



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**



**ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E
MICROESTRUTURAIS DE UM SOLO-CIMENTO MELHORADO
COM FIBRAS DE POLIPROPILENO**

**Bianca Soares do Vale
Lívia Monise Rocha do Nascimento**

**Belém - PA
Novembro/2024**

**BIANCA SOARES DO VALE
LÍVIA MONISE ROCHA DO NASCIMENTO**

**Análise de propriedades mecânicas e microestruturais de um solo-cimento
melhorado com fibras de polipropileno**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de
Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade
Federal do Pará em formato de artigo científico como parte dos
requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Orientadora: Prof.^a Ma. Luciana Carvalho Queiroz

Coorientador: Prof. Ph.D. Nilo Cesar Consoli

**Belém - PA
Novembro/2024**

**BIANCA SOARES DO VALE
LÍVIA MONISE ROCHA DO NASCIMENTO**

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E
MICROESTRUTURAS DE UM SOLO-CIMENTO MELHORADO COM
FIBRAS DE POLIPROPILENO**

Belém, 07 de novembro de 2024

Prof.^a Luciana Carvalho Queiroz
(UFPA)
Ma. pela UFRGS
Orientadora

Prof. Nilo Cesar Consoli
(UFRGS)
Ph.D. pela Concordia University
Coorientador

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Lais Rodrigues da Costa Chaves
(UFPA)
Dr.^a pela UFRGS

Lucas Luciano Sousa Batista
(UFRGS)
M.e. pela UFRGS

CONCEITO FINAL: _____

ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DE UM SOLO-CIMENTO MELHORADO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO

Bianca Soares do Vale (1), Livia Monise Rocha do Nascimento (1)

(1) Universidade Federal do Pará - UFPA

RESUMO

Solos que possuem baixa capacidade de suporte ou que são inviáveis para uso em construções geotécnicas geram desafios na execução das obras. Por isso, há um interesse crescente em estudar técnicas que melhorem as propriedades mecânicas desses, explorando diferentes combinações de materiais. Este estudo investigou os efeitos da adição de fibras de polipropileno e diferentes teores de cimento na resistência mecânica de um solo arenoso proveniente da região Norte do Brasil. Foram analisadas variações de 0% e 0,5% de fibras de polipropileno e 3% e 5% de adições cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI). Para análise das propriedades mecânicas e microestruturais foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples e a microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados mostram que o aumento da porcentagem de cimento levou a um crescimento linear na resistência mecânica do material. A adição de fibras proporcionou uma melhoria significativa na capacidade de carga do solo, além de conferir maior ductilidade ao material no momento após a ruptura. A análise microscópica mostrou uma matriz cimentada mais densa e coesa, com as fibras de polipropileno promovendo maior coesão e distribuição de tensões.

Palavras-chave: Solo-cimento; Reforço com fibra; Fibra de polipropileno; Compressão simples.

ABSTRACT

Soils with low bearing capacity or limited suitability for geotechnical applications pose significant challenges in construction. Consequently, there is increasing interest in exploring techniques to enhance their mechanical properties through diverse material combinations. This study examined how adding polypropylene fibers and different cement contents affects the strength of a sandy soil from northern Brazil. Samples with 0% and 0.5% polypropylene fibers and 3% and 5% high early-strength Portland cement were tested. Unconfined compressive strength (UCS) tests and scanning electron microscopy were conducted to assess mechanical and microstructural properties. Results indicated a linear increase in strength with higher cement content. Fiber addition notably improved load-bearing capacity and provided greater

ductility after failure. Microscopic analysis showed a denser, more cohesive cemented matrix, with polypropylene fibers contributing to better cohesion and stress distribution.

Keywords: Soil-cement; Fiber reinforcement; Polypropylene fiber; Unconfined compression.

1. INTRODUÇÃO

Os solos com baixa capacidade de suporte ou que apresentam inviabilidade para uso geotécnico nas construções podem gerar obstáculos construtivos, resultando em custos elevados para sua solução. Assim, há um foco crescente na investigação de técnicas para melhorar as propriedades mecânicas de solos, utilizando diferentes combinações de materiais aplicáveis em obras geotécnicas.

A adição de materiais aglutinantes, como o cimento, no solo produz um aumento significativo nas propriedades de resistência, deformação e permeabilidade, atendendo aos requisitos em diversas aplicações (BALDOVINO et al., 2020). Isso se deve ao fato de que o cimento atua como um agente de ligação, apresentando características que garantem bons índices de ganho de resistência, conforme demonstrado em estudo anterior por Consoli et al. (2009).

Outro campo de estudo em crescente destaque, que busca otimizar e tornar mais sustentável esse reforço, é a utilização de fibras poliméricas, que possuem ampla aplicabilidade nas obras geotécnicas, pois apresentam boa tenacidade e flexibilidade, além de elevada resistência aos ataques de substâncias químicas (TAYLOR, 1994 APUD FESTUGATO, 2008, P. 28).

Estudos anteriores consideraram os efeitos de diferentes tipos de fibras nas propriedades mecânicas do solo.

Fibras distribuídas aleatoriamente dentro de uma massa de areia melhoram as características de carga-deformação, criando uma malha interligada de fibras que distribuem cargas por toda a massa de solo através do atrito superficial entre fibra e partículas de areia (CONSOLI; FESTUGATO; HEINECK, 2009), conferindo maior tenacidade ao material.

As fibras de polipropileno desempenham um papel fundamental no reforço de solos e materiais cimentados, sendo amplamente utilizadas em engenharia geotécnica devido às suas propriedades benéficas, como não toxicidade, resistência à corrosão e alta resistência à tração (TAHA; FENG; AHMED, 2020). Diversos estudos têm explorado o impacto dessas fibras no comportamento mecânico dos materiais, mostrando que sua incorporação pode melhorar significativamente a resistência e a durabilidade de compósitos cimentados e solos reforçados (VENDRUSCOLO et al., 2004; CONSOLI, FESTUGATO e HEINECK, 2009; TAHA; FENG; AHMED, 2020; FEUERHARMEL, 2000; DONATO, 2007; CORREIA; ROCHA, 2021) .

O comprimento das fibras é um fator crucial na eficácia desse reforço. Aumentar o comprimento das fibras resulta em um ganho considerável de resistência mecânica, até atingir um ponto em que o aumento adicional se torna assintótico (GRAY & OHASHI, 1983; ULBRICH, 1997; SANTONI ET AL.; 2001; HEINECK, 2002 apud VENDRUSCOLO et al., 2004).

Além do comprimento, o diâmetro das fibras também influencia diretamente o desempenho. A relação entre comprimento e diâmetro, conhecida como índice de aspecto (l/d), é essencial para garantir a resistência ao arrancamento das fibras sob tensões de cisalhamento. Fibras com um índice de aspecto elevado possuem maior eficiência no reforço, pois permitem a total mobilização da resistência à tração antes do arrancamento (FESTUGATO, 2008)

Apesar das inúmeras aplicações, não existem metodologias de dosagem baseadas em critérios racionais para solos cimentados reforçados com fibras, como é o caso da tecnologia do concreto, onde a relação água/cimento desempenha um papel fundamental na avaliação da resistência alvo (CONSOLI; BASSANI; FESTUGATO, 2010). Isso ressalta a necessidade de conduzir estudos específicos sobre dosagens em diferentes tipos de solos, levando em consideração suas características individuais a fim de compreender seu comportamento, que é influenciado por diversos fatores.

Este estudo propõe identificar a influência das porcentagens de adição de cimento Portland e de fibras de polipropileno na resistência de um solo arenoso, proveniente da região Norte do Brasil. Além disso, será realizada uma análise da microestrutura dos corpos de prova com diferentes dosagens. Os parâmetros serão avaliados na condição de utilização com 100% da faixa de umidade ótima, utilizando esse cenário para a aplicação do melhoramento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O processo experimental foi realizado em duas etapas. A primeira consistiu na caracterização dos materiais utilizados, incluindo o solo e o cimento, além da apuração das especificações técnicas das fibras de polipropileno. Em seguida, foram feitos os cálculos e definições com base na massa de solo seco e cimento para a moldagem de cada corpo de prova que foi rompido na idade de 7 dias de cura, através do ensaio de resistência axial simples para determinar sua resistência à compressão. Também foram preparadas as amostras e realizadas análises microscópicas por meio do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

2.1. Materiais

O solo utilizado neste estudo é um solo arenoso com baixo teor de argila, obtido da região metropolitana de Belém do Pará. A amostra foi coletada em estado perturbado em quantidade suficiente para atender a todos os objetivos do experimento, e transportada ao Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA) para análise preliminar.

Após a coleta, o solo foi armazenado em recipientes selados, a fim de evitar contaminação e variações nas suas características físicas em decorrência da exposição ao ambiente externo. O solo foi inicialmente submetido a um processo de secagem em estufa a 100°C por 24 horas. Após a secagem, o solo foi peneirado em malha de 4,75 mm, com o intuito de separar impurezas e auxiliar na separação dos grãos para o destorroamento, sem que nenhum material ficasse retido. Em seguida, o solo foi destorroado manualmente, preservando o tamanho natural das partículas, utilizando um almofariz e mão de gral revestida com borracha. O solo destorroado foi então homogeneizado, misturando-se porções de diferentes pontos da amostra para garantir a uniformidade e representatividade do material nos ensaios experimentais.

Foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV - ARI), fornecido pela empresa Cimento Nacional, armazenado em laboratório. Optou-se pela escolha desse tipo de cimento devido sua elevada capacidade de resistência inicial possibilitando a realização dos ensaios após 7 dias.

As fibras monofilamentares de polipropileno foram empregadas ao longo desta investigação para melhorar o solo cimentado, quando necessário. Elas possuem 24 mm de comprimento, 0,023 mm de diâmetro, índice aspecto +/- 1.040, Gs = 0.90, na cor branca.

2.2. Caracterização dos Materiais

Para a caracterização do solo, foram realizados os ensaios de determinação da massa específica dos grãos conforme a NBR 6458, análise granulométrica de distribuição de grãos de acordo com a NBR 7181 e ensaio de compactação segundo a NBR 7182. A determinação da massa específica foi realizada com a utilização de um picnômetro, no qual o solo seco foi inserido para calcular a densidade dos grãos. Na análise granulométrica, o solo passou por peneiramento para classificar a distribuição dos tamanhos das partículas. O ensaio de compactação, por sua vez, foi executado moldando amostras em diferentes teores de umidade,

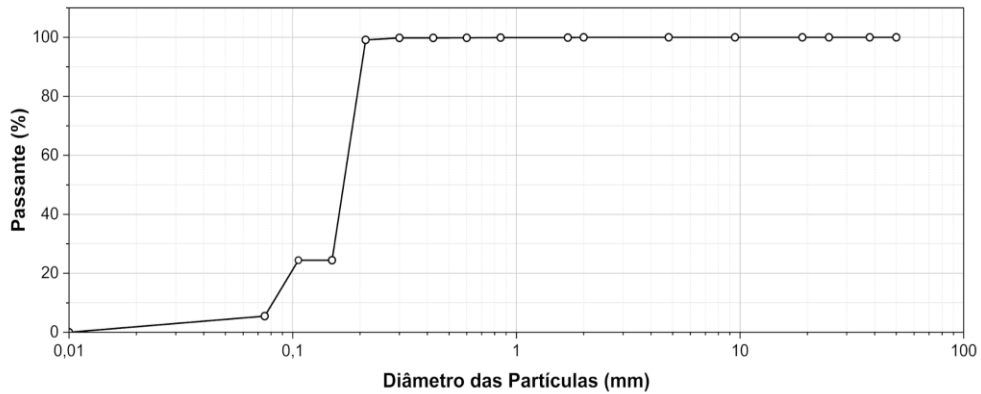
o que permitiu identificar a relação entre densidade seca e teor de umidade, bem como determinar o teor ótimo de umidade e a densidade máxima do solo. Os resultados dos ensaios de caracterização estão apresentados na Tabela 1, Figuras 1 e 2, respectivamente. A Figura 3 mostra uma imagem do solo utilizado no estudo.

Tabela 1: Propriedades Físicas do Solo Arenoso.

Propriedades do Solo	Símbolo	Valor
Porcentagem de Areia (%)	-	94,52
Porcentagem de Finos (<0,075mm) (%)	-	5,48
Peso Específico Ótimo (KN/m ³)	γ_d	14,46
Massa Específica (g/cm ³)	Ps	2,66

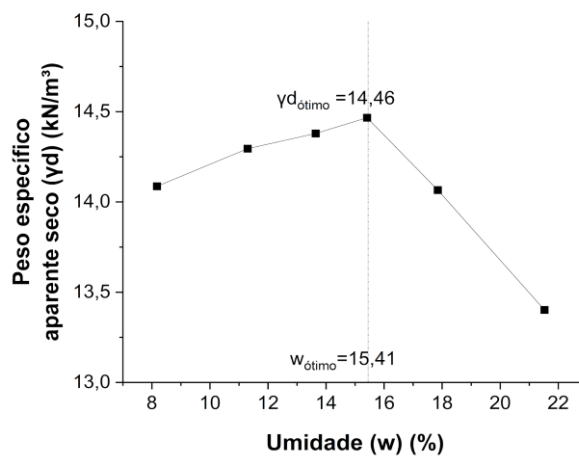
Fonte: Autores (2024).

Figura 1: Distribuição granulométrica do Solo.



Fonte: Autores (2024).

Figura 2: Curva de Compactação do Solo.



Fonte: Autores (2024).

Figura 3: Solo utilizado no estudo.



Fonte: Autores (2024).

Como observado na curva granulométrica, o solo é mal graduado e, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos, classificado como areia fina (S). Portanto, os ensaios de Limite de Liquidez e Plasticidade não foram realizados, uma vez que a areia é considerada um solo não plástico, não retendo água de maneira a apresentar esse tipo de comportamento.

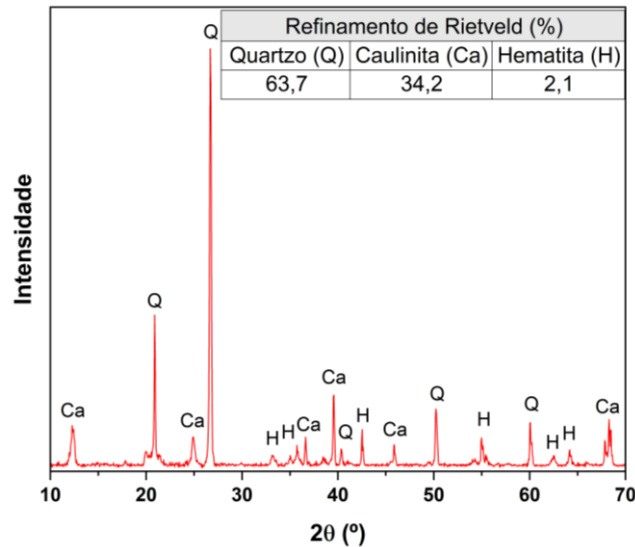
Os ensaios de caracterização mineralógica e área superficial foram realizados no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Para análise mineralógica foi realizado o ensaio de Difratomia de Raios X, utilizando um equipamento da marca Phillips, modelo X'Pert MDP com tubo de Raios X com radiação $\text{Cu K}\alpha$, com leitura padrão de $2\Theta = 5-75^\circ$ ao passo de $0,05^\circ/1s$, fendas de $1/2^\circ$ e janela de 20 mm. Os resultados brutos foram tratados no software High Score Plus, utilizando as fichas cristalográficas disponíveis nas bases de dados do *Crystallography Open Database* (COD) e *Powder Diffraction File* (PDF) para refinamento pelo método Rietveld.

Já para área superficial específica foi realizado o ensaio pelo método B.E.T. utilizando um equipamento da marca Quantachrome, modelo Nova 1000e, operando em atmosfera de nitrogênio líquido e nitrogênio gasoso 5.0, apresentando um resultado de $16,05 \text{ m}^2/\text{g}$ no solo utilizado.

Foram preparadas 10 g de amostra de solo por meio de peneiramento com malha de abertura #325 mesh para análise por Difratomia de Raios X. A Figura 4 apresenta o resultado da análise, destacando o quartzo (SiO_2) como o mineral mais abundante, com uma concentração

de 63,7%. A caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) representa 34,2% da amostra, enquanto a hematita (Fe_2O_3) representa 2,1%.

Figura 4: Difração de Raios X do solo.

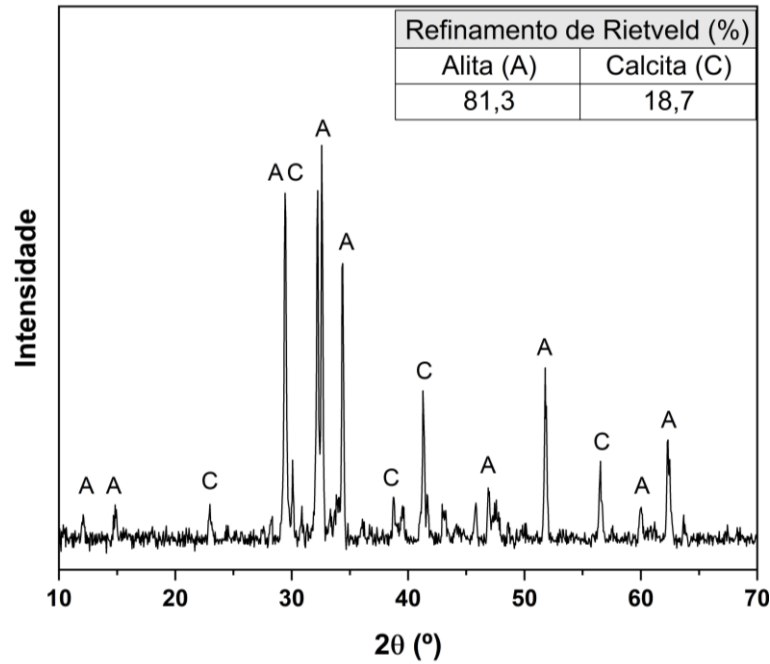


Fonte: Autores (2024).

O cimento apresentou características adequadas para o estudo, com massa específica (ME) de $3,11 \text{ g/cm}^3$, tempo de início de pega $\pm 1\text{h}10\text{min}$ e fim de pega de $\pm 2\text{h}10\text{min}$ e uma superfície de Blaine de $2,67 \text{ m}^2/\text{g}$.

Para a análise de Difractometria de Raios X do cimento CPV ARI, foram preparadas 10 g de material, seguindo o mesmo procedimento descrito anteriormente. A Figura 5 apresenta o resultado da análise, onde foram identificados 81,3% de alita (C_3S - silicato tricálcico) e 18,7% de calcita (CaCO_3).

Figura 5: Difração de Raios X do cimento.



Fonte: Autores (2024).

2.2. Métodos Experimentais

2.2.1 Moldagem e cura dos corpos de prova

Foram utilizados corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, preparados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará (UFPA). Inicialmente, o solo foi seco em estufa a 100°C por 24 horas, seguido pela mistura manual das combinações, conforme apresentado na Tabela 2, até atingir uma consistência uniforme. Após a mistura, uma amostra foi retirada para determinar o teor de umidade de cada corpo de prova. Para garantir uma boa representatividade estatística, foram moldados quatro corpos de prova para cada combinação.

Tabela 2: Combinações solo-cimento-fibra.

Nomeclatura	Fibras de Polipropileno	Cimento CPV ARI	Qtd CPs
0F3C	0%	3%	4
0,5F3C	0,5%	3%	4
0F5C	0%	5%	4
0,5F5C	0,5%	5%	4

Fonte: Autores (2024).

A amostra foi compactada em três camadas de alturas aproximadas, com escarificação entre as faces de contato no interior do molde cilíndrico. Após a moldagem, o corpo de prova

foi imediatamente extraído, e seu peso, diâmetro e altura foram medidos com precisão de aproximadamente 0,01g e 0,01cm, tendo como variação ± 1 cm em sua altura. Os corpos de prova foram armazenados em sacos plásticos para preservar o teor de umidade por 6 dias.

2.2.2 Resistência à compressão simples

Conforme observado em estudo anterior por Consoli, Bassani e Festugato (2023), o ensaio de compressão simples adaptado é o mais adequado para avaliar a influência da adição de fibras de polipropileno na resistência mecânica do solo-cimento, sendo, portanto, o principal ensaio realizado nesta pesquisa.

Os corpos de prova (CP) foram submersos em água 24 horas antes do ensaio de resistência a compressão simples, visando a saturação eliminando a sucção capilar e estabilizando a poro pressão. Imediatamente antes da realização do ensaio, os corpos de prova foram retirados do tanque e secos superficialmente com pano absorvente. Após isso, o teste foi realizado e a carga máxima suportada pela amostra foi registrada.

Nos resultados das resistências, foram analisadas a normalidade e a homocedasticidade dos dados. Como as variáveis apresentaram distribuição normal e homogeneidade das variâncias, foi realizada uma análise de variância de uma via (ANOVA de uma via), com teste Post Hoc de Tukey, devido à presença de mais de duas condições experimentais. Diferenças foram consideradas significativas quando $P < 0,05$.

2.2.3 Análise de Microestrutura

Após o ensaio de resistência à compressão simples, foram coletados pequenos fragmentos da parte central dos corpos de prova (CP), com peso máximo de 0,5 g e dimensões de até 1,0 cm, para a realização do teste de microscopia eletrônica de varredura (MEV). O processo de hidratação foi interrompido pela imersão das amostras em álcool isopropílico 99,80% por cinco minutos, com o objetivo de eliminar a água livre presente nos poros. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a $100 \pm 5^\circ\text{C}$ por 24 horas e armazenadas para envio à análise, que foi realizada no LACER da UFRGS.

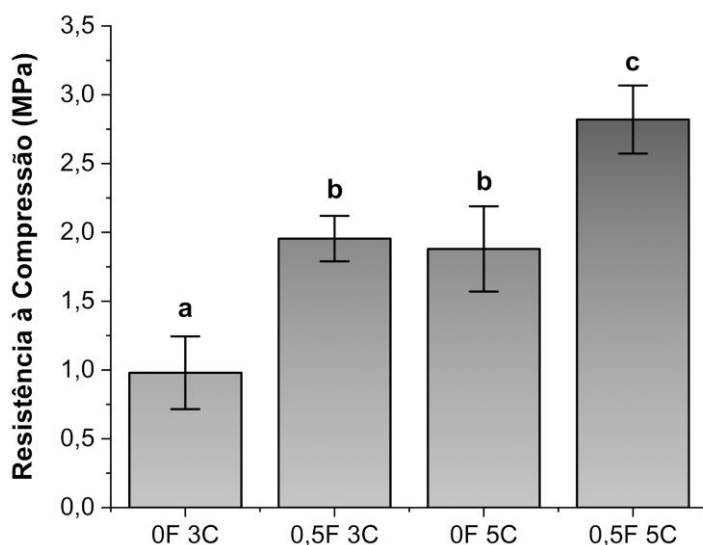
A microscopia foi conduzida utilizando um microscópio Carl Zeiss, modelo EVO MA10, com magnificação de 500X e 1000X.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Influência da adição de cimento e fibras na resistência à compressão simples

Os resultados do ensaio de resistência mecânica são apresentados na Figura 6, onde estão expostas as resistências das quatro combinações da matriz experimental.

Figura 6: Resistência à compressão simples para os corpos de prova com e sem adição de fibras.



Fonte: Autores (2024).

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão para as diferentes composições de solo-cimento indicam que tanto o aumento no teor de cimento quanto a adição de fibras de polipropileno contribuem significativamente para a melhora na resistência mecânica do compósito.

Em relação a variação do quantitativo de cimento, houve um crescimento de 0,98 MPa na resistência conforme a maior adição do ligante. Esse comportamento pode ser explicado pelas propriedades aglutinantes do cimento, que proporcionam uma melhor coesão entre as partículas do solo. O aumento da resistência mecânica das misturas está associado tanto aos componentes presentes no cimento quanto aos compostos formados durante o processo de hidratação, como o silicato tricálcico ($\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO}$), que promove altos ganhos de resistência em curtos períodos de cura, e o silicato dicálcico ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$), responsável por ganhos mais significativos em períodos mais longos. O aumento de resistência do solo com adição de cimento foi considerado satisfatório, mesmo com a areia em estudo sendo mal graduada (Figura 1). Conforme apontado

por Feuerharmel (2000), areias cimentadas com distribuição granulométrica desfavorável apresentam menores ganhos de resistência quando comparadas às bem graduadas.

Com a adição de 3% e 5% de cimento combinados a 0,5% de fibra, o compósito apresentou um aumento de 0,9 MPa e 0,86 MPa, respectivamente, na resistência mecânica em relação ao compósito sem adição de fibras. Esses resultados indicam que quanto maior o teor de cimento, menor é a contribuição proporcional das fibras para o ganho de resistência. Ou seja, o ganho mais expressivo decorre da cimentação, enquanto as fibras otimizam e melhoram esse ganho, conferindo ao material outras propriedades, como a ductilidade, reduzindo a fragilidade da mistura solo-cimento. Assim, as fibras de polipropileno não apenas contribuem para o aumento da resistência, mas também alteram significativamente o comportamento do material no momento da ruptura, devido à interação solo-fibra. Essa constatação pode ser visualizada em estudos anteriores como Illston, 1994; Feuerharmel, 2000; Donato et. al, 2004 e no corpo de prova rompido com adição de fibra, através de constatação visual, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7: Corpo de prova com adição de fibra após ruptura.

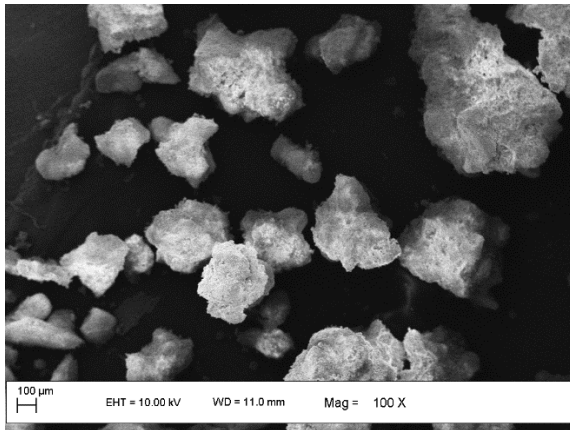


Fonte: Autores (2024).

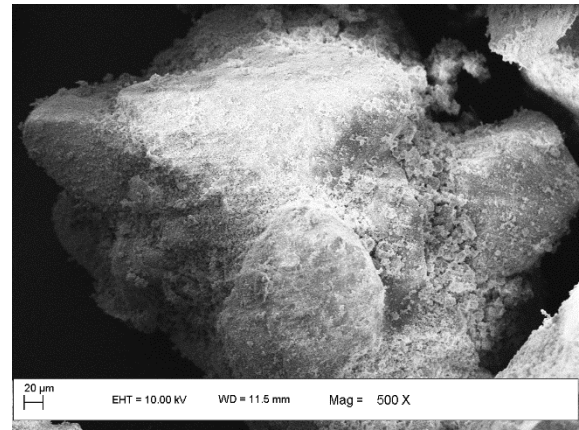
3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O MEV foi realizado nas quatro misturas do programa experimental. As Figuras 8.1 e 8.2 apresentam, respectivamente, os resultados para as misturas 0F3C e 0F5C, com magnificações de 100x, 500x e 1.000x. O ensaio foi conduzido de acordo com os procedimentos descritos na seção de metodologia deste trabalho.

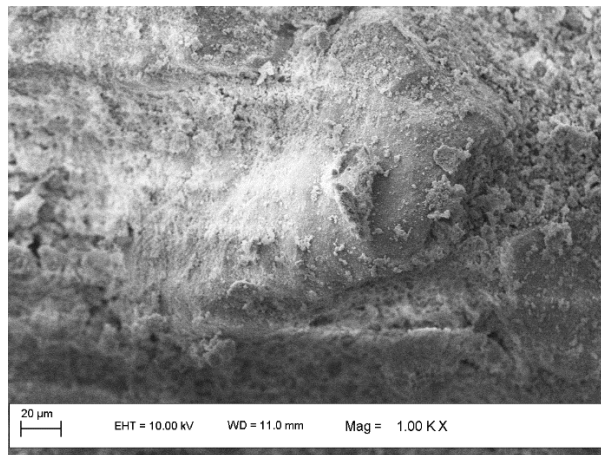
Figura 8.1: Microscopia de Varredura Eletrônica da mistura 0F3C.



a) Magnificação 100x.



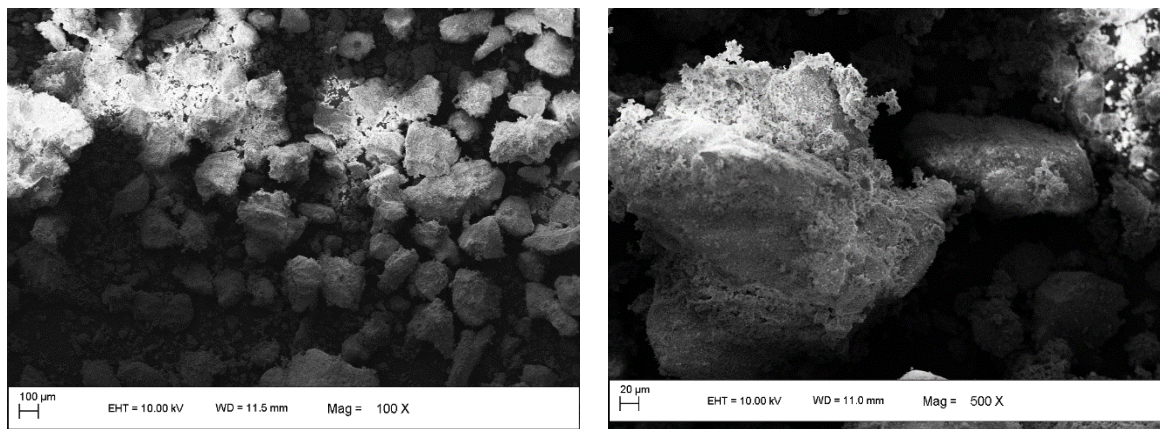
b) Magnificação 500x.



c) Magnificação 1.000x.

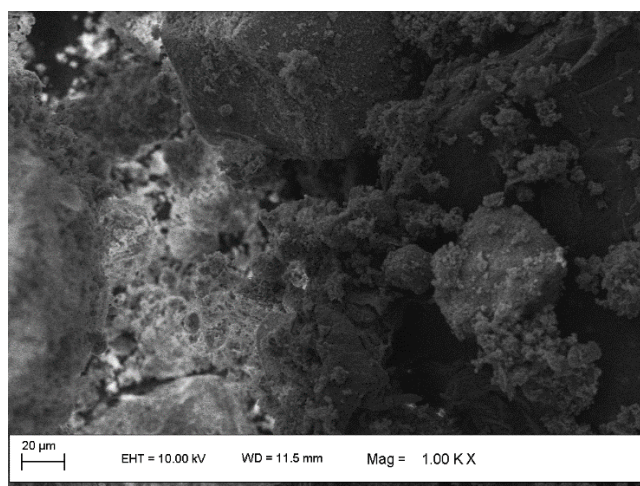
Fonte: Autores (2024).

Figura 8.2: Microscopia de Varredura Eletrônica da mistura 0F5C.



a) Magnificação 100x.

b) Magnificação 500x.



c) Magnificação 1.000x.

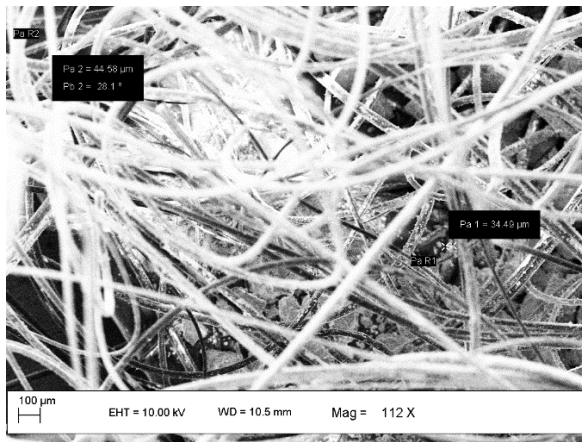
Fonte: Autores (2024).

Nas Figuras, observa-se uma microestrutura com matriz de solo cimentada, onde a formação de produtos de hidratação do cimento, como silicato de cálcio hidratado (CSH), é predominante. O CSH atua como um agente ligante, preenchendo vazios e criando uma estrutura mais densa e coesa. A presença de microfissuras e porosidade é comum em amostras com menores teores de cimento, especialmente em torno das partículas de solo, onde a ligação é menos intensa. Já nas amostras com 5% de cimento, a maior formação de CSH contribui para a redução dos espaços vazios, tornando a matriz menos porosa, como observado nas imagens de microscopia.

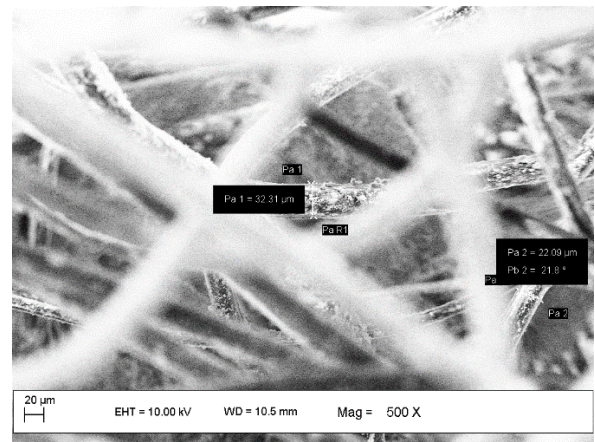
Nas amostras de solo-cimento reforçadas com fibras, ilustradas nas Figuras 9.1 e 9.2, a análise microestrutural por MEV evidencia as fibras de polipropileno incorporadas aleatoriamente na matriz de solo cimento.

Nessas amostras, também se identificam formações de produtos de hidratação, como o CSH. As imagens evidenciam as fibras envolvidas e bem aderidas à matriz. A interação entre o solo e as fibras é um aspecto crucial para a performance mecânica do compósito, pois afeta a transmissão de tensões entre as fibras e a matriz. Além disso, as imagens revelam fibras dispostas em múltiplas direções dentro da matriz, o que favorece uma resistência mais uniforme ao longo do compósito. Esse arranjo permite que as fibras funcionem como travas internas ao material, restringindo o movimento relativo das partículas de solo sob carga compressiva e, conseqüentemente, aumentando a coesão da estrutura.

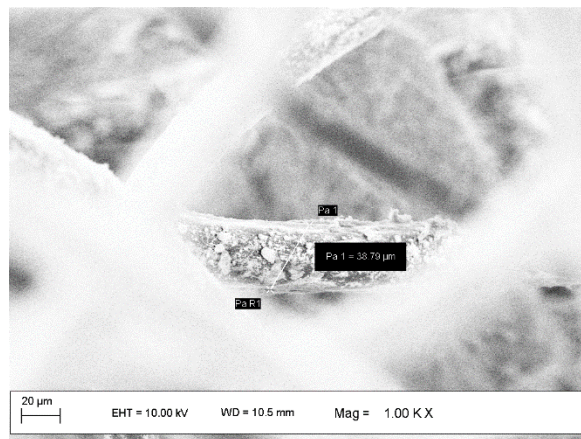
Figura 9.1: Microscopia de Varredura Eletrônica da mistura 0,5F3C.



a) Magnificação 100x

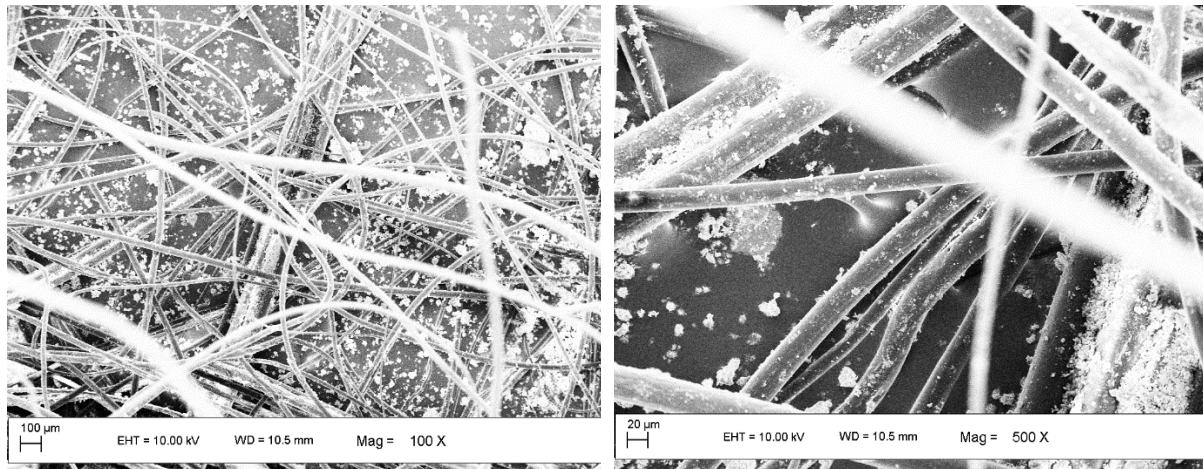


b) Magnificação 500x



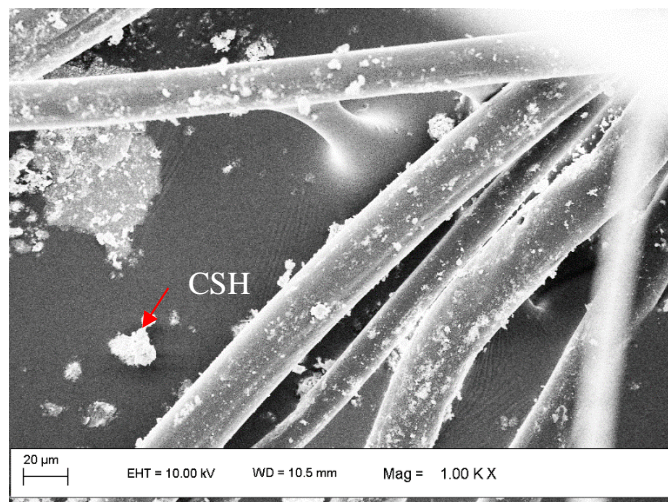
c) Magnificação 1.000x

Figura 9.2: Microscopia de Varredura Eletrônica da mistura 0,5F5C.



a) Magnificação 100x.

b) Magnificação 500x.



c) Magnificação 1.000x.

Fonte: Autores (2024).

4. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstram a eficácia do uso de fibras de polipropileno no aprimoramento de solos arenosos cimentados, melhorando tanto as propriedades mecânicas quanto o comportamento microestrutural na interação dos materiais do compósito.

A adição da matriz cimentícia resultou em um ganho significativo na resistência à compressão simples, enquanto que a inclusão de fibras de polipropileno além de conferir um aumento de

resistência também conferiu maior ductilidade ao material alterando de forma expressiva o seu comportamento durante a ruptura.

A combinação de cimento e fibras, nos teores testados neste estudo, mostrou-se uma técnica eficiente para o melhoramento de solos, especialmente em regiões com características semelhantes às do solo arenoso estudado. Além disso, os resultados indicam a viabilidade prática dessa solução em obras de infraestrutura.

5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões de temas para pesquisas futuras sobre melhoramento de solos cimentados com fibras:

- Realização de ensaios triaxiais em estudos futuros, os quais permitirão uma avaliação mais detalhada da resistência ao cisalhamento e do desempenho sob diferentes condições de confinamento;
- Analisar o impacto de diferentes de teores de fibra em compósitos de solo cimento;
- Avaliar como variações no índice de aspecto da fibra e sua orientação influenciam seu comportamento mecânico;
- Estudo para investigar o comportamento pós pico de solos cimento reforçados com fibras;
- Avaliar o desempenho de outros tipos de em comparação às fibras de polipropileno, analisando a influência no comportamento mecânico, durabilidade e custo-benefício.

6. BIBLIOGRAFIA

1. AL ALAWI, A. S. et al. Enhancement of the existing soil strength using the waste materials as a stabilization resource for sustainable development. **Materials Today: Proceedings**, 24 ago. 2023.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 65: **Cimento Portland – Determinação do tempo de pega**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 76: **Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: **Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. Versão corrigida.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 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, 2017. Versão corrigida 2.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: **Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. Versão corrigida 2.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: **Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. Versão corrigida.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: **Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. Versão corrigida.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
11. BALDOVINO, J. DE J. A. et al. Variáveis que influenciam na resistência à tração e à compressão simples de dois solos sedimentares estabilizados com cimento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 2, p. e-12615, 24 jul. 2020.

12. CAMACHO, M. E. et al. Morphology and characteristics of eight Oxisols in contrasting landscapes of Costa Rica. **CATENA**, v. 197, p. 104992, 1 fev. 2021.
13. CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 243. 2005.
14. CONSOLI, N. C.; ARCARI BASSANI, M. A.; FESTUGATO, L. Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 4, p. 344–351, ago. 2010.
15. CONSOLI, N. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; COOP, M. R. Performance of a fibre-reinforced sand at large shear strains. **Géotechnique**, v. 57, n. 9, p. 751–756, nov. 2007.
16. CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. Strain-hardening behaviour of fibre-reinforced sand in view of filament geometry. **Geosynthetics International**, v. 16, n. 2, p. 109–115, 1 abr. 2009.
17. CONSOLI, N. C. et al. Uplift behavior of plates embedded in fiber-reinforced cement stabilized backfill. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 35, p. 107–111, dez. 2012.
18. CORREIA, N. DE S.; ROCHA, S. A. Reinforcing effect of recycled polypropylene fibers on a clayey lateritic soil in different compaction degrees. **Soils and Rocks**, v. 44, n. 2, p. e2021061520, 23 jun. 2021.
19. DIAMBRA, A. et al. Theoretical Derivation of Artificially Cemented Granular Soil Strength. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 143, n. 5, p. 04017003, 28 jan. 2017.
20. DONATO, M. **Medidas diretas de tensão em solo reforçado com fibras de polipropileno**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 162. 2007.
21. FESTUGATO, Lucas. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices aspecto**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 146. 2008.
22. FEUERHARMEL, Marcos Roberto. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 152. 2000.

23. ILLSTON, J. M. **Construction materials: their nature and behavior**. 2. ed. London: E & FN Spon, 1994. 518 p.
24. LADD, R. Preparing test specimens using undercompaction. **Geotechnical Testing Journal, West Conshohocken: ASTM International**, v. 1, n. 1, p. 16-23, Mar. 1978.
25. NOORASYIKIN, M. N. et al. Mechanical properties of Bermuda grass roots towards sandy and clay soil for slope reinforcement. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 128, p. 103261, 1 dez. 2022.
26. PRANDEL, L. V. et al. Mineralogical analysis of clays in hardsetting soil horizons, by X-ray fluorescence and X-ray diffraction using Rietveld method. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 95, p. 65–68, fev. 2014.
27. SILVA, F. M. et al. Chemical and mineralogical changes in the textural fractions of quartzite-derived tropical soils, along weathering, assessed by portable X-ray fluorescence spectrometry and X-ray diffraction. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 112, p. 103634, 1 dez. 2021.
28. SPECHT, Luciano Pivoto. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 151. 2000.
29. TAHA, M. M. M.; FENG, C. P.; AHMED, S. H. S. Influence of Polypropylene Fibre (PF) Reinforcement on Mechanical Properties of Clay Soil. **Advances in Polymer Technology**, v. 2020, p. 1–15, 19 maio 2020.
30. TAWORNPRUEK, S. et al. Properties of red Oxisols on calcareous sedimentary rocks in Thailand. **Geoderma**, v. 136, n. 3-4, p. 477–493, 13 jun. 2006.
31. TRAKOONYINGCHAROEN, P. et al. Properties of kaolins in red Oxisols and red Ultisols in Thailand. **Applied Clay Science**, v. 32, n. 1-2, p. 25–39, abr. 2006.
32. VENDRUSCOLO, M. et al. Comportamento mecânico de uma areia cimentada reforçada com fibras de polipropileno. **Geotecnia**, n. 102, p. 33–54, 21 nov. 2004.
33. ZHU, C. et al. Sandy soil based foam concrete with ultra-small pore structure through in-situ mechanical frothing. **Journal of Building Engineering**, v. 91, p. 109675, ago. 2024.