volume de fibras

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	USO DE FIBRAS MISTURADAS AO SOLO	15
2.2	TIPOS DE FIBRA.....	17
2.2.1	Fibras de polipropileno	18
2.2.2	Fibras de polietileno	19
2.2.3	Fibras de poliéster	19
2.2.4	Fibras de poliamida (Kevlar)	20
2.3	FATORES DE FIBRA QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA DO COMPÓSITO	20
2.4	MODELOS TEÓRICOS PARA PREVISÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE MISTURAS SOLO-FIBRAS	23
3	METODOLOGIA	25
3.1	INTRODUÇÃO.....	25
3.2	COLETA DE DADOS.....	25
3.3	MÉTODO DE ZORNBERG (2002).....	26
3.4	DADOS DE ENTRADA.....	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1	APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ZORNBERG	30
4.2	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	33
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA EXPERIMENTAIS E PREVISTOS.....	37
5	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, a engenharia tem utilizado o solo como um dos principais materiais na construção de infraestruturas como cidades, estradas e edificações diversas. No entanto, devido às limitações tecnológicas e logísticas do passado, era comum utilizar o solo disponível localmente, priorizando a praticidade em detrimento das características ideais para cada aplicação específica.

Essa necessidade de adaptar o solo às exigências técnicas de cada projeto impulsionou o desenvolvimento de técnicas de melhoramento do solo, visando incorporar propriedades ausentes inicialmente. Exemplos históricos remontam desde o uso de lã de lhama como reforço em estradas incas até mantas de algodão utilizadas para reforçar camadas asfálticas em pavimentos nos Estados Unidos desde 1926, como destacado por Palmeira (1995).

No entanto, a degradação das fibras naturais levou à necessidade de explorar materiais sintéticos. Atualmente, as fibras poliméricas, impulsionadas pelo desenvolvimento da indústria do petróleo e a consequente produção de plásticos e polímeros, são amplamente empregadas. Quando essas fibras são combinadas com o solo, formam um compósito, conforme conceituado por Budinski (1996), que combina propriedades distintas de seus constituintes individuais, otimizando assim suas características mecânicas e de resistência.

A utilização de fibras para reforço de solo representa uma alternativa significativa para melhorar o comportamento mecânico do solo, especialmente sua capacidade de suporte e resistência ao cisalhamento. Portanto, é fundamental estudar profundamente as possibilidades de aplicação das fibras (tipos, comprimento, diâmetro e teor) em conjunto com as características do solo (textura, propriedades hidromecânicas, estrutura, composição) para alcançar os parâmetros ideais de resistência.

Na literatura especializada, há uma variedade de estudos dedicados a investigar a interação solo-fibra e quantificar as melhorias nos parâmetros do solo, como o intercepto coesivo e o ângulo de atrito interno. No entanto, realizar esses estudos em escala ampla pode ser exaustivo e dispendioso, pois requer a realização de inúmeros ensaios de resistência ao cisalhamento de mistura de solo com fibras. Portanto, a utilização de modelos teóricos precisos para prever os parâmetros de resistência, que dispensam a realização de ensaio de laboratório no compósito, torna-se crucial para otimizar esse processo.

Neste trabalho, será explorada a viabilidade da aplicação do método proposto por Zornberg (2002) como ferramenta de previsão para os parâmetros de coesão e ângulo de atrito equivalente das misturas solo-fibras. O método em questão destaca-se pela capacidade de realizar a caracterização independente do solo e das fibras, eliminando a necessidade de estudos conjuntos em laboratório. Esta abordagem simplificada não apenas reduz a complexidade dos experimentos, mas também permite uma avaliação dos comportamentos mecânicos dos materiais. Neste trabalho, serão investigados a viabilidade e a aplicabilidade deste modelo para estimar os parâmetros de coesão e ângulo de atrito equivalente em diversas combinações de solo e fibras, utilizando dados experimentais da literatura como base para comparação e validação dos resultados preditos pelo modelo.

1.1 OBJETIVO

Verificar a viabilidade de aplicação do modelo teórico de Zornberg (2002) para previsão dos parâmetros de resistência de compósitos de solo com fibras de polipropileno.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 USO DE FIBRAS MISTURADAS AO SOLO

O uso de fibras em solos consiste em inserir, de maneira aleatória, uma quantidade de fibras em uma matriz de solo, seguida de uma homogeneização, a fim de melhorar as propriedades geotécnicas do solo, como por exemplo, melhorando o comportamento mecânico. Embora seja uma técnica antiga, informações mais específicas sobre a utilização de fibras como reforço de solos em obras geotécnicas, a realização de estudos para a obtenção de parâmetros ótimos, para obter o melhor desempenho do compósito (solo + fibras), como ao teor (gravimétrico/volumétrico), comprimento e diâmetro das fibras, podem ser consideradas mais recentes e limitadas. Em razão disso, nos últimos trinta anos é possível observar um crescimento nos números de pesquisas relacionadas ao tema, uma vez que foi observado que a adição de fibras ao solo gera um aumento na resistência dos solos estudados.

Estes estudos buscam entender o comportamento da mistura solo-fibra, descobrir a proporção e orientação ideal dos componentes, bem como as melhores aplicações para cada tipo de fibra. Um ponto limitante para o uso da mistura solo-fibra é a dificuldade de se obter uma mistura homogênea e sem a predominância de uma orientação específica. Isto é relevante pois caso ocorra uma orientação predominante das fibras, o solo só estará assegurado para apenas uma parcela dos esforços impostos sobre ele, e dada a natureza incerta e não controlável dos cenários práticos em campo, o bom desempenho do solo reforçado estará diretamente interligado a um bom processo de homogeneização.

A inclusão de fibras no solo afeta enormemente o comportamento mecânico do solo e pode trazer benefícios ao potencializar certas aplicações. Como observado nos estudos de Feuerharmel (2000) a adição de fibras de polipropileno a uma argila caulinítica provocou uma mudança no comportamento mecânico do compósito durante a ruptura. Inicialmente o solo natural apresentava um caráter frágil e, por consequência, sem poder sofrer muitas deformações sem causar fissuras. Com a adição de fibras ao solo, este passou a apresentar um comportamento dúctil, o que conferiu ao solo maior absorção de energia e maior previsibilidade, além da propagação estável das fissuras.

Importante salientar que a adição de fibras no solo não impede a formação de fissuras, mas são capazes de controlar sua propagação, aumentando assim a resistência à tração (Taylor,

1994). Dessa forma, o intuito do uso de fibras como reforço não se baseia na simples exclusão das dinâmicas observadas no solo não reforçado, mas sim no controle e atenuação destas. Inclusive, sob este viés, Hannant (1994) defende que as fibras são responsáveis por manter as interfaces das fissuras unidas, beneficiando propriedades mecânicas no estado pós-fissuração, conferindo ductilidade para o compósito.

Melhoras no comportamento mecânico a partir da adição de fibras de polipropileno também foram observadas nos estudos de Casagrande (2001), onde um solo areno-siltoso reforçado e sob carregamento estático apresentou aumento da capacidade de suporte do solo e redução dos recalques quando comparado com o mesmo solo sem a presença das fibras. Posteriormente, ao investigar a possibilidade de uso de solo reforçado em *liners* de cobertura de aterros sanitários, Casagrande (2005) constatou que um solo arenoso misturado com bentonita foi fortemente influenciado pela inserção das fibras, observando novamente o aumento da capacidade de suporte, além de alterações nos mecanismos de ruptura.

Donato (2007) investigou um solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno e ao estudar a distribuição de tensões no solo concluiu, assim como Casagrande (2005), que a adição das fibras aumenta a capacidade de suporte e altera os mecanismos de ruptura do solo.

Festugato (2008) estudou uma areia fina reforçada também com fibras de polipropileno e constatou um aumento dos parâmetros de resistência. Enquanto os valores para ângulo de atrito não sofreram alterações significativas, houve aumento considerável do intercepto coesivo da mistura.

Girardello (2010) estudou a influência de fibras de polipropileno aplicadas a uma areia não saturada. Seus resultados indicaram a diminuição do ângulo de atrito, podendo ser explicado pelo surgimento de um intercepto coesivo, conferindo maior capacidade de suporte ao solo. Além disso, constatou-se uma melhora no comportamento carga-recalque, alterando os mecanismos de ruptura.

Carvalho (2019) analisou a possibilidade de utilização de fibras naturais de sisal, curauá e coco como reforço de solos arenosos, obtendo resultados satisfatórios para tal ao melhorar os parâmetros de resistência em até 50% quando comparado com o solo natural.

2.2 TIPOS DE FIBRA

As fibras podem estar classificadas dentro de 4 grupos (naturais, minerais, metálicas e poliméricas), cada tipo com suas características específicas e respectivos usos recomendados para o solo que se utilizará na composição da mistura.

As primeiras fibras a serem utilizadas na história foram as fibras naturais, justamente por uma questão de limitação tecnológica e disponibilidade de recursos na antiguidade. Em uma época anterior a industrialização, as fibras naturais, especialmente de origem vegetal, eram utilizadas, como por exemplo, pelos babilônios que utilizavam esteiras de cana como elemento de reforço na construção de templos religiosos (Silva, 2009) ou na aplicação de camadas intercaladas de solo e mantas de raízes para construção de muralhas na Mesopotâmia (Casagrande, 2001). A aplicação de fibras de origem animal também foi observada na construção da Grande Muralha da China e em estradas construídas pelos incas a partir do uso de lã de lhama, conforme mencionado por Palmeira (1995).

O uso de fibras vegetais como reforço de solo ainda pode contemplar fibras de bambu, juta, capim elefante, coco, sisal, malva, piaçava e linho (Hannant, 1994). Ainda segundo Hannant (1994), algumas destas fibras podem atingir grandes resistências, como as fibras de bambu, que apresentam valores de resistência superiores à 100 MPa. Um dos pontos negativos atrelados ao uso de fibras naturais diz respeito a sua durabilidade, uma vez que a ação de fungos e microrganismos presentes no solo podem degradar as fibras, diminuindo a sua resistência com o tempo.

Dentre as fibras minerais, as fibras de carbono são um destaque devido sua leveza e resistência nas ligações químicas entre carbonos, além de resistência a tração de aproximadamente 2400 GPa. De diâmetro da ordem de 1 μm , as fibras de amianto apresentam boa aderência quando aplicadas em matriz cimentada e marcam valores de resistência à tração na casa de 1000 MPa (Taylor, 1994). No entanto, o uso do amianto na indústria é banido no Brasil e em muitos outros países devido ao potencial carcinogênico reconhecido para seres humanos (Castro; Giannasi; Novello, 2003).

As fibras de aço são as mais empregadas do grupo de fibras metálicas, geralmente apresentando valores de resistência à tração na faixa de 1100 MPa. Na prática, são utilizadas em uma grande variedade de formatos e tamanhos visando aumentar a aderência na matriz (Hannant, 1994). Justamente pela sua natureza metálica, podem apresentar problemas de

corrosão, enfatizando a relevância do conhecimento das propriedades das fibras para escolher adequadamente qual usar mediante as condições de campo.

Com enfoque especial para uso em solos, pode-se citar as fibras poliméricas, pois este tipo de fibra é objeto de muitos estudos de reforços de solos. As fibras poliméricas surgiram com desenvolvimento da indústria química que permitiu a obtenção de uma fibra com estrutura química que apresentasse características desejadas para diferentes aplicações. Por conta disso, é possível gerar uma fibra não degradável, não prejudicial à saúde humana, quimicamente neutra e com parâmetros físicos e químicos desejados. Com diferentes materiais e comportamentos, os tipos de polímeros de maior uso são: fibras de polipropileno, fibras de polietileno, fibras de poliéster e fibras de poliamida (Kevlar). A seguir serão apresentadas algumas das características de cada tipo de fibra.

2.2.1 Fibras de polipropileno

As fibras de polipropileno são amplamente reconhecidas pela sua versatilidade como polímero termoplástico, sendo utilizadas em diversos setores industriais, desde a produção de recipientes e peças automotivas até materiais de escritório e, notavelmente, na fabricação de fibras (Castro, 2020). Entre as principais características das fibras de polipropileno estão a elevada resistência a ataques químicos e biológicos, baixa absorção de umidade e alta durabilidade quando expostas à radiação solar (Araújo, 2011). Tais propriedades derivam de sua estrutura molecular, composta por longas cadeias polimerizadas que permitem deslizamento entre si, característica típica dos termoplásticos que adquirem uma consistência maleável com o aumento da temperatura (Hollaway, 1994).

Graças a essa estrutura, as fibras de polipropileno são altamente flexíveis e tenazes, com uma resistência à tração de aproximadamente 400 MPa. Além disso, essas fibras possuem uma excelente resistência a uma variedade de substâncias químicas e a álcalis (Taylor, 1994). Essas propriedades conferem aos materiais reforçados com fibras de polipropileno uma robusta resistência ao impacto (Taylor, 1994).

2.2.2 Fibras de polietileno

As fibras de polietileno são caracterizadas por um baixo módulo de elasticidade e uma fraca aderência à matriz cimentada, além de uma alta resistência a álcalis. Apesar de sua alta durabilidade, elas exibem maiores deformações de fluência em comparação com as fibras de polipropileno. Esse comportamento de fluência implica que, quando submetidas a tensões altas e permanentes em compósitos fissurados, as fibras de polietileno podem experimentar consideráveis alongamentos e deflexões ao longo do tempo (Casagrande, 2001; Hannant, 1994). Atualmente, o polietileno de alta densidades (PEAD) surge como uma alternativa para mitigar esses problemas de baixa aderência e módulo de elasticidade. Este material visa aumentar a rigidez e a adesão das fibras com a matriz do solo, proporcionando um desempenho mecânico superior. Comercialmente, as fibras de polietileno estão disponíveis na forma de monofilamentos picados ou malhas contínuas, oferecendo versatilidade para diferentes aplicações (Castro, 2020; Vendruscolo, 2003).

2.2.3 Fibras de poliéster

As fibras produzidas com poliéster destacam-se por sua alta tenacidade, elevado módulo de elasticidade e baixa capacidade de absorção de água (Araújo, 2011). Este material também é conhecido por sua alta densidade, rigidez e resistência, características que são transferidas para as fibras derivadas dele (Taylor, 1994).

Embora as fibras de poliéster apresentem semelhanças com as fibras de polipropileno em termos de aparência e aplicação, estas proporcionam custos mais elevados envolvidos em seu uso (Taylor, 1994). Dessa forma, deve ser esperado um desempenho aprimorado, no que diz respeito a resistência do compósito, que justifique os custos adicionais.

2.2.4 Fibras de poliamida (Kevlar)

As fibras de poliamida apresentam uma alta organização molecular das fibras, se manifestando no alinhamento longitudinal do eixo da fibra (Kuasne, 2008), além de possuírem notável resistência a temperaturas elevadas e cargas intensas. Devido a essas propriedades, elas são amplamente utilizadas em aplicações que exigem alta resistência térmica (Castro, 2020). Dentro desse grupo, destacam-se as para-aramidas, como o Kevlar, que apresenta resistência à tração elevada, além de uma deformação mínima até a ruptura. Essas características fazem do Kevlar uma escolha ideal para aplicações que necessitam de grande absorção de energia, como em sistemas de blindagem e reforço de materiais compósitos (Araújo, 2011).

As fibras de poliamida possuem polímeros com longas cadeias moleculares e geralmente apresentam baixa resistência e rigidez devido à sua estrutura espiralada e dobrada. No entanto, quando essas moléculas são esticadas e reforçadas durante a produção, alcançam altos níveis de resistência e módulos de elasticidade (Taylor, 1994). Existem duas variantes principais do Kevlar: o Kevlar 29 e o Kevlar 49, que possuem a mesma resistência mecânica, da ordem de 3000 MPa (Hollaway, 1994).

2.3 FATORES DE FIBRA QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA DO COMPÓSITO

Mediante os estudos citados até aqui, fica evidente que a adição de fibras ao solo de fato atua como reforço, alterando o comportamento mecânico do compósito e aumentando sua resistência. Em meio às imensas combinações de fatores relacionado ao solo e às fibras, faz-se necessário abordar os fatores específicos das fibras, que podem influenciar no desempenho da mistura solo-fibra, como por exemplo o teor gravimétrico ou volumétrico, o comprimento (L) e o diâmetro (D) das fibras, assim como a relação entre estes dois últimos parâmetros (L/D). Para fundamentar tal abordagem, serão utilizados resultados apresentados na literatura de ensaios triaxiais e de cisalhamento direto realizados para diversos solos reforçados exclusivamente com fibras de polipropileno.

Teodoro (1999) realizou experimentos em dois tipos de solo: um arenoso e outro argiloso. O autor fez uso de fibras de comprimento de 5, 10, 20, 30 e 50 mm e teores de 0,1,

0,2, 0,4, 1,0 e 2,0 %. O solo arenoso reforçado apresentou aumento na resistência conforme o aumento do teor e do comprimento das fibras. Já para o solo argiloso, o aumento da resistência também se deu com o aumento do teor de fibras, mas até o comprimento de 10 mm, exibindo queda de resistência para comprimentos acima de 10 mm.

No solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno, com comprimento de 6 mm, Castro (2020) analisou a influência de fibras aplicadas na resistência do compósito para cinco teores diferentes, de 0,25 até 1,25%, com incremento fixo de 0,25%. Ao analisar as curvas tensão-deformação para a condição saturada, Castro (2020) observou que corpos de prova reforçados com um teor de fibras de 0,75 e 1,25 %, quando comparadas com corpos de prova de solo sem reforço e com teor de fibras de 0,25 %, apresentaram valores de tensão de desvio mais elevados, como também não apresentaram a formação de picos ou tendência de atingir um valor máximo, possivelmente indicando que as amostras não atingiram o estado de ruptura para a deformação máxima aplicada de 10%. No entanto, o acréscimo de resistência não foi proporcional ao aumento do teor, pois os resultados para 0,25 % não representaram ganhos significativos de resistência do compósito. Adicionalmente, ao analisar os valores de intercepto coesivo para as amostras reforçadas, apenas para os teores de fibra de 0,75 e 1,25 % houve um aumento mais significativo da coesão em relação ao solo. Já no que diz respeito ao ângulo de atrito, as amostras 0,25 e 0,75 % apresentaram valores menores que o solo natural e a amostra 1,25 % foi a única que registrou aumento para esse parâmetro.

Ensaio realizados por Pradhan, Kar e Naik (2011), com diferentes combinações de teores (0,1 até 0,5%, com incremento de 0,1%) e comprimentos de fibras (15, 20 e 25 mm) apresentaram aumento na coesão e no ângulo de atrito quando comparado com o solo sem reforço. De acordo com os autores, a resistência de cisalhamento aumenta em conjunto com a inclusão de fibras até o teor de 0,4% de fibras, para os três comprimentos de fibra considerados no estudo. Ao focalizar as variações do ângulo de atrito interno e coesão de acordo com a variação do teor de fibras, também se observou o aumento destes parâmetros até um teor de fibras 0,4%, a partir do qual os mesmos tendem a diminuir ou de permanecer praticamente inalterados. Ao analisar apenas a variação do comprimento das fibras, o comportamento mais observado é que os maiores valores de coesão foram observados no comprimento de fibra de 20 mm. Já para o ângulo de atrito não foi possível definir um padrão comum das fibras, uma vez que o comportamento é alterado conforme se fixa um teor de fibras diferente.

Nos estudos de Yazici e Keskin (2023), a tensão de desvio apresentou aumentos para todas as quatro porcentagens de fibras utilizadas (0,05; 0,1; 0,15 e 0,2). Para as fibras de 6 e 12 mm, o teor de 0,15 % apresentou tensão de desvio mais elevada, ocorrendo uma queda para o teor de fibras 0,20 %. Nas fibras de 19 mm, o crescimento deste parâmetro foi contínuo. No que diz respeito aos parâmetros de resistência ao cisalhamento, todas as amostras com 0,05 % de fibra apresentaram queda na coesão quando comparadas ao solo natural. Os valores de coesão para as fibras de 6 e 12 mm aumentaram no intervalo de 0,05 até 0,15 %, ocorrendo queda posteriormente e nas fibras de 19 mm a coesão cresceu de maneira contínua no intervalo de 0,05 até 0,2%. De maneira semelhante à tensão de desvio, os valores de ângulo de atrito nas fibras de 6 e 12 mm cresceram até 0,15 %, enquanto nas fibras de 19 mm este parâmetro cresceu continuamente.

Zaimoglu e Yetimoglu (2011) realizaram ensaios triaxiais para um solo siltoso reforçado com fibras de polipropileno para quatro diferentes teores de fibras (0,25; 0,5; 0,75 e 1,0). Neste estudo, não foi possível avaliar a influência apenas do comprimento ou do diâmetro na resistência do compósito, visto que utilizaram somente um comprimento de fibras, de 0,05 mm. Os resultados dos ensaios triaxiais indicaram que a variação do teor de fibras afeta mais significativamente o valor da coesão do compósito. Para os diferentes teores de fibras, os resultados dos ensaios triaxiais indicaram oscilações (aumentos e decréscimos) nos parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito, sem a tendência de obtenção de um máximo ou de crescimento contínuo com o teor de fibras.

Jiang, Cai e Liu (2010) realizaram uma série de ensaios triaxiais para um solo argiloso reforçado também com fibras de polipropileno, variando 4 comprimentos de fibra (10, 15, 20 e 25 mm) e teores de fibra (de 0,1 até 0,4 %). Foram realizados 3 ensaios para cada combinação e então calculada a média e respectivo desvio padrão dos parâmetros obtidos. Foi observado um acréscimo tanto na coesão como no ângulo de atrito interno do solo reforçado quando comparado com o solo em seu estado natural. Em relação ao teor de fibras, coesão e ângulo de atrito seguiram a tendência de aumento até atingir 0,3 %, a partir do qual registrou decréscimo. Analisando as respostas do compósito conforme a variação do comprimento das fibras, é possível notar que coesão e ângulo de atrito atingem o máximo patamar para as fibras de 15 mm e caem drasticamente para os demais comprimentos.

Diante dos resultados expostos para os diversos estudos encontrados na literatura, não é possível identificar um comportamento em comum para a resposta dos compósitos mediante alterações de teor e comprimento das fibras. Embora tenham sido utilizadas apenas fibras poliméricas de polipropileno nestes ensaios, outras variáveis diferem de um estudo para outro,

como o tipo de solo, comprimento e os teores de fibras. No entanto, o que se nota é que os acréscimos nos parâmetros de resistência não são contínuos, o que implica dizer que para atingir os valores máximos destes não serão necessariamente aplicados os maiores teores e comprimentos de fibras disponíveis, o que é evidenciado para os resultados obtidos por Jiang, Cai e Liu (2010). Adicionalmente, mesmo em casos em que foi observado o crescimento contínuo dos parâmetros, como para as fibras de 19 mm de Yazici e Keskin (2023), o crescimento em si não foi constante, tornando a previsão acurada destes parâmetros ainda mais complexa.

2.4 MODELOS TEÓRICOS PARA PREVISÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE MISTURAS SOLO-FIBRAS

A utilização de modelos teóricos para prever parâmetros de resistência de misturas de solo e fibra faz-se útil pois dispensa a realização de ensaios de laboratório para medir o desempenho do reforço aplicado ao compósito, bastando apenas ter o conhecimento de alguns parâmetros relacionados à fibra e ao solo utilizado, de maneira isolada. Portanto, fazer uso de um modelo acurado na previsão dos parâmetros de resistência é fundamental para otimizar um processo naturalmente vagaroso e custoso, uma vez que necessita de uma infraestrutura adequada para os ensaios, bem como realizar uma grande quantidade de testes buscando avaliar as diversas combinações de teores, comprimento e tipo de fibra.

Zornberg (2002) elaborou uma abordagem que avalia separadamente as contribuições de solo e fibra, visando justamente eliminar a necessidade de teste do compósito, fator que vinha desencorajando a aplicação de fibras como reforço de solos na engenharia. A partir deste método, é possível determinar os parâmetros referentes à mistura, como a resistência equivalente, a coesão equivalente e o ângulo de atrito equivalente. Para esse cálculo, faz-se necessário o conhecimento dos parâmetros isolados de solo (coesão, ângulo de atrito, umidade e peso específico) e da fibra (resistência à tração última, razão L/D, teor volumétrico e peso específico).

Outro modelo que pode prever o comportamento mecânico de uma mistura solo-fibra é o de Michalowski e Zhao (1996), apresentado por Palmeira (2018). Para esse método, no entanto, são postas algumas limitações de aplicação. Os autores especificam que o uso é restrito para solos arenosos, com comprimento das fibras superior a pelo menos uma ordem de

magnitude que o diâmetro médio dos grãos de areia e que a espessura das fibras seja no mínimo da mesma ordem de magnitude do diâmetro médio dos grãos da areia. Embora necessite de alguns parâmetros de entrada em comum com o método de Zornberg (2002), o método de Michalowski e Zhao (1996) também requer a tensão de escoamento da fibra, além de ter um processo de cálculo mais complexo para obtenção da envoltória de resistência do solo reforçado.

3 METODOLOGIA

3.1 INTRODUÇÃO

A metodologia consistiu na utilização de dados de entrada de solos e de fibras de polipropileno, de maneira independente, para a aplicação no modelo de Zornberg (2002) e posterior comparação dos resultados de ensaios de resistência ao cisalhamento realizados em compósitos de solo-fibras com os dados de saída fornecidos pelo modelo. A Figura 1 mostra um fluxograma simplificado da metodologia.

Figura 1 - Fluxograma



Fonte: Autor (2024)

3.2 COLETA DE DADOS

Da literatura, foram selecionados diversos trabalhos com dados de ensaios de resistência (triaxiais e de cisalhamento direto) de solo-fibra realizados por diferentes autores, juntamente com dados individuais do solo e da fibra. Como critério de seleção dos ensaios, foi definido que seriam utilizados aqueles que fizessem uso de apenas um tipo de reforço no solo, a fibra de polipropileno. Com isso, deseja-se avaliar a viabilidade do uso de um método para previsão dos parâmetros de resistência do compósito sem a necessidade de realização de ensaios de resistência ao cisalhamento utilizando o compósito.

Dos ensaios analisados, foram retiradas as informações referentes às fibras (teor gravimétrico, comprimento, diâmetro, resistência à tração última e peso específico), do solo (coesão, ângulo de atrito, peso específico, umidade e tipo de solo) e do compósito, como a coesão e ângulo de atrito equivalentes da mistura solo fibra, para fins de comparação. A seguir será apresentada a teoria desenvolvida por Zornberg (2002) para estimar parâmetros de resistência de misturas de solo-fibra.

3.3 MÉTODO DE ZORNBERG (2002)

A abordagem proposta pelo autor foi escolhida como método para previsão dos parâmetros de resistência do solo reforçado por ser mais simplificada, quando comparada com outras abordagens, como por exemplo a da proposta de Michalowski e Zhao (1996), no que diz respeito aos parâmetros de entrada e ao procedimento de cálculo geral. Além disso, o método de Zornberg (2002) não possui tantas limitações quanto à sua aplicabilidade.

Inicialmente, é preciso compreender que o autor define que a contribuição das fibras é manifestada como uma tensão adicional que aumenta a resistência ao cisalhamento ao longo do plano de cisalhamento e que a intensidade dessa tensão é influenciada pelo tipo de ruptura. O tipo de ruptura será determinado a partir do valor da tensão normal crítica, definida por Zornberg (2002) como:

$$\sigma_{n,crit} = \frac{\sigma_{f,ult} - \eta \times c_{i,c} \times c}{\eta \times c_{i,\varphi} \times \tan \varphi} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde $\sigma_{n,crit}$ é a tensão normal crítica; $\sigma_{f,ult}$, a resistência a tração última da fibra; η , a razão entre comprimento e diâmetro da fibra (L/D); $c_{i,c}$, a razão entre a adesão solo-fibra e coesão do solo; c , a coesão do solo; $c_{i,\varphi}$, a razão entre tangente do ângulo de atrito solo-fibra e tangente do ângulo de atrito do solo; e φ , o ângulo de atrito do solo.

Quando os valores de tensões normais observadas nos ensaios forem superiores a tensão normal crítica, a ruptura se dará por tração das fibras; já para valores inferiores a tensão crítica, a ruptura será por arrancamento ou ancoragem, quando ocorre a tendência de deslizamento das fibras no compósito. Para os valores mais comuns de resistência à tração das fibras observados no mercado, o valor da tensão normal crítica tende a ser muito superior aos valores encontrados

para as condições de campo, favorecendo então o processo de ruptura por ancoragem (Zornberg, 2002).

Para cada tipo de ruptura haverá um respectivo equacionamento que permite encontrar a função que determina as envoltórias de ruptura e os parâmetros de resistência equivalentes da mistura solo-fibra. No caso de ruptura por ancoragem, a resistência ao cisalhamento equivalente da mistura é dada por:

$$S_{eq,p} = c_{eq,p} + (\tan \varphi)_{eq,p} \times \sigma_n \quad (\text{Eq. 2})$$

em que $c_{eq,p}$ se refere à coesão equivalente da mistura; $(\tan \varphi)_{eq,p}$, a tangente do ângulo de atrito equivalente da mistura e σ_n a tensão normal no plano de cisalhamento.

Por sua vez, os parâmetros equivalentes da mistura podem ser encontrados a partir das seguintes equações:

$$c_{eq,p} = (1 + \alpha \times \eta \times \chi \times c_{i,c}) \times c \quad (\text{Eq. 3})$$

$$(\tan \varphi)_{eq,p} = (1 + \alpha \times \eta \times \chi \times c_{i,\varphi}) \times \tan \varphi \quad (\text{Eq. 4})$$

onde α é o coeficiente empírico relacionado a orientação das fibras e χ é o teor volumétrico de fibras no compósito.

Corroborando com o que foi citado anteriormente sobre a relação entre tensão normal crítica e as tensões usuais observadas, foi constatado para os ensaios selecionados da literatura que de fato a ruptura por ancoragem foi predominante, como Castro (2020), Pradhan, Kar e Naik (2011), Yazici e Keskin (2023), Silveira *et al* (2021), Zaimoglu e Yetimoglu (2011), Plé e Lê (2011), entre outros. Dessa forma, o processo de cálculo consistiu na aplicação das equações, utilizando os dados do solo e da fibra apresentados pelos trabalhos consultados.

3.4 DADOS DE ENTRADA

A partir das equações 2, 3 e 4, utilizando os parâmetros da fibra e do solo identificados a partir dos ensaios triaxiais e cisalhamento direto e com o auxílio do software Excel, foram então calculados a coesão e o ângulo de atrito referentes a mistura solo-fibra. A seguir, está apresentada a Tabela 1 com os parâmetros de entrada dos solos e das fibras, respectivamente, utilizados de cada estudo.

Tabela 1 - Parâmetros de entrada

Teor gravimétrico (%)	Teor volumétrico (%)	Comprimento (m)	Relação L/D	$c_{i,c}$	$c_{i,\phi}$	Umidade (%)	Coesão do solo (kPa)	Ângulo de atrito do solo (°)	Peso específico do solo (kN/m ³)	Estudo
0,1 a 0,5	0,2 a 1	0,015 - 0,02 - 0,025	75-100-125	0,80	0,90	11,00	45	26	17,66	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,25	0,5	0,02	127,92	0,40	0,70	31,40	35,09	31,26	14,06	Trindade et al (2006)
0,5	1,1	0,024	1043,48	0,60	0,70	16,20	9,71	31,93	17,4	Casagrande (2001)
0,25 a 1	0,5 a 2	0,012	240,00	0,30	0,80	22,00	56	35	15,4	Zaimoglu e Yetimoglu (2011)
0,25 - 0,75 - 1,25	0,6 - 2 - 2,5	0,006	333,33	0,10	0,70	9,60	20	37,4	19,09	Castro (2020)
0,05 a 0,2	0,1 a 0,4	0,06 - 0,012 - 0,19	333-666-1055	0,80	0,90	15,00	133	14,6	16,9	Yazici e Keskin (2023)
0,6	1,4	0,012	352,94	0,60	0,80	16,00	105	7,3	17,6	Plé e Lê (2011)
0,25	0,5	0,012	352,94	0,20	0,80	15,80	90	19,1	15,8	Cai et al (2006)
0,1 a 0,4	0,2 a 0,8	0,01 - 0,015 - 0,02 - 0,025	192-288-384-480	0,50	0,80	15,70	60,67	25,3	16,7	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,1 - 0,25	0,2 - 0,5	0,018	1000,00	0,00	0,70	24,00	0	27,8	16,7	Silveira et al (2021)
0,1 - 0,25	0,2 - 0,6	0,018	1000,00	0,50	0,80	10,60	69,2	26,1	19,5	Silveira et al (2021)

Fonte: Elaborada pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos pela aplicação do método de Zornberg (2002), as comparações destes resultados e respectivas análises de dados experimentais, além de um exemplo de cálculo utilizado para obtenção dos parâmetros de resistência equivalente da mistura solo-fibra.

4.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ZORNBERG

Neste item será apresentado o passo a passo do procedimento de cálculo para a obtenção dos parâmetros de resistência equivalentes ao compósito, segundo o método de Zornberg (2002). Para tal, serão utilizados os dados de entrada de um dos ensaios de Pradhan, Kar e Naik (2011), com teor gravimétrico de fibras de 0,1%, com resistência à tração última da fibra de 120.000 kPa, relação L/D de 75 e comprimento da fibra de 0,015 m. Com relação ao solo “puro”, classificado como CL, de acordo com o SUCS, o ensaio de resistência indicou um intercepto coesivo de 45 kPa e um ângulo de atrito de 26°.

Inicialmente, é preciso definir que tipo de ruptura deve ocorrer para o ensaio em questão. Da Eq.1, têm-se:

$$\sigma_{n,crit} = \frac{\sigma_{f,ult} - \eta \times c_{i,c} \times c}{\eta \times c_{i,\varphi} \times \tan \varphi}$$

A razão entre tangentes de ângulo de atrito e coesão de solo-fibra e solo foram estimadas a partir dos estudos de Tupa & Palmeira (2005), Goodhue e Beson (2001), Abu-Farsakh, Coronel, Tao (2007), variando de acordo com o tipo de solo, como pode ser observada no Quadro 1.

Tipo de solo	$c_{i,c}$	$c_{i,\phi}$
areia	0,0	0,7 - 1,0
areia siltosa	0,1 - 0,4	0,7 - 0,9
areia argilosa	0,1 - 0,4	0,7 - 0,9
silte areno-argiloso	0,2 - 0,5	0,8 - 0,9
argila siltosa, arenosa	0,5 - 0,8	0,8 - 1,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto,

$$\sigma_{n,crit} = \frac{120000 \text{ kPa} - 75 \times 0,8 \times 45 \text{ kPa}}{75 \times 0,9 \times \tan 26^\circ} = 3562,97 \text{ kPa}$$

Para o ensaio de cisalhamento direto realizado por Pradhan, Kar e Naik (2011), a tensão normal no plano de ruptura equivale a tensão normal aplicada no ensaio, que teve valor máximo de 300 kPa.

Dessa forma, é possível afirmar que a tensão normal no plano de cisalhamento é inferior à tensão normal crítica $\sigma_n < \sigma_{n,crit}$, e como consequência, a ruptura se dará por arrancamento. Portanto, a coesão e o ângulo de atrito equivalente da mistura poderão ser calculados a partir das Eq. 3 e 4 respectivamente, que constam na página 27. Antes disso, é preciso fazer algumas considerações para que seja possível encontrar o valor do teor volumétrico das fibras.

Assumindo uma massa total de solo-fibra de 1000 Kg, tem-se 1000 Kg de solo para cada 1 Kg de fibra, se considerado o teor gravimétrico de fibra de 0,1%. Para $\gamma_{solo \text{ aparente seco}} = 17,66 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_{fibra} = 9,1 \text{ kN/m}^3$ e teor de umidade de 11%, o peso específico natural do solo pode ser encontrado pela Eq.6:

$$\gamma_n = \gamma_{solo \text{ aparente seco}} \times (1 + w) \quad (Eq. 6)$$

$$\gamma_n = 17,66 \text{ kN/m}^3 \times (1 + 0,11) = 19,6 \text{ kN/m}^3$$

Dessa forma, a Eq.7 define o cálculo para o volume total no compósito:

$$V = \frac{m_{solo} \times g}{\gamma_n} \quad (Eq. 7)$$

$$V = \frac{\frac{1000 \text{ Kg}}{1000} \times 9,81 \text{ m/s}^2}{19,6 \text{ kN/m}^3} \cong 0,5 \text{ m}^3$$

Idealmente, deve ser usado um valor de γ_n para a mistura solo-fibra, visto que ocorre tendência de diminuição da densidade da mistura em relação ao solo natural. No entanto, este dado dificilmente é encontrado nos estudos, como é o caso em Pradhan, Kar e Naik (2011). Portanto, para casos como este, pode-se assumir o γ_n da mistura como o mesmo do solo puro.

Para o cálculo do volume de fibra no compósito, a Eq.8 define:

$$V_f = \frac{m_{fibra} \times g}{\gamma_f} \quad (Eq. 8)$$

$$V_f = \frac{\frac{1 \text{ Kg}}{1000} \times 9,81 \text{ m/s}^2}{9,1 \text{ kN/m}^3} \cong 0,001 \text{ m}^3$$

Conhecendo os volumes de fibra e do solo na mistura, é possível determinar o teor volumétrico de fibras a partir da Eq. 9:

$$\chi = \frac{V_f}{V} \times 100 \quad (Eq. 9)$$

$$\chi = \frac{0,001}{0,5} \times 100 = 0,2\%$$

Com base nos dados anteriores é possível determinar a coesão e ângulo de atrito da mistura solo-fibra a partir das Eqs. 3 e 4:

$$c_{eq,p} = (1 + \alpha \times \eta \times \chi \times c_{i,c}) \times c \quad (Eq. 3)$$

$$(\tan \varphi)_{eq,p} = (1 + \alpha \times \eta \times \chi \times c_{i,\varphi}) \times \tan \varphi \quad (Eq. 4)$$

onde, segundo Zornberg (2002), α é 1 para a disposição aleatória das fibras. Portanto:

$$c_{eq,p} = (1 + 1 \times 75 \times 0,002 \times 0,8) \times 45 \text{ kPa}$$

$$c_{eq,p} = 50,8 \text{ kPa}$$

De maneira análoga, o ângulo de atrito equivalente será:

$$(\tan \varphi)_{eq,p} = (1 + 1 \times 75 \times 0,002 \times 0,9) \times \tan 26^\circ$$

$$(\tan \varphi)_{eq,p} = 0,5536$$

$$\varphi = 28,97^\circ$$

Consequentemente, a equação da envoltória de ruptura seria dada por:

$$S_{eq,p} = 50,8 + 0,5536 \times \sigma_n$$

4.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

O processo de cálculo exemplificado no item anterior foi replicado para cada um dos ensaios selecionados da literatura, com o uso do software Excel para gerar os resultados dos parâmetros de resistência de uma forma mais ágil. A seguir, nas Tabelas 2, 3, 4 e 5 são apresentados os parâmetros de resistência obtidos experimentalmente para cada mistura de solo-fibra e os previstos utilizando o modelo de Zornberg (2002), além dos erros percentuais associados.

Tabela 2 - Coesão prevista x experimental

% gravimétrico	L/D	Coesão prevista	Coesão experimental	Erro (%)	Estudo
0,1	75,0	50,81	50,00	1,6	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,2	75,0	56,61	58,00	2,5	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,3	75,0	62,39	68,00	9,0	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,4	75,0	68,16	100,00	46,7	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,5	75,0	73,91	94,00	27,2	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,1	100,0	52,75	90,00	70,6	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,2	100,0	60,47	130,00	115,0	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,3	100,0	68,18	130,00	90,7	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,4	100,0	75,88	145,00	91,1	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,5	100,0	83,55	165,00	97,5	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,1	125,0	54,68	100,00	82,9	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,2	125,0	64,34	118,00	83,4	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,3	125,0	73,98	118,00	59,5	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,4	125,0	83,60	135,00	61,5	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,5	125,0	93,19	120,00	28,8	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,25	127,9	44,18	60,78	37,6	Trindade <i>et al</i> (2004)
0,5	1043,5	56,57	83,14	47,0	Casagrande (2001)
0,5	1043,5	56,57	100,37	77,4	Casagrande (2001)
0,5	1043,5	76,84	121,52	58,2	Casagrande (2001)
0,25	240,0	76,76	79,00	2,9	Zaimoglu e Yetimoglu (2011)

Tabela 3 - Coesão prevista x experimental (continua)

% gravimétrico	L/D	Coesão prevista	Coesão experimental	Erro (%)	Estudo
0,5	240,0	97,40	142,00	45,8	Zaimoglu e Yetimoglu (2011)
0,75	240,0	117,94	105,00	11,0	Zaimoglu e Yetimoglu (2011)
1	240,0	138,37	129,00	6,8	Zaimoglu e Yetimoglu (2011)
0,25	333,3	23,82	22,00	7,6	Castro (2020)
0,05	333,3	170,85	121,00	29,2	Yazici e Keskin (2023)
0,1	333,3	208,66	124,00	40,6	Yazici e Keskin (2023)
0,15	333,3	246,43	131,00	46,8	Yazici e Keskin (2023)
0,2	333,3	284,15	128,00	55,0	Yazici e Keskin (2023)
0,05	666,7	208,70	128,00	38,7	Yazici e Keskin (2023)
0,1	666,7	284,32	132,00	53,6	Yazici e Keskin (2023)
0,15	666,7	359,85	139,00	61,4	Yazici e Keskin (2023)
0,2	666,7	435,30	135,00	69,0	Yazici e Keskin (2023)
0,05	1055,6	252,86	130,00	48,6	Yazici e Keskin (2023)
0,1	1055,6	372,59	138,00	63,0	Yazici e Keskin (2023)
0,15	1055,6	492,18	154,00	68,7	Yazici e Keskin (2023)
0,2	1055,6	611,64	162,00	73,5	Yazici e Keskin (2023)
0,3	352,9	257,43	85,00	67,0	Plé e Lê (2011)
0,6	352,9	408,68	78,00	80,9	Plé e Lê (2011)
0,25	352,9	124,41	108,60	12,7	Cai <i>et al</i> (2006)
0,1	192,3	73,04	87,76	20,1	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,2	192,3	85,39	92,44	8,3	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,3	192,3	97,70	101,97	4,4	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,4	192,3	109,99	93,46	15,0	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,1	288,5	79,23	94,36	19,1	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,2	288,5	97,75	100,78	3,1	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,3	288,5	116,22	112,76	3,0	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,4	288,5	134,66	103,99	22,8	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,1	384,6	85,42	80,56	5,7	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,2	384,6	110,10	87,25	20,8	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,3	384,6	134,74	91,55	32,1	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,4	384,6	159,32	88,85	44,2	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,1	480,8	91,60	72,56	20,8	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,2	480,8	122,46	80,72	34,1	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,3	480,8	153,26	87,12	43,2	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,4	480,8	183,98	65,14	64,6	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,1	1000,0	0,00	0,00	0,0	Silveira <i>et al</i> (2021)
0,25	1000,0	0,00	0,00	0,0	Silveira <i>et al</i> (2021)
0,1	1000,0	150,51	84,00	44,2	Silveira <i>et al</i> (2021)
0,25	1000,0	272,06	85,90	68,4	Silveira <i>et al</i> (2021)

Fonte: Autor (2024).

Tabela 4 - Ângulo de atrito previsto x experimental

% gravimétrico	L/D	Ângulo previsto	Ângulo experimental	Erro (%)	Estudo
0,1	75,0	29,19	33,00	13,1	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,2	75,0	32,18	39,00	21,2	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,3	75,0	34,98	40,00	14,3	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,4	75,0	37,60	42,00	11,7	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,5	75,0	40,04	39,00	2,6	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,1	100,0	30,21	30,30	0,3	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,2	100,0	34,07	38,00	11,5	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,3	100,0	37,61	41,00	9,0	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,4	100,0	40,83	45,85	12,3	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,5	100,0	43,77	42,00	4,0	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,1	125,0	31,21	27,47	12,0	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,2	125,0	35,89	36,12	0,6	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,3	125,0	40,07	40,00	0,2	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,4	125,0	43,78	42,90	2,0	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,5	125,0	47,08	43,70	7,2	Pradhan, Kar e Naik (2011)
0,25	127,9	41,42	32,95	20,4	Trindade et al (2004)
0,5	1043,5	80,19	31,51	60,7	Casagrande (2001)
0,5	1043,5	80,18	32,64	59,3	Casagrande (2001)
0,5	1043,5	79,96	33,22	58,5	Casagrande (2001)
0,25	240,0	54,31	45,00	17,1	Zaimoglu e Yetimoglu (2011)
0,5	240,0	64,33	26,00	59,6	Zaimoglu e Yetimoglu (2011)
0,75	240,0	70,12	49,00	30,1	Zaimoglu e Yetimoglu (2011)
1	240,0	73,82	34,00	53,9	Zaimoglu e Yetimoglu (2011)
0,25	333,3	60,76	37,10	38,9	Castro (2020)
0,05	333,3	18,98	19,20	1,2	Yazici e Keskin (2023)
0,1	333,3	23,13	20,00	13,5	Yazici e Keskin (2023)
0,15	333,3	27,04	22,10	18,3	Yazici e Keskin (2023)
0,2	333,3	30,69	20,80	32,2	Yazici e Keskin (2023)
0,05	666,7	23,14	20,80	10,1	Yazici e Keskin (2023)
0,1	666,7	30,71	22,00	28,4	Yazici e Keskin (2023)
0,15	666,7	37,25	23,00	38,2	Yazici e Keskin (2023)
0,2	666,7	42,82	21,00	51,0	Yazici e Keskin (2023)
0,05	1055,6	27,68	21,90	20,9	Yazici e Keskin (2023)
0,1	1055,6	38,25	22,10	42,2	Yazici e Keskin (2023)
0,15	1055,6	46,45	22,50	51,6	Yazici e Keskin (2023)
0,2	1055,6	52,75	23,80	54,9	Yazici e Keskin (2023)
0,3	352,9	20,61	15,40	25,3	Plé e Lê (2011)
0,6	352,9	31,89	12,30	61,4	Plé e Lê (2011)
0,25	352,9	41,21	25,60	37,9	Cai et al (2006)
0,1	192,3	32,09	27,90	13,0	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,2	192,3	37,98	29,90	21,3	Jiang, Cai e Liu (2010)

Tabela 5 - Ângulo de atrito previsto x experimental (continua)

% gravimétrico	L/D	Ângulo previsto	Ângulo experimental	Erro (%)	Estudo
0,3	192,3	43,06	31,60	26,6	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,4	192,3	47,40	29,10	38,6	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,1	288,5	35,15	28,60	18,6	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,2	288,5	43,07	31,40	27,1	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,3	288,5	49,36	33,20	32,7	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,4	288,5	54,37	30,10	44,6	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,1	384,6	38,00	27,70	27,1	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,2	384,6	47,44	29,30	38,2	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,3	384,6	54,39	30,40	44,1	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,4	384,6	59,57	28,20	52,7	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,1	480,8	40,64	27,40	32,6	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,2	480,8	51,18	27,70	45,9	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,3	480,8	58,42	28,10	51,9	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,4	480,8	63,55	27,70	56,4	Jiang, Cai e Liu (2010)
0,1	1000,0	55,04	29,30	46,8	Silveira et al (2021)
0,25	1000,0	70,22	29,90	57,4	Silveira et al (2021)
0,1	1000,0	54,67	26,60	51,3	Silveira et al (2021)
0,25	1000,0	70,27	29,90	57,4	Silveira et al (2021)

Fonte: Autor (2024).

Diante do exposto, o modelo aparenta não ser capaz de prever com precisão os parâmetros de resistência, registrando erro percentual médio de 41% para a coesão e 30% para o ângulo de atrito. Alguns intervalos de teor de fibras e relação L/D performam com mais destaque, sendo abordados no tópico a seguir.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA EXPERIMENTAIS E PREVISTOS

A princípio é difícil identificar claramente um padrão de comportamento do modelo, uma vez que a primeira impressão seja a inconsistência das previsões, como evidenciado pelas Figuras 2 e 3, a seguir.

Figura 2 - Coesão experimental x prevista

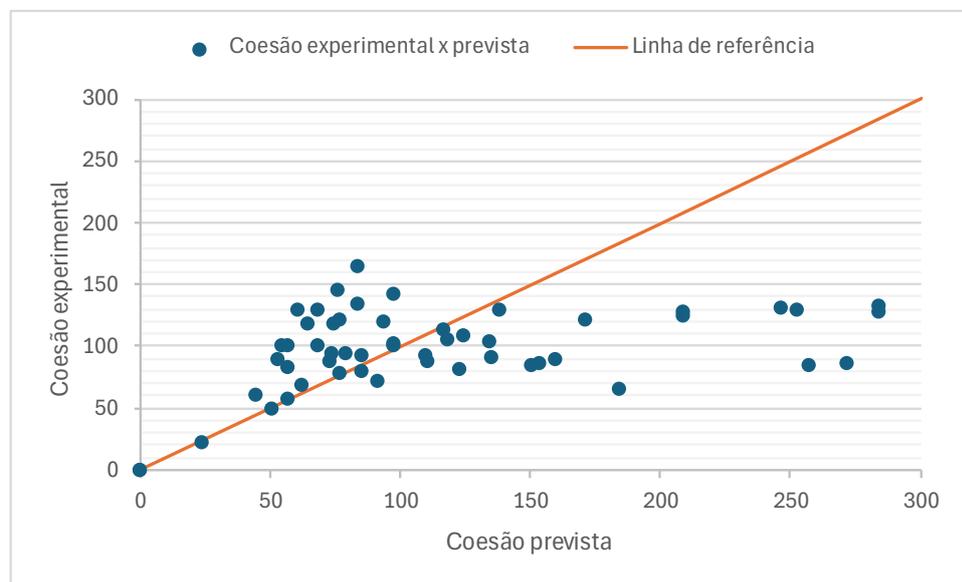
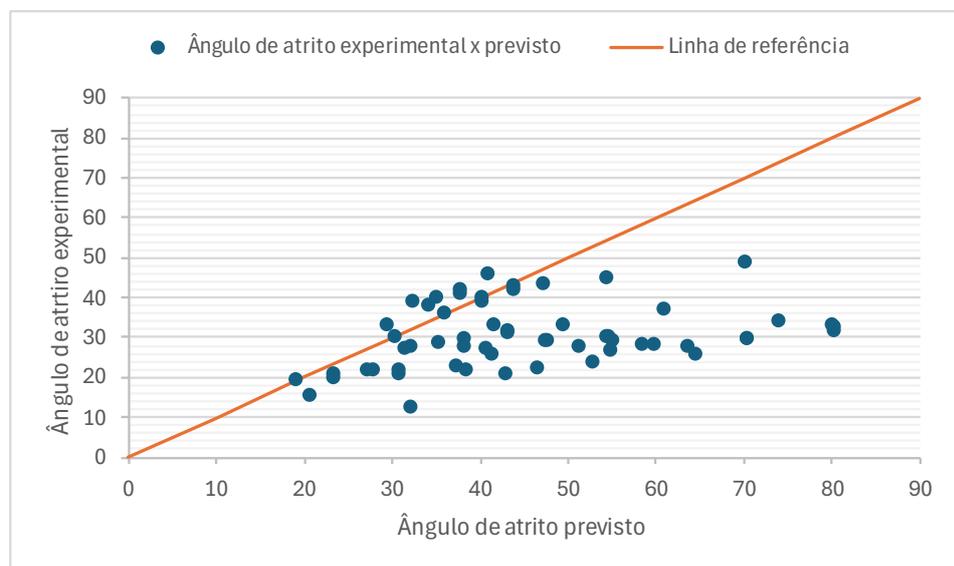


Figura 3 - Ângulo de atrito experimental x previsto



Nas Figuras 2 e 3, não é observado um padrão de comportamento dos pontos de dispersão. Caso fosse possível observar esse comportamento, os pontos de dispersão estariam localizados sobre a linha de referência de 45° de inclinação em relação ao eixo horizontal, sendo possível afirmar que as previsões possuiriam uma relação de equivalência com os resultados experimentais. Adicionalmente, é possível notar que para coesões abaixo de 100 kPa, o modelo tendeu a subestimar os valores de coesão prevista em relação aos experimentais, enquanto para coesões acima de 100 kPa a tendência foi de superestimar o valor previsto. Já no que diz respeito ao ângulo de atrito, a tendência geral foi de superestimar os valores previstos, pois a maioria dos pontos encontra-se abaixo da linha de referência.

Para auxiliar na visualização dos resultados, foram gerados gráficos que mostram o comportamento previsto x experimental de acordo com a variação da relação L/D. Para tal, foram escolhidos os ensaios de Pradhan, Kar e Naik (2011) e Jiang, Cai e Liu (2010) por terem realizado um maior número de testes, possibilitando uma análise mais completa.

Da análise das Figuras 4 a 8, referentes aos gráficos de coesão prevista x experimental para os ensaios de Pradhan, Kar e Naik (2011), nota-se que a precisão do modelo é maior conforme menores são os valores da relação L/D, independente do teor de fibras utilizado. Adicionalmente, quando se compara com o teor de fibras, não é possível observar um padrão, como pode ser confirmado pelas Figuras 9, 10 e 11.

Figura 4 - Coesão x L/D para teores de fibras de 0,1% (Pradhan; Kar; Naik, 2011)

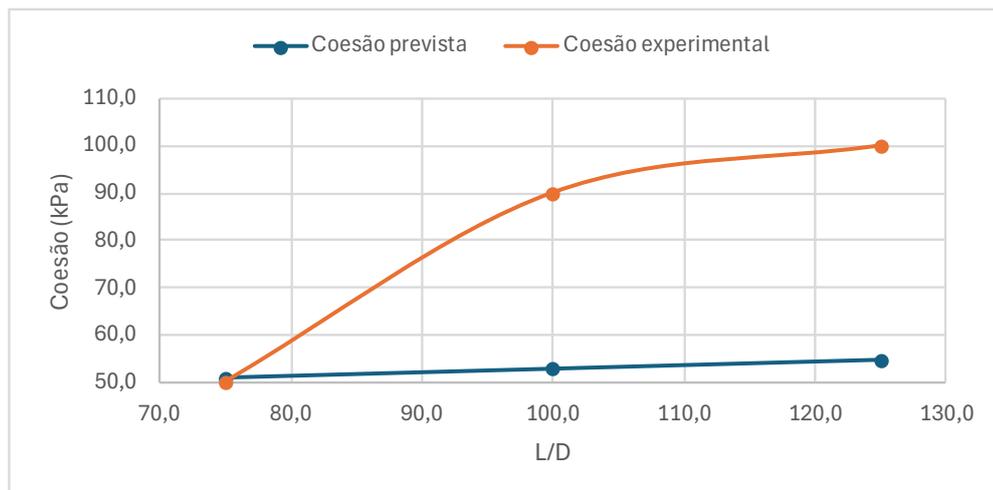


Figura 5 - Coesão x L/D para teores de fibras de 0,2% (Pradhan; Kar; Naik, 2011)

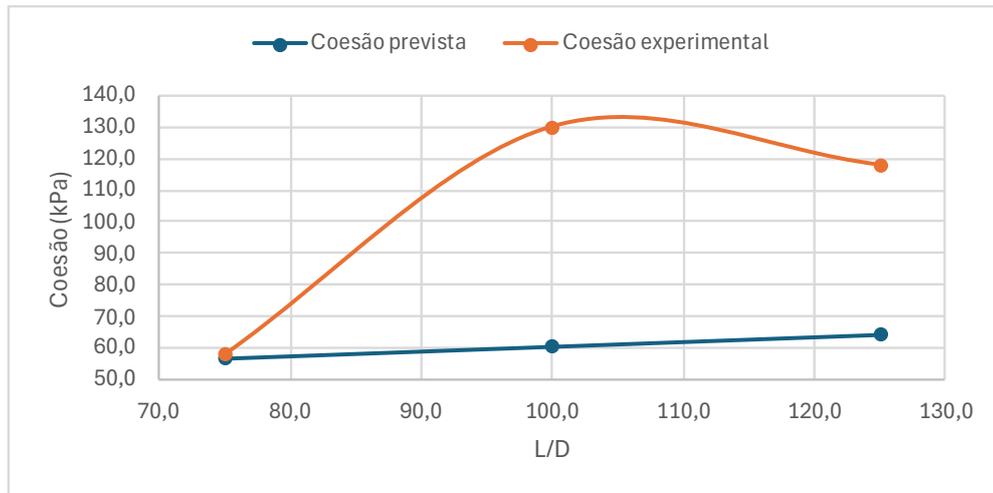


Figura 6 - Coesão x L/D para teores de fibras de 0,3% (Pradhan; Kar; Naik, 2011)

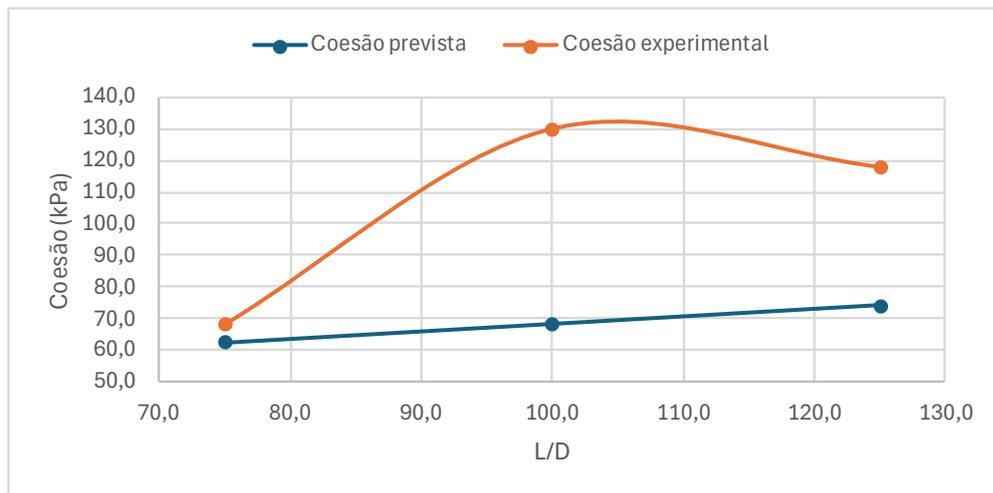


Figura 7 - Coesão x L/D para teores de fibras de 0,4% (Pradhan; Kar; Naik, 2011)

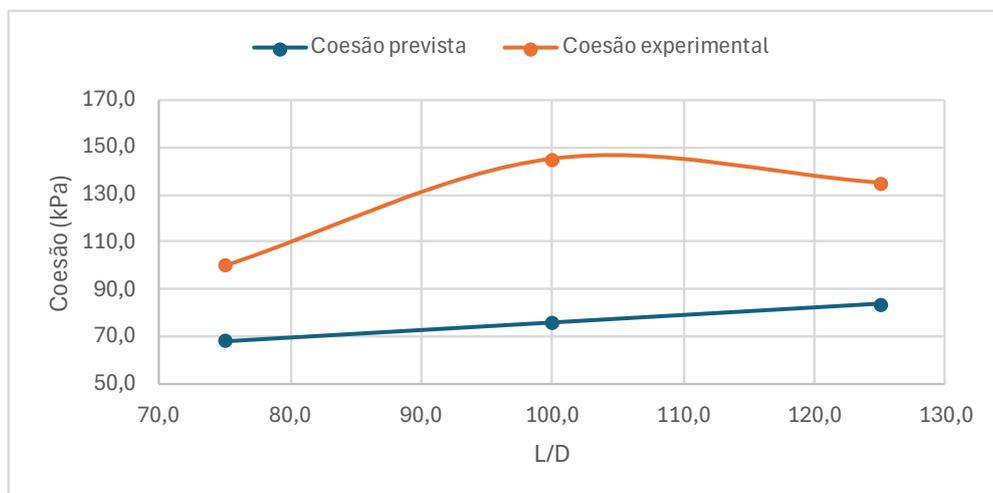
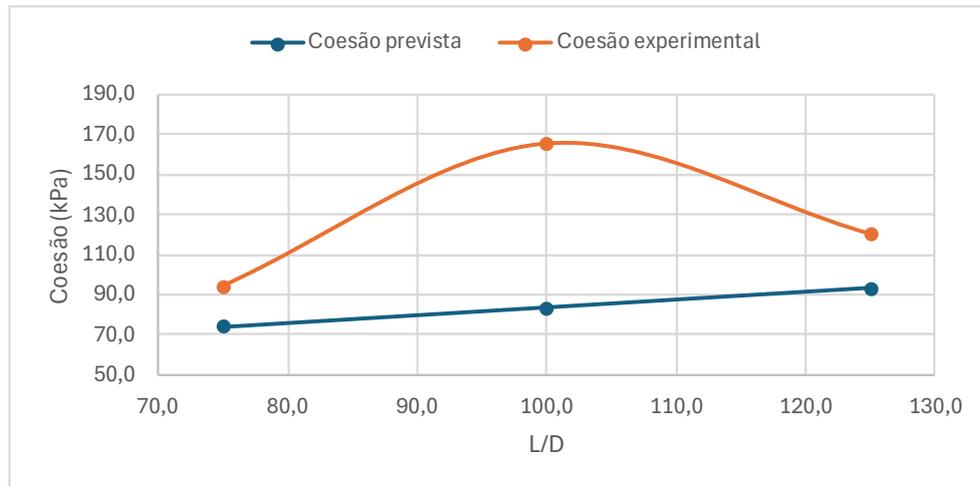


Figura 8 - Coesão x L/D para teores de fibras de 0,5% (Pradhan; Kar; Naik, 2011)



Nota-se que em grande parte das vezes os valores previstos pelo modelo foram inferiores aos experimentais obtidos por Pradhan, Kar e Naik (2011). Importante destacar que as equações do modelo de Zornberg (2002) indicam somente o aumento dos parâmetros de resistência como resposta ao aumento do teor de fibras, fato este nem sempre observado nos resultados experimentais obtidos por diferentes autores.

Figura 9 - Coesão x % fibras para L/D 75 (Pradhan; Kar; Naik, 2011)

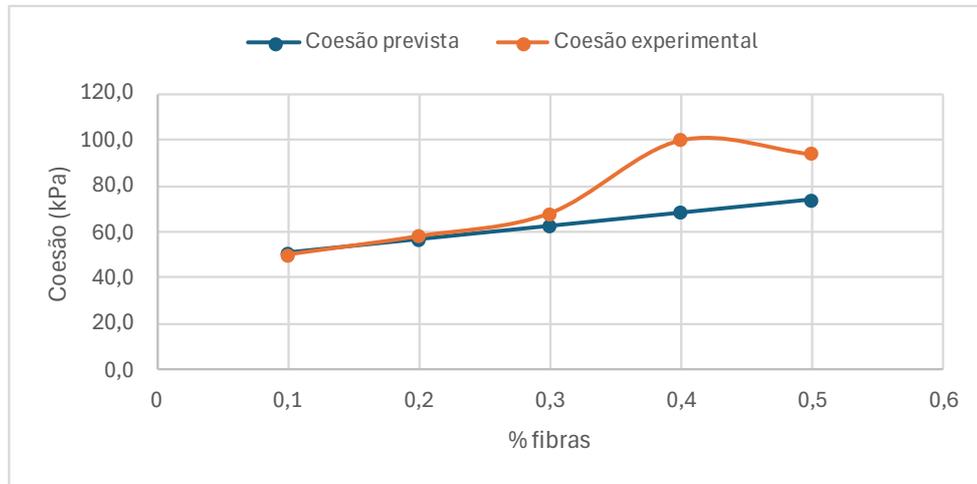


Figura 10 - Coesão x % fibras para L/D 100 (Pradhan; Kar; Naik, 2011)

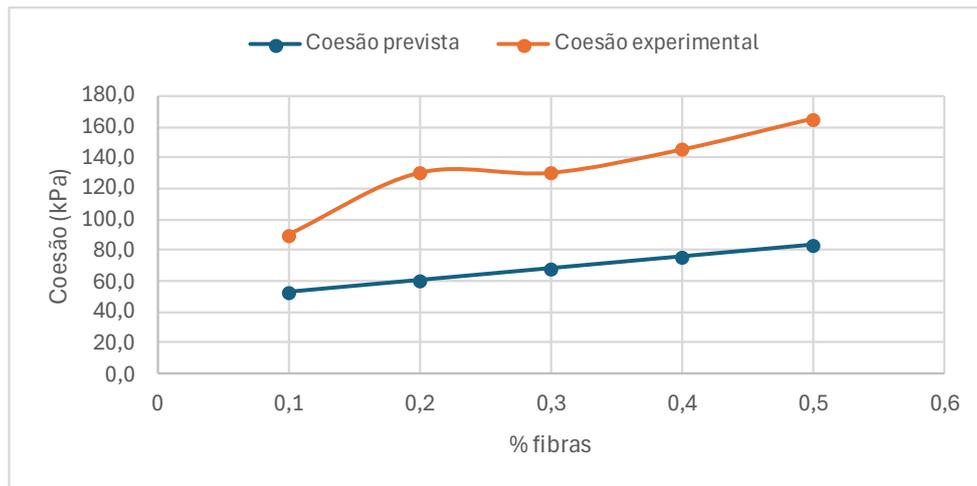
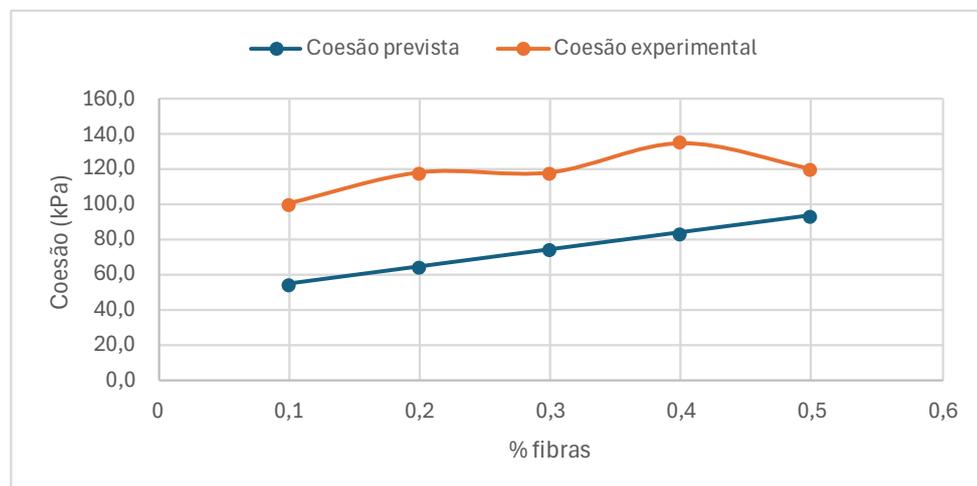


Figura 11 - Coesão x % fibras para L/D 125 (Pradhan; Kar; Naik, 2011)



Da análise das Figuras 12 a 16, referentes aos gráficos de ângulo de atrito previsto x experimental para os ensaios de Pradhan, Kar e Naik (2011), um comportamento diferente, em relação aos gráficos anteriores, é observado para cada teor utilizado. Em linhas gerais, nota-se uma maior precisão do modelo com o aumento da relação L/D, como única exceção os ensaios com 0,1% de fibra.

Figura 12 - Ângulo de atrito x L/D para teores de fibras de 0,1% (Pradhan; Kar; Naik, 2011)

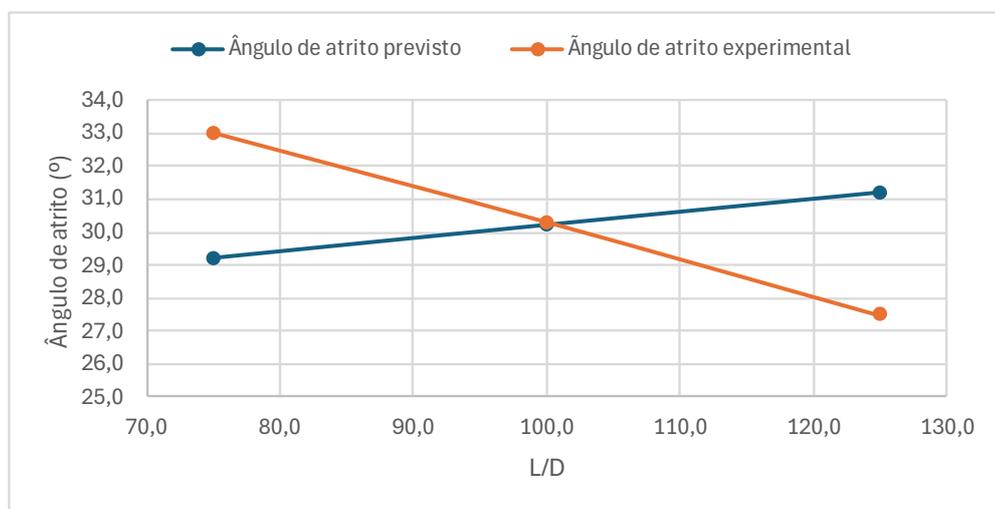


Figura 13 - Ângulo de atrito x L/D para teores de fibras de 0,2% (Pradhan; Kar; Naik, 2011)

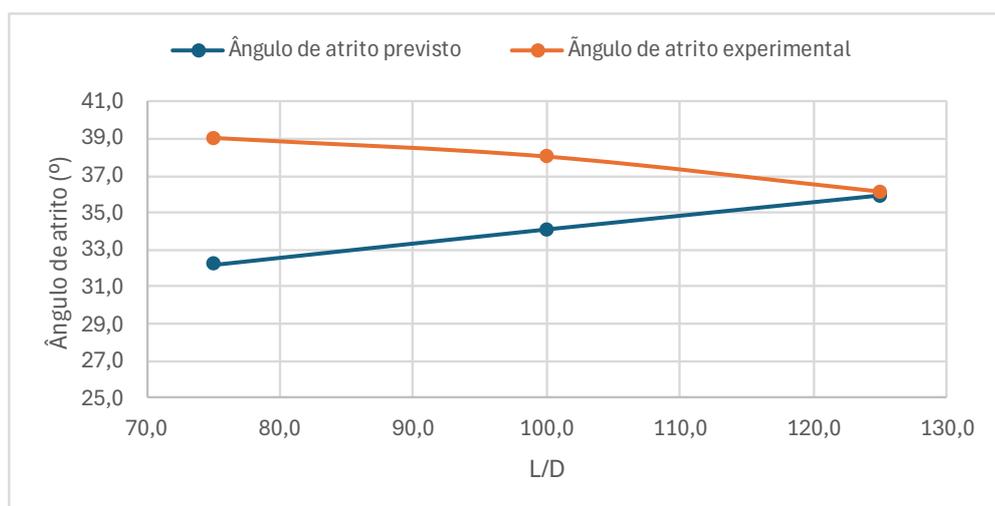


Figura 14 - Ângulo de atrito x L/D para teores de fibras de 0,3% (Pradhan; Kar; Naik, 2011)

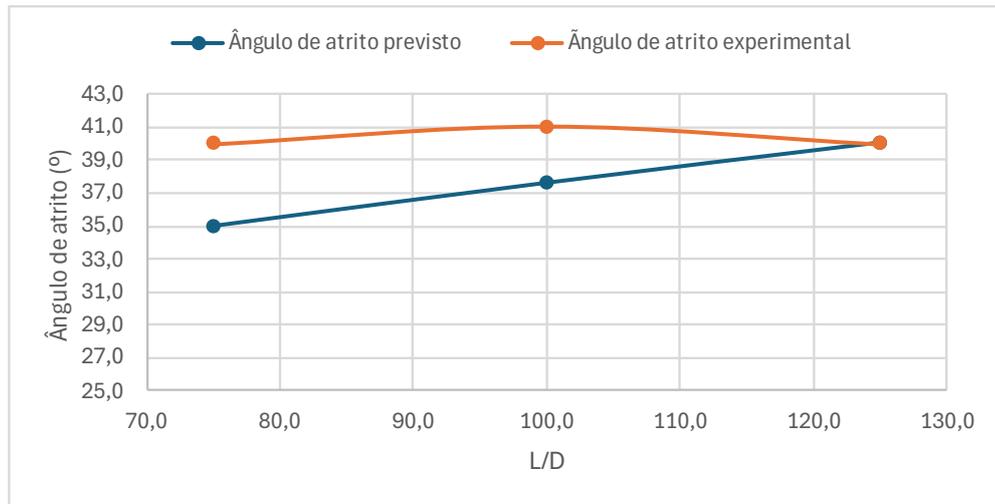


Figura 15 - Ângulo de atrito x L/D para teores de fibras de 0,4% (Pradhan; Kar; Naik, 2011)

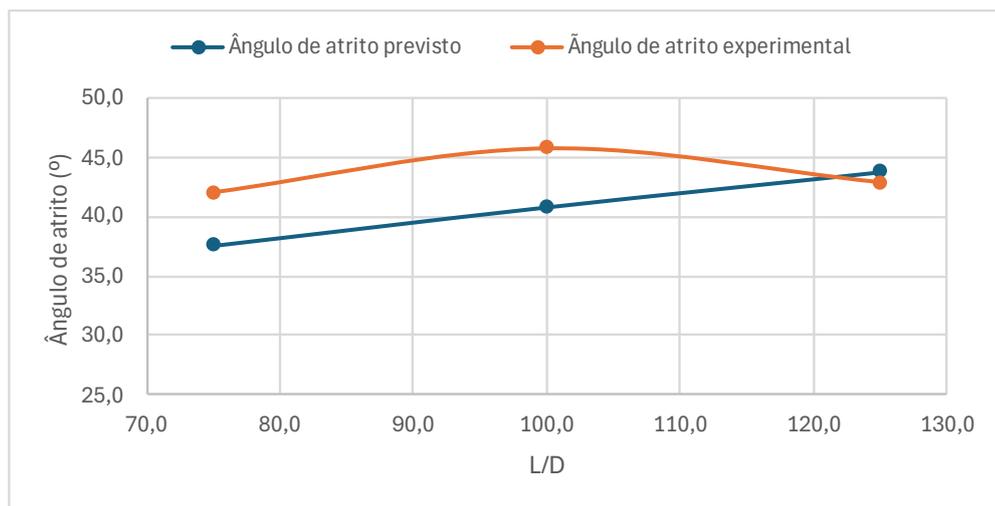


Figura 16 - Ângulo de atrito x L/D para teores de fibras de 0,5% (Pradhan; Kar; Naik, 2011)

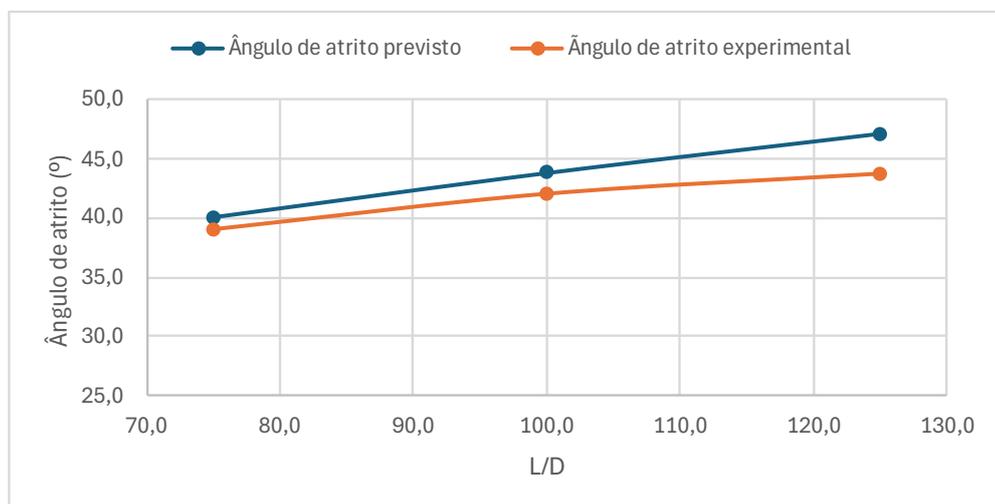


Figura 17 - Ângulo de atrito x % de fibras para L/D 75 (Pradhan; Kar; Naik, 2011)

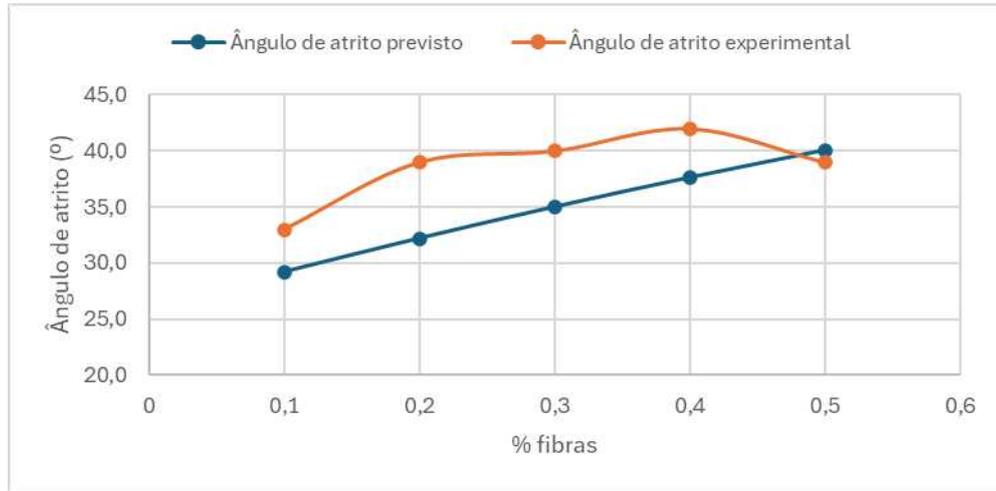


Figura 18 - Ângulo de atrito x % de fibras para L/D 100 (Pradhan; Kar; Naik, 2011)

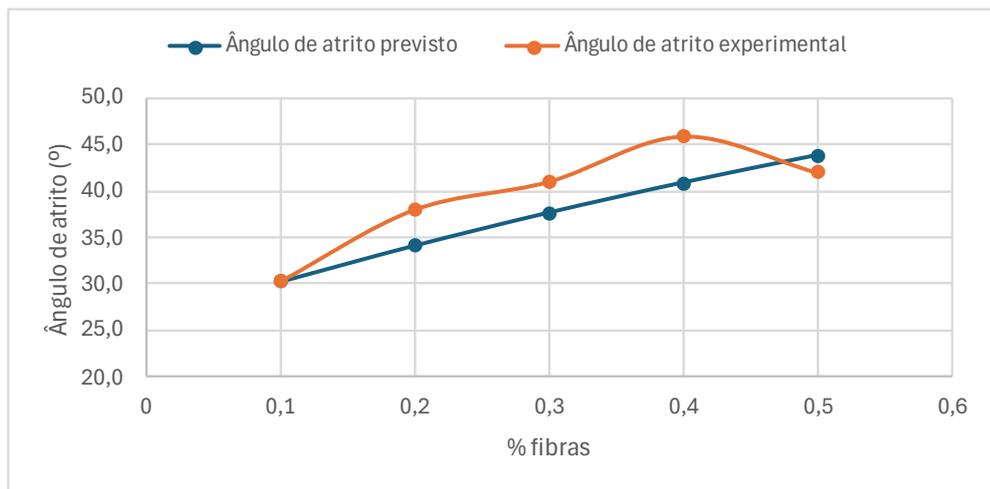
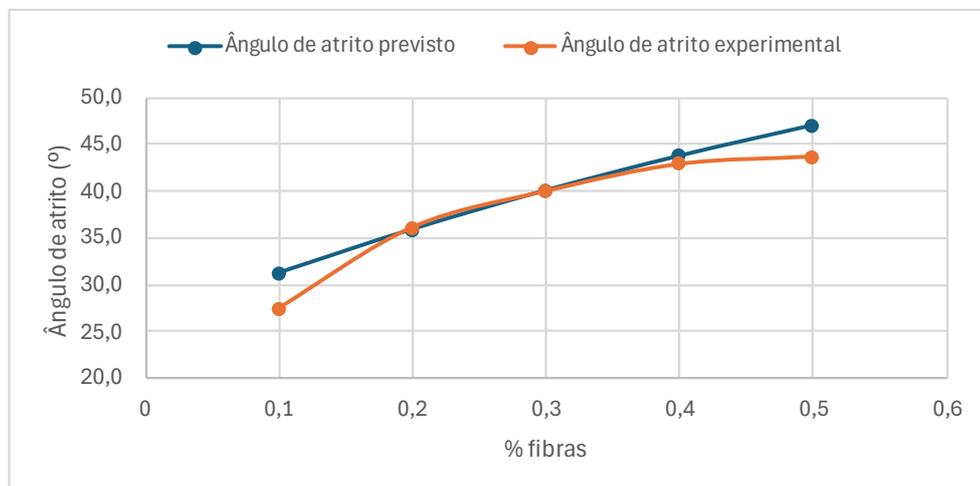


Figura 19 - Ângulo de atrito x % de fibras para L/D 125 (Pradhan; Kar; Naik, 2011)



As figuras 20 a 23 mostram a comparação entre a coesão fornecida pelo modelo e os dados experimentais obtidos por Jiang, Cai e Liu (2010). Comparando os resultados fornecidos pelo modelo com os dados experimentais dos ensaios de Jiang, Cai e Liu (2010), nota-se que os resultados do modelo indicam um aumento dos parâmetros de resistência com o aumento da relação L/D, que não foi observado nos resultados experimentais, assim como foi observado para os ensaios de Pradhan, Kar e Naik (2011). Ademais, é importante enfatizar que aqui, assim como em ensaios de outros autores, melhores previsões para o intercepto coesivo foram observadas para relações L/D menores.

Figura 20 - Coesão x L/D para teores de fibras de 0,1% (Jiang; Cai; Liu, 2010)

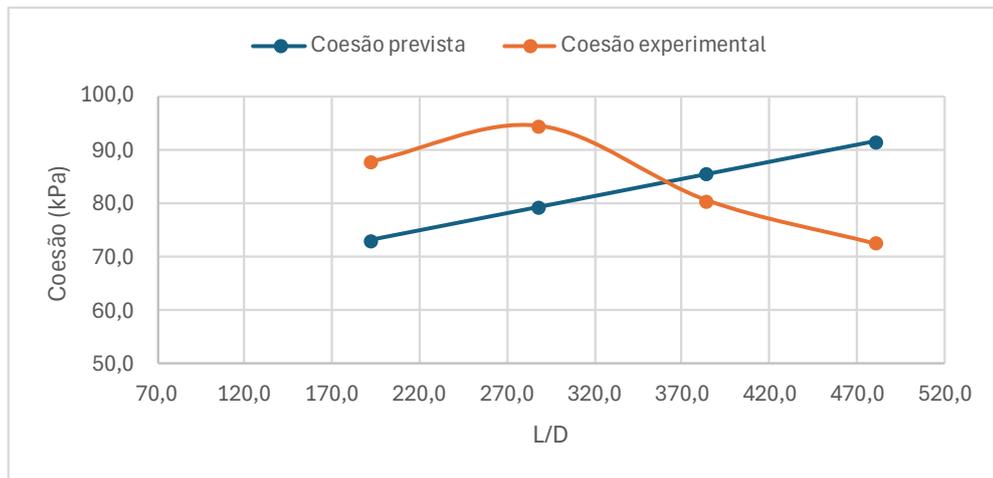


Figura 21 - Coesão x L/D para teores de fibras de 0,2% (Jiang; Cai; Liu, 2010)

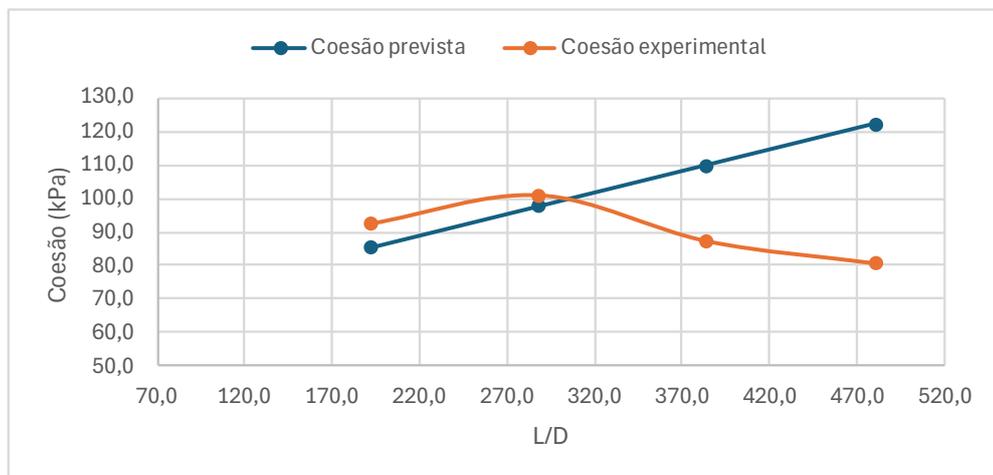


Figura 22 - Coesão x L/D para teores de fibras de 0,3% (Jiang; Cai; Liu, 2010)

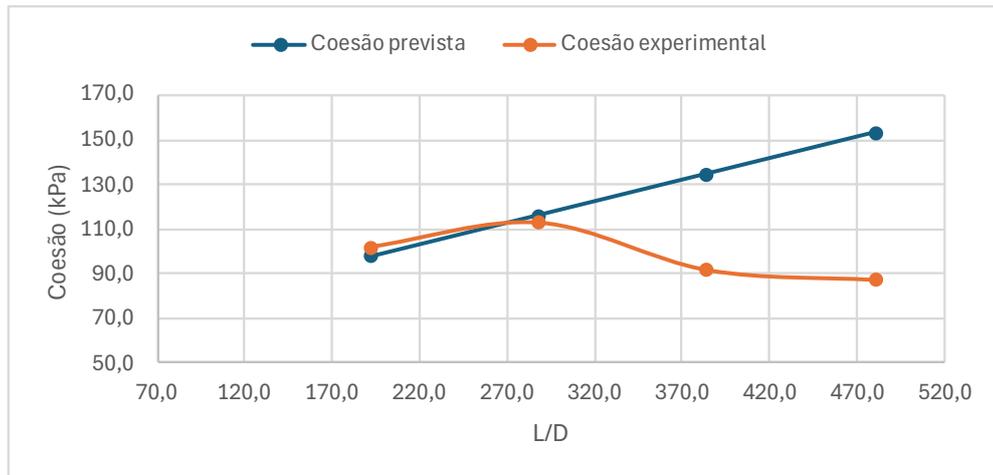
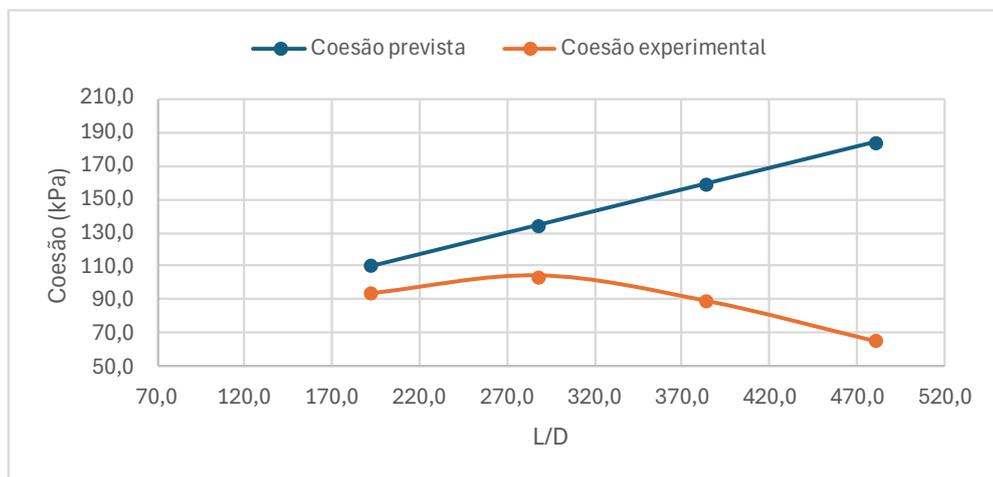


Figura 23 - Coesão x L/D para teores de fibras de 0,4% (Jiang; Cai; Liu, 2010)



Ao segmentar os gráficos em diferentes relações L/D, variando o teor de fibras para cada uma delas, fica evidente que a precisão do modelo é menor para maiores valores de L/D, como se observa nas Figuras 24 a 27.

Figura 24 - Coesão x % fibras para L/D 192 (Jiang; Cai; Liu, 2010)

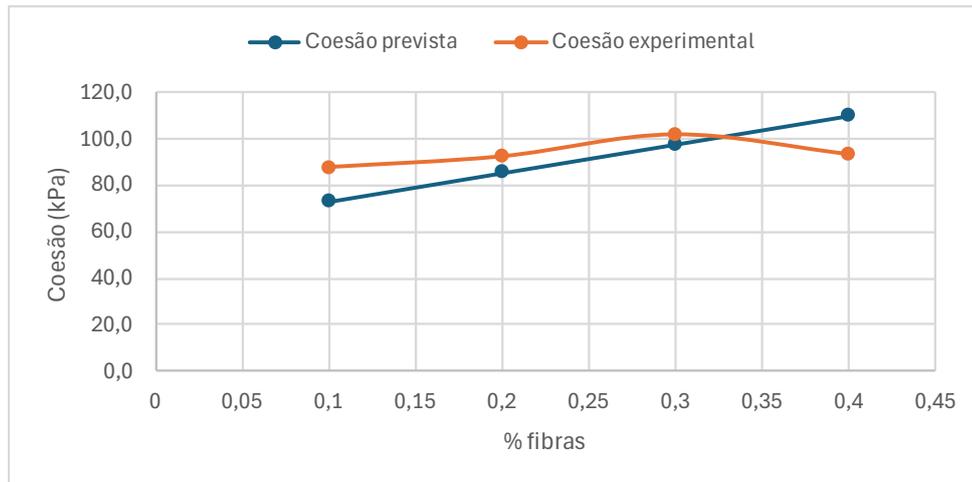


Figura 25 - Coesão x % fibras para L/D 288 (Jiang; Cai; Liu, 2010)

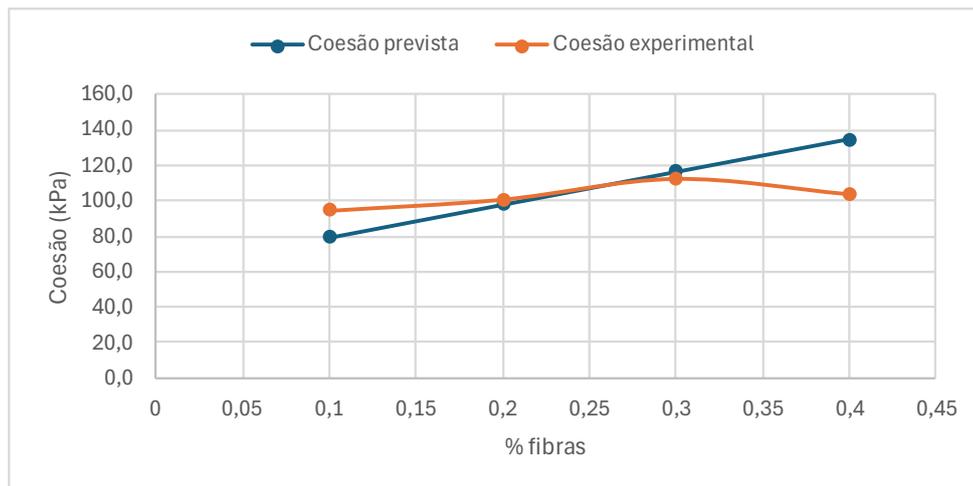


Figura 26 - Coesão x % fibras para L/D 384 (Jiang; Cai; Liu, 2010)

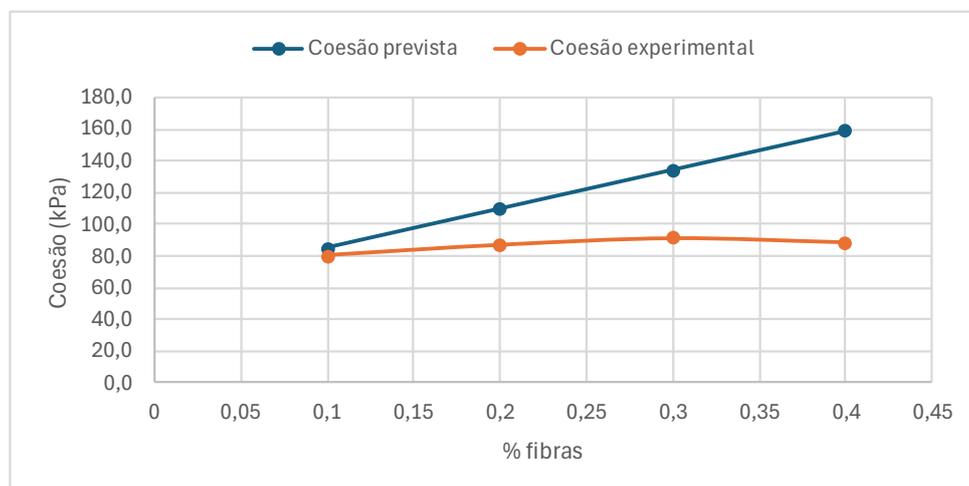
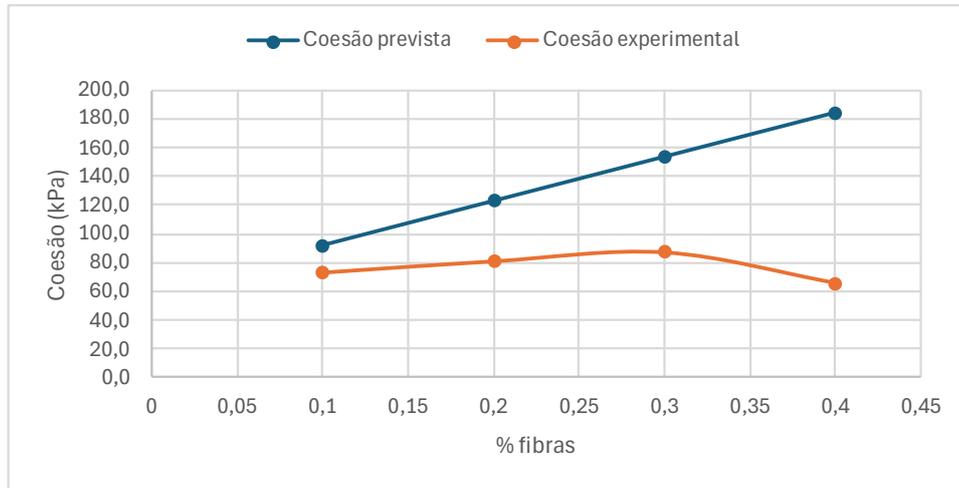


Figura 27 - Coesão x % fibras para L/D 480 (Jiang; Cai; Liu, 2010)



No que diz respeito a comparação de resultados previstos x experimental para o ângulo de atrito dos ensaios de Jiang, Cai e Liu (2010), um comportamento em comum é observado. O modelo demonstra diminuição da precisão para os maiores valores de relação L/D, independente do teor de fibras utilizado. Observa-se, mais uma vez, o comportamento crescente linear do ângulo de atrito previsto, enquanto o experimental apresenta pouca variação. Esse comportamento pode ser observado nas Figuras 28 a 31, a seguir.

Figura 28 - Ângulo de atrito x L/D para teores de fibras de 0,1% (Jiang; Cai; Liu, 2010)

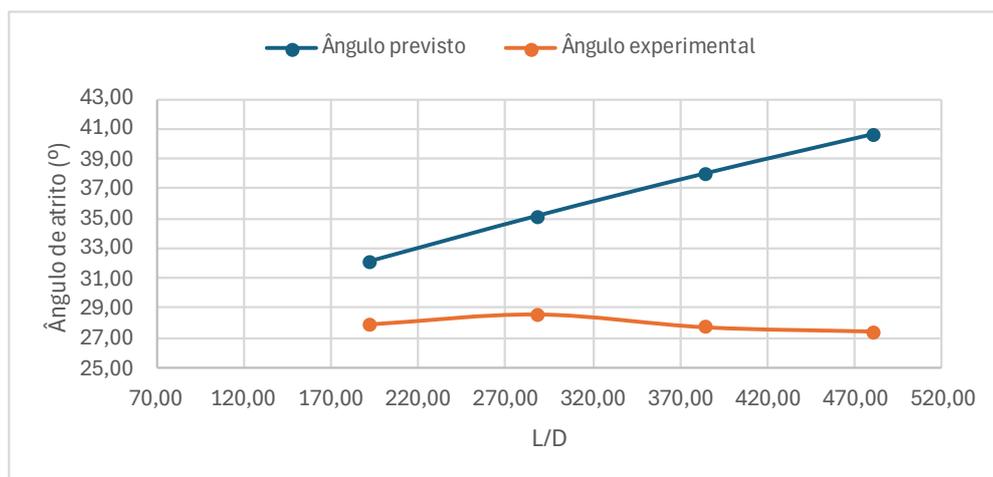


Figura 29 - Ângulo de atrito x L/D para teores de fibras de 0,2% (Jiang; Cai; Liu, 2010)

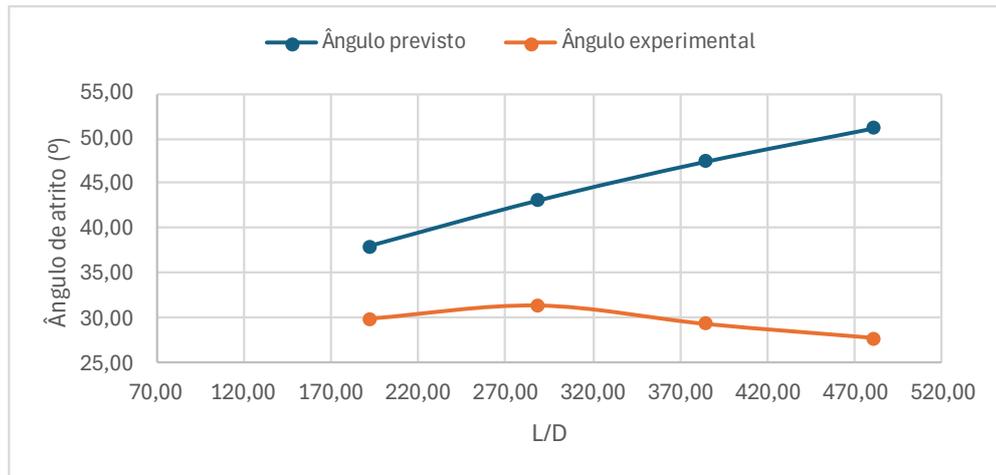


Figura 30 - Ângulo de atrito x L/D para teores de fibras de 0,3% (Jiang; Cai; Liu, 2010)

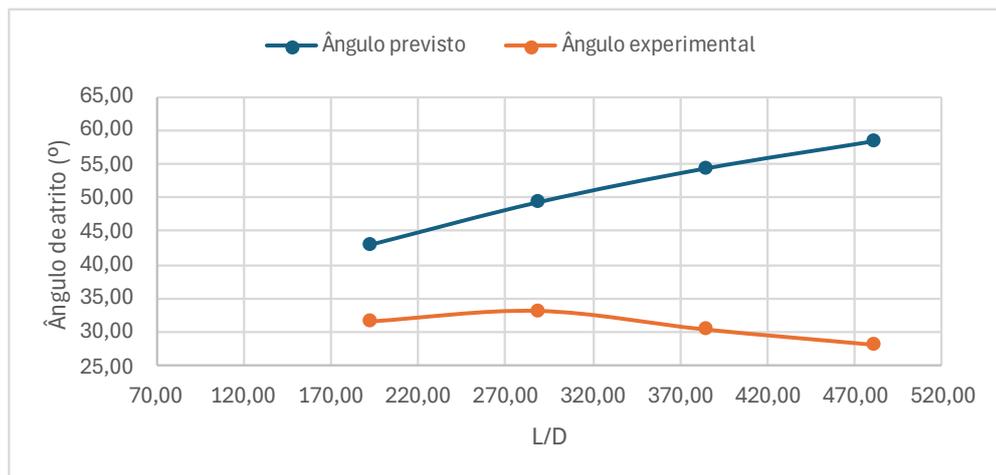
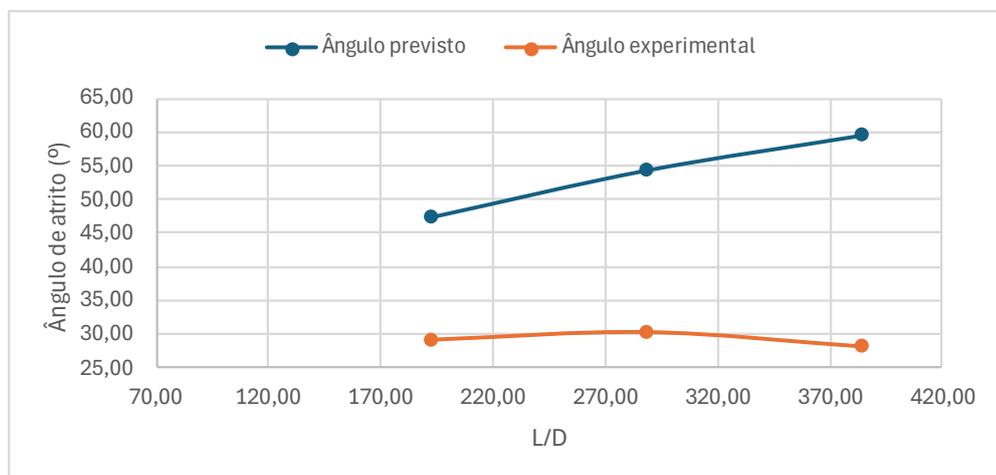


Figura 31 - Ângulo de atrito x L/D para teores de fibras de 0,4% (Jiang; Cai; Liu, 2010)



5 CONCLUSÃO

Após a exposição dos resultados, conclui-se que as previsões dos parâmetros de resistência pelo método de Zornberg (2002) apresentaram diferenças significativas com os dados de ensaios obtidos por diferentes autores. Para a coesão, os erros percentuais variam de 1,6 até 115 %, registrando um erro percentual médio de 41%. Para o ângulo de atrito, foram observados erros percentuais de 0,2 até 61%, com erro percentual médio de 30%.

Adicionalmente, é possível inferir que há uma tendência do método em superestimar os valores do ângulo de atrito previsto, como evidenciado pela Figura 3, onde os pontos se encontram majoritariamente abaixo da linha de referência. Ainda sobre este quesito, é notável que para a coesão existe um divisor do comportamento do método, em que para valores abaixo de 100 kPa o método tendeu a subestimar a coesão prevista e para valores acima de 100 kPa foi observada a superestimação desse parâmetro.

No entanto, para ambos os parâmetros utilizados, o método apresentou uma boa acurácia para relações L/D mais baixas, para previsão da coesão, como evidenciado pelas comparações dos ensaios de Jiang, Cai e Liu (2010), em que os valores previstos e experimentais dos parâmetros ficavam mais distantes conforme o aumento da relação L/D. Dessa forma, embora não tenha sido possível determinar com precisão um intervalo ideal do método, é recomendável a utilização do método para determinação da coesão apenas para baixos valores de relação L/D. Com relação ao ângulo de atrito, em geral o método de Zornberg (2002) superestima os resultados experimentais e a diferença entre os dados estimados x experimentais tendeu a diminuir para maiores relações de L/D, considerando o ensaios de Pradhan, Kar e Naik (2011), e para menores relações de L/D, considerando os resultados experimentais de Jiang, Cai e Liu (2010). Dessa forma, não é possível apontar uma tendência de variação do ângulo de atrito com L/D nos ensaios considerados, seriam necessárias mais comparações com dados experimentais.

Finalmente, é importante ressaltar que o método de Zornberg (2002) gera valores crescentes dos parâmetros de resistência com o aumento do teor de fibras, uma vez que no equacionamento do método está incorporado apenas um acréscimo aos parâmetros naturais do solo. Entretanto, essa crescente não é sempre observada nos resultados experimentais, que sugerem haver um teor ótimo de fibras, seguido de queda nos parâmetros.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, M. **Natural and man-made fibres: Physical and mechanical properties**. In: FANGUEIRO, 3. ed. rev. *Fibrous and composite materials for civil engineering applications*. Woodhead Publishing, 2011.
- BUDINSKI, K. G. **Engineering Materials**; properties and selection. New Jersey: Prentice Hall International., 5ed, 1996. 653p.
- CAI, Y. et al. Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. **Engineering Geology**, v. 87, n. 3–4, p. 230–240, nov. 2006.
- CARVALHO, L. M. C. **Comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras naturais submetido a ensaios de cisalhamento direto em média escala**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Brasília - UnB, Brasília, 2019.
- CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2005.
- CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - RGS, Porto Alegre, 2001.
- CASTRO, C. L. **Comportamento Hidromecânico de solos reforçados com fibras considerando a condição não saturada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, 2020.
- CASTRO, H.; GIANNASI, F.; NOVELLO, C. A luta pelo banimento do amianto nas Américas: uma questão de saúde pública. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 8, n. 4, p. 903–911, 2003.
- DONATO, M. **Medidas diretas de tensão em solo reforçado com fibras de polipropileno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2007.

FESTUGATO, L. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro - reforçado com fibras de distintos índices de aspecto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2008.

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

GIRARDELLO, V. **Ensaio de placa em areia não saturada reforçada com fibras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2010.

HANNANT, L. **Fiber-reinforced cements and concretes**. In: J. M. ILLSTON. *Construction Materials; their nature and behavior*. 2 ed. London: J. M. Illston/E & FN Spon, p. 359 - 403, 1994.

HOLLAWAY, L. **Polymers and polymer composites**, In: J. M. ILLSTON. **Construction Materials; their nature and behavior**. 2 ed. London: J. M. Illston/E & FN Spon, 2 ed., p. 321 - 358, 1994.

JIANG, H.; CAI, Y.; LIU, J. Engineering Properties of Soils Reinforced by Short Discrete Polypropylene Fiber. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 12, p. 1315–1322, dez. 2010.

KUASNE, A. **Curso têxtil em malharia e confecção**; fibras têxteis. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina - CEFET/SC. Araranguá, p. 90. 2008.

MICHALOWSKI, R. L.; ZHAO, A. Failure of Fiber-Reinforced Granular Soils. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 122, n. 3, p. 226–234, mar. 1996.

PALMEIRA, E. M. Evolução dos geossintéticos no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS, 2., 1995, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: 1995.

PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. São Paulo: Oficina de Textos, 294p, 2018.

PLÉ, O.; LÊ, T. N. H. Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty clay. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 32, p. 111–116, jun. 2012.

PRADHAN, P. K.; KAR, R. K.; NAIK, A. Effect of Random Inclusion of Polypropylene Fibers on Strength Characteristics of Cohesive Soil. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 30, n. 1, p. 15–25, fev. 2012.

SILVA, D. P. E. **Análise de diferentes metodologias executivas de solo pregado a partir de arrancamento realizados em campo e laboratório**. Doutorado em Geotecnia—São Carlos: Universidade de São Paulo, 7 ago. 2009.

SILVEIRA, M. R. et al. Effect of Polypropylene Fibers on the Shear Strength–Dilation Behavior of Compacted Lateritic Soils. **Sustainability**, v. 13, n. 22, p. 12603, 15 nov. 2021.

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

TEODORO, J. M. **Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 1999.

TRINDADE, T. P. D. et al. Latossolo vermelho-amarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória: estudo em laboratório. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 57, n. 1, p. 53–58, mar. 2004.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2003.

YAZICI, M. F.; KESKIN, S. N. Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Polypropylene Fiber-Reinforced Clay Soil and Development of Predictive Models: Effects of Fiber Length and Fiber Content. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 5 fev. 2024.

ZAIMOGLU, A. S.; YETIMOGLU, T. Strength Behavior of Fine Grained Soil Reinforced with Randomly Distributed Polypropylene Fibers. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 30, n. 1, p. 197–203, fev. 2012.

ZORNBERG, J. G. Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil. **Géotechnique**, v. 52, n. 8, p. 593–604, out. 2002.