FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DO SOLO-CIMENTO AUTOADENSÁVEL ADICIONADO DE MICROFIBRAS SINTÉTICAS

Robson Raruo Nagata

2023 **CAMPO GRANDE|MS**

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA

MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DO SOLO-CIMENTO AUTOADENSÁVEL ADICIONADO DE MICROFIBRAS SINTÉTICAS

Robson Raruo Nagata

Trabalho de Conclusão de Curso do Mestrado Profissional apresentado na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.

Orientadora: Prof.ª. Dra. Ana Paula da Silva Milani

CAMPO GRANDE

AGOSTO / 2023

Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

FOLHA DE APROVAÇÃO

ROBSON RARUO NAGATA

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DO SOLO-CIMENTO AUTOADENSÁVEL ADICIONADO DE MICROFIBRAS SINTÉTICAS

Redação final do Trabalho de Conclusão de Curso, aprovado pela Banca Examinadora em 06 de setembro de 2023, na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do titulo de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.

Banca examinadora:

Dra. Ana Paula da Silva Milani - (Orientadora)

Dr. Andres Batista Cheung.

Dr. Daniel Anijar de Matos.

Dr. Alexandre Meira de Vasconcelos.

Dra. Andrea Naguissa Yuba.

Documento assinado eletronicamente por **Andres Batista Cheung**, **Professor do Magisterio Superior**, em 06/11/2023, às 14:53, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Ana Paula da Silva Milani**, **Professora do Magistério Superior**, em 06/11/2023, às 14:54, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Daniel Anijar de Matos**, **Professor do Magisterio Superior**, em 06/11/2023, às 16:35, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4440852** e o código CRC **3DDB5127**.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento à educação e o desenvolvimento profissional.

A todo o corpo docente de graduação e pós-graduação pelo ímpeto em ensinar, em especial Prof.ª. Dra. Ana Paula da Silva Milani, Prof. Dr. Andrés Batista Cheung e Prof. Dr. Daniel Anijar de Matos, pelos conselhos e acompanhamento em todo o percurso.

RESUMO

A viabilidade de uso do material solo-cimento depende do melhoramento das suas características físicas e mecânicas sob aspectos de durabilidade, controle de fissuração e do gasto energético na produtividade do sistema construtivo. Diante disto, este estudo analisou a influência da adição de microfibras de polipropileno frente a alteração do comportamento frágil do compósito, bem como a fluidez do solo-cimento pela adição de aditivo superplastificante para alcance do produto final solo-cimento autoadensável com fibras (SCAAF). Para tal, foi realizada a caracterização granulométrica do solo, a definição do intervalo de fluidificação para a obtenção do estado de autoadensabilidade através do ensaio de *Slump flow* adaptado, e a análise do comportamento do SCAAF por meio dos ensaios mecânicos de compressão simples, de tração por compressão diametral e de flexão por 4 pontos; e dos ensaios físicos de absorção de água e retração linear por secagem. O solo-cimento autoadensável com adição de fibras apresentou melhor desempenho físico e mecânico para as dosagens com teores de adição de cimento de 1:5 em massa de solo e aditivo superplastificantes de 1,2% em massa de cimento na consistência de espalhamento de 320 mm. A adição de fibras influenciou diretamente na massa específica aparente seca e na porosidade do material, consequentemente afetando negativamente à resistência a compressão simples e à tração, sendo relevante somente no estado pós-fissuração aumentando a tenacidade do SCAAF e reduzindo a fragilidade do material. O SCAAF apresentou capacidade de lançamento e conformação adequados para utilização em paredes monolíticas sem a necessidade de adensamento mecânico, apresentando resistência à compressão simples superior à 1,3 MPa aos 7 dias, podendo ser uma viável alternativa aos métodos construtivos compactados e um material com potencial de emprego em estruturas onde seja necessário a redução do comportamento frágil do solo-cimento.

Palavras-chave: fluidez, aditivo superplastificante, microfibras de polipropileno, ductibilidade.

ABSTRACT

The viability of using the soil-cement material depends on the improvement of its physical and mechanical characteristics under aspects of durability, crack control and energetic expenditure on building system productivity. Therefore, this study analyzed the influence of adding polypropylene microfibers on altering the brittle behavior of the composite, as well as the fluidity of the soil-cement by adding a superplasticizer additive to reach the final product, self-compacting soil-cement with fibers (SCAAF). To this end, the granulometric characterization of the soil was carried out, the fluidization interval for obtaining the state of self-compactability was defined using the adapted slump flow test, and the behavior of the SCAAF was analyzed using the mechanical tests of simple compression, diametrical compression tensile and 4-point bending; and the physical tests of water absorption and linear shrinkage due to drying. The self-compacting soil-cement with the addition of fibers showed better physical and mechanical performance for the dosages with cement addition contents of 1:5 by mass of soil and superplasticizer additive of 1.2% by mass of cement at the spreading consistency of 320 mm, the addition of fibers directly influenced the dry apparent specific mass and porosity of the material, consequently, negatively affecting the compression and tensile strength, being relevant only in the post-cracking state, increasing the toughness of the SCAAF and reducing the fragility of the material. The SCAAF presented adequate launching and forming capacity for use in walls, without the need of compaction, presenting compression strength higher than 1.3 MPa at 7 days, and may be a viable alternative to construction methods with compaction of the soil-cement mixture, and is also a material with potential use in structures where it is necessary to reduce the brittle behavior of soil-cement.

Keywords: fluidity, superplasticizer additive, polypropylene microfibers, fragility.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico Índice de plasticidade Limite de liquidez. 13

Figura 2 - Dinâmica para melhoramento de solo. 16

Figura 3 - Solo. 24

Figura 4 - Microfibra de polipropileno. 27

Figura 5 - Fatorial para dosagem de referência. 29

Figura 6 - Fatorial para dosagem de estudo. 29

Figura 7 - Ensaio *Slump flow* modificado aplicado no SCAA. 30

Figura 8 - Corpos de prova de SCAA na cura em câmera úmida. 32

Figura 9 - Ensaio de resistência à compressão simples aplicado no SCAA. 33

Figura 10 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral aplicado no SCAA. 34

Figura 11 - Painéis de SCAAF - a) TF-8, b) TF-7, c) TR-4. 41

Figura 12 – Extração de corpos de prova no painel de SCAAF. 41

Figura 13 - Estado de flexão pura do prisma. 42

Figura 14 - Identificação gráfica do comportamento *strain hardening*. 43

Figura 15 - Sistema de aquisição de dados para ensaio de flexão de 4 pontos. 44

Figura 16 - Instrumentação dos corpos de prova para ensaio variação dimensional nas idades de 1 e 4 dias. 46

Figura 17 - Calibração do pórtico para ensaio de variação dimensional nas idades de 7 à 28 dias. 47

Figura 18 - Medição dos corpos de prova no ensaio de variação dimensional. 47

Figura 19 – Massa e volume do SCAAF versus teor de adição de fibras. 49

Figura 20 - Resistência à compressão simples do SCAAF. 50

Figura 21 - Resistência à compressão simples em terços inferior, médio e superior do painel de SCAAF. 51

Figura 22 – Comparação dos valores médios de resistência à compressão simples aos 7 dias. 52

Figura 23 - Resistência à compressão simples do SCAAF à face do painel a 0º e 90º. 53

Figura 24 – Resultados do ensaio de flexão por 4 pontos aplicados no SCAAF. 55

Figura 25 - Gráficos característico força (kN) versus deformação (mm) do SCAAF durante processo de ruptura. 57

Figura 26 - Ruptura dos prismas de SCAAF. 58

Figura 27 – Retração linear do SCAAF. 59

Figura 28 – Variação média dimensional do SCAAF. 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 : Caracterização do solo. 24

Tabela 2: Caracterização Cimento CPV-ARI. 25

Tabela 3: Características técnicas Fiberstrand. 27

Tabela 4: Fator água/solo para estudo de dosagem do SCAA. 31

Tabela 5: ANOVA para *Slump Flow* adaptado do SCAA. 31

Tabela 6: Resistência à compressão simples característica do SCAA. 34

Tabela 7: Resistência média à tração por compressão diametral do SCAA. 35

Tabela 8: ANOVA para resistência média à compressão simples do SCAA. 36

Tabela 9: ANOVA para resistência média à tração por compressão diametral do SCAA. 36

Tabela 10: Teste de Tukey para resistência à compressão simples. 37

Tabela 11: Teste de Tukey para resistência à tração por compressão diametral. 37

Tabela 12: Capacidade de absorção de água do SCAA. 39

Tabela 13: Dimensões dos painéis de SCAAF no estado endurecido. 49

Tabela 14: Resultados de resistência à flexão do SCAAF aos 14 dias. 54

Tabela 15: Resultados de resistência à flexão do SCAAF aos 28 dias. 54

Sumário

AGRADECIMENTOS 5

RESUMO 6

ABSTRACT 7

LISTA DE ILUSTRAÇÕES 8

LISTA DE TABELAS 10

1. INTRODUÇÃO 12

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17

2.1 O COMPÓSITO SOLO-CIMENTO 17

2.2 AUTOADENSABILIDADE DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO 19

2.3 ADIÇÕES DE FIBRAS NOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS 22

3. MATERIAIS E MÉTODO 24

3.1 SOLO 24

3.2 CIMENTO 25

3.3 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE 26

3.4 MICROFIBRAS DE POLIPROPILENO 26

3.5 MÉTODO 28

4. ESTUDO DE DOSAGEM 29

5. CARACTERIZAÇÃO DO SCAAF 40

5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES 40

5.2 RESISTÊNCIA À FLEXÃO POR 4 PONTOS 42

5.3 VARIAÇÃO DIMENSIONAL 45

5.4 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO 49

6 CONCLUSÕES 61

7 REFERÊNCIAS 63

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil, conforme demonstram Gasques *et al.* (2014), consome entre 40% e 75% de toda a matéria prima extraída da natureza, sendo um expressivo agente degradante do meio ambiente. Este consumo exacerbado, muitas vezes é despendido de forma não racional e aliado à uma produção com demanda energética expressiva, torna o setor atual insustentável à longo prazo.

Este consumo tem crescido juntamente com o aumento populacional e o atendimento de suas necessidades, e mesmo que de forma questionável, conduziu à um favorecimento do avanço tecnológico e científico da civilização. Estes avanços, por sua vez, inseriram contextualmente o indivíduo como ser integrante e depende direto do meio ambiente, possibilitando assim, a sua percepção da necessidade de preservação e manutenção dos recursos naturais para que a sua própria existência tenha continuidade.

A implantação de sistemas construtivos e adoção de materiais sustentáveis originam-se desta necessidade, muitas vezes remetendo-se a técnicas construtivas e materiais primitivos, utilizados pela humanidade em diferentes épocas, porém substituídos frente a novas demandas e possibilidades de materiais e técnicas.

Dentre estes, o solo foi largamente utilizado como material de construção devido à grande disponibilidade e o baixo ou até mesmo inexistente nível de processamento para sua obtenção, compreendendo sistemas construtivos diversos com especificidades de acordo com a posição geográfica, que determina a disponibilidade de materiais e as necessidades a serem supridas, bem como a cultura e o desenvolvimento tecnológico do grupo o qual aplica o solo como material de construção.

Para Pinto (2002), solos são definidos como aglomerados de partículas imersos em líquidos e vazios preenchidos com ar, livres para se deslocar, respeitando a interação estrutural das partículas, com baixa ou pouca cimentação. Esta breve definição do material fomenta a percepção das características e limitações esperadas para estruturas com aplicação de solo como material de construção.

As técnicas tradicionais de construção com solo em geral não possuem aditivos ou processos além da compactação, que induzam a transformação de sua estrutura, ou mesmo, produza compósitos com propriedades superiores, limitando-se assim, a extrair à máxima resistência e estabilidade possível do solo através do aumento da interação entre suas partículas.

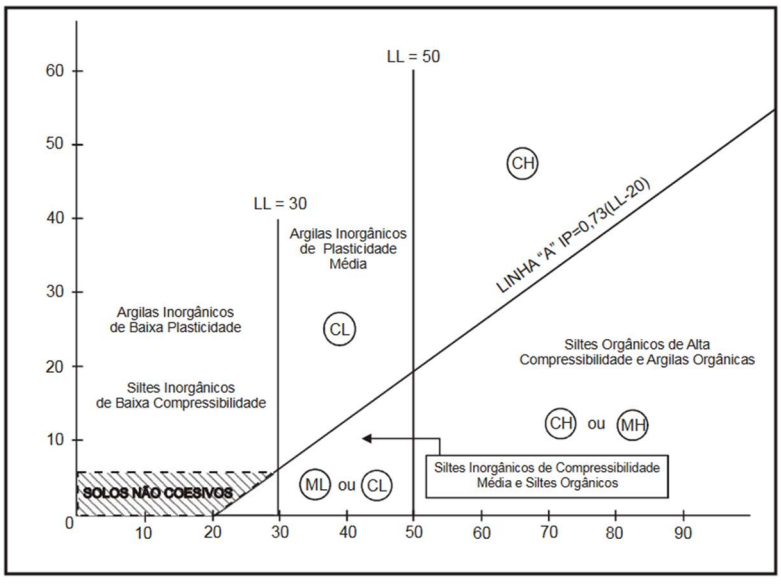
No entanto, para que exista uma correspondência entre o material processado e as características físico-mecânicas esperadas, o solo deve atender à pré-requisitos de composição como normalmente abordado no escopo de normas técnicas referentes ao tema.

A exemplo da ABNT NBR 17014 (2022, p.3), sobre a características físicas do solo para execução do sistema construtivo taipa de pilão, tem-se:

a) 100 % de material que passe na peneira com abertura de malha de 50 mm para a taipa com espessura maior que 20 cm;
b) 100 % de material que passe na peneira com abertura de malha de 19 mm para a taipa com espessura entre 12 cm e 20 cm;
c) 50 % a 80 % de material retido entre as peneiras com abertura de malha de 2 mm e 0,075 mm;
d) 20 % a 35 % de material que passe na peneira com abertura de malha 0,075 mm;
e) limite de liquidez ≤ 50%;
f) índice de plasticidade ≤ 25%.

Nota-se que, os itens a) e b), tratam da compatibilidade dimensional das partículas com a espessura de parede, garantido uma correta produção, utilização e acabamento da taipa; os itens c) e d), por sua vez, tratam especificamente das porcentagens de cada constituinte de solos, que devem estar presentes na mistura para que a interação interna seja adequada. Já os itens e) e f) podem representar qualitativamente o tipo de solo, auxiliando na restrição para utilização e caracterização dos mesmos, não aceitando o emprego, principalmente de siltes e argilas orgânicos ou inorgânicos com alta plasticidade e compressibilidade, isto pode ser mostrado conforme abaixo (Figura 1).

Figura 1 - Gráfico Índice de plasticidade Limite de liquidez.



Fonte: DNIT (2006).

A partir disso é possível afirmar que o solo como material de construção deve possuir proporções específicas de areia, silte e argila com propriedades físicas adequadas, e que quando estas não forem atendidas deve-se fazer correções para que a mistura alcance desempenho satisfatório, tanto sob os aspectos de resistência quanto de durabilidade, dentro da limitação do próprio material. Conforme afirmam Giorgi *et al.* (2018), é imprescindível a determinação das características granulométricas, além da plasticidade, retração e umidade ótima para que exista o pleno conhecimento da matéria prima, aumentando a confiabilidade do produto acabado, devendo sempre existir o hábito de realização de ensaios *in loco* ou laboratoriais para esta certificação.

Outro aspecto relevante sobre estruturas baseadas em solos é o comportamento frágil das mesmas, onde solicitações oriundas de esforços de trações, ou ainda, derivadas de flexões dos corpos gera abertura de fissuras, trincas e por fim, desconsolidação do material final.

Este comportamento não é exclusivo de construções com solos, a baixa resistência à tração é característica de elementos com comportamento frágil, o qual abrange também o solo compactado, tendo uma resistência à compressão simples maior que sua resistência à tração, isto devido ao tipo de interação entre seus componentes.

Quando submetido à esforços de compressão, inicialmente existe a tendência de acomodação e diminuição de vazios, onde o atrito entre as partículas irá atingir o seu limite, ocorrendo a ruptura a partir do esmagamento e deslizamento entre as partículas.

Por outro lado, quando o corpo é submetido à flexão ou tração, a interação entre os componentes do solo, nas regiões solicitadas por esforços de tração, é conferida ao maciço majoritariamente pela coesão devido à presença de argila que possui baixa capacidade cimentante, não absorvendo e retransferindo os esforços de tração às adjacências, o que causa a ruptura e desagregação da estrutura, e consequentemente prejudica a sua integridade.

Estas características inerentes ao solo como material de construção - resistência à compressão limitada, baixa resistência à tração além da sensibilidade na presença de água - fazem com que os sistemas construtivos à base de solo demandem uma tecnologia aplicada no tocante das adições e aditivos existentes para sua estabilização, mitigando as possibilidades de falhas para que o produto final possua durabilidade e segurança adequada.

Ainda, analisando globalmente a construção com solo é possível verificar que além das adições para o melhoramento do material, existem encaminhamentos para a eficiência do método construtivo.

Conforme Cristelo *et al.* (2012), as utilizações do solo como material de construção mais comuns baseiam se na pré-fabricação de adobes ou blocos de terra comprimida, os quais serão consolidados posteriormente com o auxílio de argamassas; e sistemas construtivos moldados in loco como a taipa de pilão e taipa de mão.

Nestes métodos de produção de estruturas com solo existe uma grande demanda energética para sua produção, podendo possuir ainda baixa eficiência produtiva.

Para a taipa de pilão, por exemplo, a consolidação da estrutura depende diretamente da energia de compactação aplicada ao material, refletindo diretamente em sistemas de formas robustos que devem além de conter as pressões horizontais devidas ao peso do material, devem também restringir o deslocamento horizontal quando sob compactação, otimizando o aproveitamento da energia imposta ao material para sua consolidação.

Para a pré-fabricação de blocos, conforme Neves e Faria (2011), enquanto a produção de adobes independe da compactação do material, demandando, porém, grande esforço humano, volumes de água consideráveis para a plastificação do solo e grandes áreas para a fabricação e cura dos adobes, a produção de blocos de terra comprimida demanda a mecanização da produção com o emprego de prensas.

Em ambos os materiais, adobes e blocos de terra comprimida, como existe a necessidade de pré-fabricação e cura de grande quantidade de elementos, para a posterior execução da estrutura, a demanda de mão de obra e tempo de execução é expressiva, fatores que prejudicam a eficiência e a implantação efetiva destes sistemas executivos.

É indiscutível, no entanto o potencial sustentável da construção com enfoque em solo, necessitando da implementação sistemática de técnicas construtivas energeticamente mais eficientes, aliadas a complementos capazes de induzir o melhoramento físico e mecânico do material terra; facilitando assim, a sua utilização de forma adequada, podendo aumentar sua durabilidade e adaptabilidade à empregos antes somente destinados à materiais tidos como convencionais no setor da construção.

Assim, para a aplicação de sistemas construtivos com base em terra com menor impacto ambiental e energético mostra-se viável o emprego do solo-cimento autoadensável (SCAA), aplicando-se uma dinâmica para o melhoramento e redução de efeitos adversos presentes nos sistemas construtivos tradicionais com base em solo (Figura 2).

Figura 2 - Dinâmica para melhoramento de solo.

Fonte: Próprio autor (2023).

Conforme Durante *et al.* (2022), o sistema construtivo com base em SCAA caracteriza-se pela aplicação de uma massa líquida de solo, cimento, água e aditivos capaz de moldar-se em formas sem a necessidade de compactação ou vibração. Os autores ainda afirmam que comparativamente com sistemas construtivos usuais de terra, o SCAA apresenta maior agilidade executiva, mantendo suas principais vantagens econômicas e ambientais como: a aplicação de matéria prima local, baixo consumo de cimento e emissão de CO_2, além da possibilidade de incorporação de resíduos industriais, da agricultura e da construção civil.

Apesar de inovador, o SCAA ainda necessita de estudos para mitigação de efeitos negativos presentes no sistema construtivo, como por exemplo os indicados por Milani e Barboza (2016) e Callejas *et al.* (2022), onde o SCAA tende a apresentar elevadas taxas de absorção de água por capilaridade, bem como maior suscetibilidade à retração.

Assim, o **objetivo geral deste trabalho** foi estudar as modificações das propriedades físico-mecânicas do solo como material de construção com a incorporação de aditivo químico e microfibras sintéticas no compósito solo-cimento autoadensável.

Os objetivos específicos foram:

- Avaliar a influência do cimento, aditivo superplastificante e microfibras de polipropileno no comportamento físico-mecânico do solo-cimento autoadensável;
- Verificar a viabilidade técnica para o emprego de solo-cimento autoadensável adicionado de fibras de polipropileno em paredes monolíticas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O COMPÓSITO SOLO-CIMENTO

A necessidade da utilização de material com grande disponibilidade, como o solo, aliado a uma otimização logística e econômica direcionou a pesquisas e processos para o melhoramento não só de suas propriedades mecânicas, mas também de sua estabilidade física e consequentemente sua durabilidade. Estes processos normalmente baseiam-se em adições de aglomerantes quimicamente ativos, mais comumente cimento e cal.

Rocha e Rezende (2017) mostram que estes aglomerantes induzem reações nos componentes dos solos, possuindo variações de respostas conforme a composição do solo. As autoras afirmam que o cimento como aglomerante, possui melhor desempenho quando em adição para solos granulares, de baixos teores de argilas, enquanto argilas podem apresentar bons resultados quando tratados com cal, devido principalmente a dois efeitos:

-Trocas iônicas entre a cal hidratada e as partículas argila que induzem a floculação e aglomeração, alterando a textura do solo que refletirá na estabilidade da resistência e umidade, consequentemente na trabalhabilidade e controle volumétrico;

- Reações pozolânicas entre a cal hidratada e os argilominerais, que produzirão silicatos de cálcio hidratados (CSH) e aluminatos de cálcio hidratados (CAH), formando uma matriz cimentada unindo as partículas do solo.

Quanto à adição de cimento, conforme Sanbonsuge *et al*. (2017) *apud* Balbo (2007), existe uma subclassificação no produto gerado pela adição de cimento em solos, sendo solos melhorados com cimento o produto obtido com o intuito de controle de deformação e plasticidade, ou seja, sua estabilidade física sem foco direto no aumento da rigidez. Os teores usuais de adição de cimento são na ordem de 2 à 4% em massa, ponto de diferenciação com o solo-cimento, onde o aumento das propriedades mecânicas da mistura é resultado esperado a partir de maiores teores de adição de aglomerantes.

Para Neves e Faria (2011) a adição de aglomerante, seja cal ou cimento, aprimora a resistência, durabilidade e trabalhabilidade, sendo os teores de adição de cimento variáveis conforme a técnica construtiva adotada, usualmente compreendendo os teores de 8,5% à 18% em massa. Mesmo que para o solo-cimento, os teores de adições sejam expressivamente superiores aos teores de adição do solo melhorado com cimento, as autoras afirmam que ainda

assim, a parcela de maior representatividade na resistência do solo com aglomerante é proveniente da interação entre partículas, as quais pode ser otimizada pelo processo de compactação do material, diminuindo vazios e aumentando a área de contato entre os componentes.

Comparativamente com materiais convencionais de construção, o solo-cimento mostra-se uma alternativa viável para emprego de material com menor impacto ambiental, podendo ainda sim, possuir resistência e durabilidade adequadas com aplicação de teores de adições otimizadas em conjunto com métodos construtivos e aplicações adequadas.

Para Cordeiro *et al.* (2012) *apud* Myrrha (2003), o solo-cimento é uma evolução dos materiais empregados nos sistemas construtivos tradicionais com terra. A consolidação do solo, antes baseada na presença da argila na mistura, um aglomerante natural, porém com pouca estabilidade em especial na presença de água, passa a ser conferida pela adição do cimento, um aglomerante artificial, com propriedades uniformes e conhecidas.

Apesar desta melhora considerável dos solos, com menor impacto ambiental que os sistemas construtivos tradicionais, a adição do cimento Portland ao solo para a produção de solo-cimento é ponto de atenção no aspecto ambiental devido ao alto consumo de calcário para sua produção e a grande liberação de gás carbônico na atmosfera na sua produção.

Estima-se, conforme Langaro *et al.* (2017), que para cada tonelada de cimento produzido, consome-se 1,5 toneladas de calcário e produz-se 1 tonelada de gás carbônico. Conforme os mesmos, uma alternativa viável para o cimento Portland, seria a utilização de cimentos álcali ativados (CAT), constituídos principalmente de subprodutos industriais, eliminando o consumo de calcário e ainda reduzindo em aproximadamente 80% a emissão de gás carbônico. Porém ainda necessita de estudos mais aprofundados para a sua aplicação.

Assim, o material solo-cimento como material de construção, além da preocupação ambiental, mesmo apresentado como uma evolução dos métodos construtivos com terra, necessita de melhorias principalmente em relação à otimização da utilização do aglomerante para o ganho de resistência à compressão e aumento da resistência à tração e tenacidade deficientes, resultantes do comportamento frágil do material.

Para a otimização do aumento da resistência minimizando a adição de cimento Portland, conforme Caldas *et al.* (2021), a substituição parcial do cimento por adições minerais pozolânicas como a sílica ativa, metacaulim ou cinza volante, que são subprodutos da indústria, além de melhoramento do aspecto ambiental, ainda podem favorecer.

As adições pozolânicas são adições minerais que apresentam em sua composição sílica e alumínio na forma amorfa, e estes compostos quando em adição na pasta de cimento, na presença de água e cal livre, podem fazer o aproveitamento do hidróxido de cálcio, combinam-se e formando compostos como silicatos e aluminatos de cálcio conferindo resistência à matriz cimentícia, conforme descrito por Dallacort *et al.* (2002).

Lima *et al.* (2011) afirmam que a atividade pozolânica é lenta, podendo propagar-se por meses, sendo que a reação se inicia após o fim da pega do cimento, estendendo-se até que toda pozolana reaja com o hidróxido de cálcio livre na mistura, salientando ainda, que quanto mais vítrea e mais fina for a granulometria da pozolana, mais eficiente e mais rápido serão as reações de formação de compostos estáveis com poder aglomerante.

Existem diversas fontes disponíveis de compostos com capacidade pozolânica, produtos industrializados destinados à construção civil, ou ainda, subprodutos de processos industriais e resíduos da construção civil, o que pode ser um fator de extrema importância do ponto de vista ambiental, pois além de poder fazer a destinação de subprodutos ou resíduos de forma eficaz, ainda pode atuar como substituto de aglomerantes com maior fator de degradação ambiental como o cimento.

As adições pozolânicas em substituição parcial à adição de cimento no solo-cimento, no entanto deve ser realizada de forma que não impacte negativamente no sistema construtivo.

Apesar do grande potencial ambiental pela diminuição de consumo de cimento e aplicação de resíduos industriais, por possuir uma reação lenta podem não ser adequadas a aplicações onde seja necessário que as resistências iniciais sejam elevadas, seja por processos de desforma, manuseio ou ainda a necessidade de capacidade autoportante de estruturas.

2.2 AUTOADENSABILIDADE DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO

O estudo das propriedades autoadensáveis para compostos de cimento teve início na década de 80 no Japão, aplicados em concreto armado, onde o intuito era preencher as formas e envolver as armaduras sem à necessidade de processo de adensamentos mecânicos, dependendo única e exclusivamente da sua fluidez.

Conforme Tutikian e Molin (2011), para que a autoadensabilidade seja atingida é necessário que além da fluidez, a coesão e a resistência à segregação da mistura sejam adequadas, mantendo a correta dispersão dos agregados dentro da mistura e consequentemente

a interação uniforme dentro do compósito, gerando propagações de tensões mais uniformes ao longo da região solicitada da estrutura. Os autores ainda citam que existem diversas vantagens na adoção do sistema autoadensável, principalmente:

a) Aumento da produtividade da estrutura onde o lançamento do material autoadensável é mais rápido e elimina o adensamento mecânico;

b) Diminuição de mão de obra, devido à simplificação do lançamento e adensamento;

c) Melhora na durabilidade, devido à maior resistência contra falhas executivas.

Isto, pode elevar a eficiência executiva e econômica do sistema autoadensável, quando comparado com os sistemas de adensamento mecânicos convencionais.

Para o solo-cimento a autoadensabilidade, segundo Alcântara *et al.* (2013), pode ser atingida com o emprego de aditivo superplastificante que contribuirão para a fluidificação da mistura, possibilitando que para o adensamento e a consolidação seja dispensado o emprego de compactação, usualmente empregado na construção com solo-cimento compactado.

Além das vantagens já acima abordadas, em relação ao adensamento empregado, no caso da compactação necessária para a consolidação de sistemas construtivos com o uso de solo-cimento - a taipa de pilão e blocos de terra comprimida - impacta positivamente nos sistemas de fôrmas e contenções, que podem ser fator oneroso para os sistemas, além de exigirem um maior controle executivo e tecnológico, visto o emprego de maiores tensões para a consolidação.

Os aditivos superplastificantes utilizados em concreto autoadensável mostram-se adequados à utilização em compostos com solo-cimento, no entanto devem ser considerados o comportamento dos mesmos devido à distinção granulométrica entre o concreto e o solo-cimento. Segundo Milani e Barboza (2016), os aditivos superplastificantes com base química em policarboxilato são mais eficientes na fluidificação de misturas com maiores teores de finos, sendo estes mais adequados para o emprego no solo-cimento.

Milani e Silva (2018), sobre a análise da influência dos aditivos superplastificantes à base de policarboxilato, na faixa entre 0,8 e 1,6% e fator água/solo próximo do limite de liquidez, constataram a possibilidade do emprego de solo-cimento como uma mistura autoadensável. Segundo as autoras, que estudaram a influência de aditivos superplastificantes à base de policarboxilato em solo arenoso com teor de adição de cimento de 20% e fator

água/cimento de 0,23, e em solo argiloso com teor de adição de cimento de 30% e fator água cimento de 0,4. Os resultados mostraram que houve a melhora em ambas as dosagens em comparação com as misturas de referência sem aditivo plastificante, com o aumento da resistência à compressão e também a diminuição da absorção de água, duas características relevantes e benéficas ao método construtivo.

Diversos autores obtiveram resultados similares, com a melhoria das propriedades físicas e/ou mecânicas pelo uso de aditivos superplastificantes. Ferreira (2020) afirma que os aditivos superplastificantes não exercem influência direta nas reações cimentantes em idades avançadas, constatando que as maiores resistências alcançadas pelos traços compostos por solos arenosos são no ponto de início de liquidez da mistura decrescendo significativamente com o aumento do teor de água, por outro lado, para solos finos não houve variação significativa. Isto mostra que para misturas solo-cimento autoadensáveis, onde existe a predominância de solos arenosos, o menor teor de água na mistura que possibilite a fluidez, tenderá a apresentar a maior resistência à compressão simples.

Milani e Barboza (2016) também atestam a viabilidade da utilização de aditivo superplastificante a base de policarboxilato com o aumento da resistência à compressão simples à medida que o teor de água decresce, onde ainda, os teores de 1,2% de aditivo apresentaram resistências consideravelmente superiores às misturas com 0,8% de aditivo superplastificantes, pois demandam em contrapartida para o alcance do estado autoadensável, maiores teores de água, isto, ocorrendo tanto para os traços de solo-cimento de 1:8 quanto para 1:12 . Os autores, no entanto, ressaltaram que o solo-cimento autoadensável, durante a fase de endurecimento, apresenta tendência à retração e abertura de fissuras.

A cerca desta tendência, Callejas *et al.* (2022) descrevem que a retração apresentada pelo SCAA é resultado direto da necessidade de maiores teores de adição de água na mistura para o alcance adequado de autoadensabilidade, como também afirmam que o SCAA é suscetível ao aumento da absorção de água por capilaridade e a variação dimensional por perda de água durante a secagem. Estes fatores influenciam diretamente a estanqueidade e a fissuração do compósito e seu desempenho como sistema construtivo.

Assim, o estudo da eficiência na execução proporcionada pela efetividade na construção com paredes monolíticas de SCAA visa melhorar não somente o caráter sustentável do método executivo, bem como, favorecer o uso de adições que atuarão em frentes distintas. A ação de aditivos químicos complementa o melhoramento global não só do método executivo, mas também do material solo-cimento autoadensável que necessita de uma maior fluidez da

mistura para a sua distribuição homogênea, prevenindo a segregação e/ou exsudação, melhorando o caráter frágil, e consequentemente, podendo atuar também na contenção da retração e abertura de fissuras no estado endurecido.

2.3 ADIÇÕES DE FIBRAS NOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

A interação das partículas no compósito de solo-cimento, quando sobre ação de esforços de tração, passa a ser conferida principalmente pela cristalização do cimento dentro da mistura não mais dependendo da coesão da parcela argilosa do solo, sendo ainda insuficiente para a sua estabilização frente à estas solicitações. Enfatizando que mesmo que seja descaracterizado o uso com menor impacto ambiental do cimento na mistura, gerando teores de adições elevados, a fragilidade ainda estará presente por ser característica inerente aos compósitos gerados por cimento.

Este comportamento, responsável por diversas manifestações patológicas, principalmente como abertura de fissuras, trincas, infiltração e desagregação, impõe a necessidade da combinação com materiais que possuam, além de propriedades adequadas ao combate das solicitações não suportadas pelo matriz solo-cimento, compatibilidade química, física, mecânica e dimensional, neste caso, fibras naturais tratadas e fibras sintéticas.

Para Tessaro *et al.* (2015), as fibras naturais são implementadas em técnicas construtivas com solo desde o início da civilização, no entanto, existe uma incompatibilidade química destas quando adicionadas à mistura de solo-cimento. Silva *et al.* (2015) indicam que o ambiente alcalino da mistura em fase de hidratação pode atacar as fibras naturais ocasionando sua degradação, bem como um efeito secundário onde a cristalização induzida pelo cimento, gerando produtos que podem permear a estrutura das fibras, tornando-as mais rígidas e não mais contribuindo para o comportamento dúctil do compósito, consequentemente para a diminuição do seu comportamento frágil. Os autores afirmam, ainda, que as adições de fibras vegetais *in natura* podem alterar a porosidade e a capacidade de absorção de água da mistura, característica que podem prejudicar o comportamento físico-mecânico do compósito, gerando a necessidade de tratamento das fibras antes da implementação na mistura, exigindo maior controle tecnológico para a execução.

Assim, como afirmam Figueiredo *et al.* (2012), as fibras sintéticas são materiais com boa estabilidade química, menor impacto na trabalhabilidade da mistura fresca, maiores

resistência e durabilidade, tanto na fase de hidratação quanto na fase cristalizada do compósito, quando comparados com fibras naturais, tornando-as, a opção com maior viabilidade para adição e melhoramento do comportamento frágil do solo-cimento.

É esperado, conforme Junior e Garcez (2017), que a adição de fibras sintéticas na mistura solo-cimento diminua o comportamento frágil, melhorando significativamente sua capacidade de deformação, combatendo principalmente a manifestação patológica de fissuras, devido ao mecanismo de endurecimento.

Analogamente às estruturas de concreto armado, onde as tensões de tração são resistidas por material com resistência e ductilidade adequadas, a adição de fibras, em uma escala reduzida, também o fará, no entanto, devido à descontinuidade física das fibras dentro do material, as tensões de tração impostas serão contidas e retransmitidas à matriz solo-cimento, onde ocorreram novas derivações destas tensões às fibras adjacentes. Este espraiamento de tensões ocasionará grande número de microfissuras ao invés da ruptura abrupta, aumentado a capacidade de deformação do compósito antes da ruptura, caracterizando o efeito *strain hardening*, que poderá alterar a fragilidade do compósito, melhorando o desempenho físico e mecânico do mesmo.

Isto é confirmado por Silva e Boszczowski (2019) que verificaram que a adição de fibras aumenta significativamente a capacidade de carga à tração do solo-cimento compactado e ainda, que a adição de fibras de polipropileno em solo-cimento aumenta a coesão e ductilidade do material, sendo mais expressiva à medida que as deformações aumentam. É relatado, no entanto, que a adição de fibras se mostrou resistente à homogeneização da mistura tanto em laboratório quanto em campo, possivelmente devido à baixa adição de água, próxima da umidade ótima de compactação do solo, não sendo suficiente para o alcance da fluidificação e dispersão homogênea da mistura.

Esta deficiência na homogeneização das fibras no solo-cimento convencional para o solo-cimento autoadensável tende a ser mitigada devido ao maior fator água/cimento da mistura, bem como à presença do aditivo superplastificante. Este agente químico atuará no atrito entre as partículas de solo e as microfibras, favorecendo à sua dispersão uniforme no estado fresco dentro da mistura e possivelmente refletindo no melhoramento físico e mecânico do compósito no estado endurecido na contenção das manifestações patológicas presentes em materiais com comportamento frágil, como o solo-cimento.

3. MATERIAIS E MÉTODO

3.1 SOLO

O solo utilizado nesta pesquisa foi coletado no município de Campo Grande-MS (Figura 3), optando-se nesta pesquisa a adoção de solo arenoso, atendendo aos pré-requisitos conforme requerido pela ABNT NBR 17014:2022 sem a necessidade de correção granulométrica. As amostras coletadas foram identificadas, secas, destorroadas, peneiradas na peneira malha 4,8 mm e classificadas segundo Tabela 1.

Figura 3 - Solo.

Fonte: Próprio autor (2023).

Tabela 1: Caracterização do solo.

	Classificação	%
Distribuição granulométrica	Areia grossa (0,60 - 2,00 mm)	10,4
	Areia média (0,20 – 0,60 mm)	76,0
	Areia fina (0,06 – 0,20 mm	10,4
	Finos (0,002 – 0,06 mm)	3,2
	Material que passa na peneira 4,8 mm	100,00
	Material que passa na peneira 0,075 mm	21,3
Índices físicos	Massa específica dos sólidos (g/cm³)	2,84
	Limite de Liquidez	NL
Classificação AASHTO	A-2-4 Areia siltosa ou argilosa	

Fonte: Próprio autor (2023).

3.2 CIMENTO

O cimento adotado foi o CPV-ARI produzido pela Cimento Nacional, a adoção do cimento tipo CPV-ARI é devido ao baixo índice de adições que podem apresentar comportamento adversos à mistura com adições. Este tipo de cimento segundo a ABNT NBR 16697:2018 deve ser composto por 90 a 100% de clínquer e gesso, e 0 a 10% de material carbonático, sendo que para este fabricante o intervalo de composição do CPV-ARI está descrito na Tabela 2.

Tabela 2: Caracterização Cimento CPV-ARI.

Substância	Concentração (% em massa)
Silicato Tricálcico	20 - 70
Silicato dicálcio	10 - 60
Ferro-aluminato de cálcio	5 - 15
Sulfato de cálcio	2 - 8
Aluminato tricálcico	1 - 15
Carbonato de cálcio	0 - 25
Óxido de magnésio (livre)	0 - 6
Óxido de cálcio (livre)	0 - 2

Fonte: Cimento Nacional (2018).

Os teores de cimento devem ser compatíveis com as adições de fibras para que a ancoragem destas na matriz cimentícia permita que haja à transferência de esforços de tração, melhorando o comportamento frágil do solo-cimento autoadensável.

Assim, os teores de 1:8 e 1:12 (cimento: solo, em massa), mesmo estes, tendo atingidos satisfatoriamente tanto os requisitos de autoadensabilidade, como também a resistência mínima à compressão aos 7 dias de 1 MPa e absorção de água máxima de 18%, conforme descrito por Milani e Barboza (2016), podem não apresentar resultados adequados quando da adição conjunta com fibras de polipropileno com teores elevados de adição.

Já Milani, Paz e Dias (2016) identificaram que os teores 1:5 e 1:4 (cimento: solo, em massa) para solo-cimento autoadensável adicionado de microfibras de polipropileno e fibras de borracha apresentaram resistências físico-mecânicas adequadas para aplicação em paredes monolíticas, onde o comportamento autoportante é desejado na menor idade possível.

Assim, esperando o comportamento físico e mecânico adequado com otimização do teor de estabilizante cimentício, definiu-se os teores de cimento em 1:8 e 1:5 (cimento: solo, em

massa), sendo estes valores pertencentes ao intervalo médio propostos por Milani e Barboza (2016) e Milani, Paz e Dias (2016).

3.3 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

O aditivo superplastificante utilizado foi o MC-Powerflow 1108 do tipo 2 – RA2, de pega normal composto por polímeros policarboxilato (PCE) fabricado pela MC-Bauchemie. A dosagem recomendada pelo fabricante deve ser entre 0,2 e 5,0 % em massa de cimento, para o SCAA foram aplicados os teores de 0,8% e 1,2% em relação à massa do cimento, conforme apresentado por Milani e Barboza (2016).

A verificação quanto ao fator água/cimento necessário à autoadensabilidade foi feito conforme sugerido por Ferreira (2020), a partir do ensaio *Slump Flow* descrito pela ABNT NBR 15823-2:2017, no entanto, a autora sugere a adoção do cone de Abrams modificado, com diâmetros de abertura inferior de 50 mm e superior de 100 mm e altura de 150 mm, isto devido ao espalhamento do fluido viscoso sem tensão de escoamento tender ao infinito, sendo este comportamento adequadamente representado pelo ensaio *Slump Flow* modificado, onde o espalhamento deve dar-se entre 320 e 460 mm para SCAA.

Para este trabalho optou-se pelo teor de adição de água para o valor de espalhamento de 320 mm e de 370 mm, verificando a influência do fator água/solo no comportamento do SCAA, bem como a capacidade de autoadensamento para ambas as consistências

3.4 MICROFIBRAS DE POLIPROPILENO

Conforme descrito por Silva e Boszczowski (2019), para o uso de fibras de polipropileno no melhoramento da capacidade de cargas de solos, a adição de fibras deve ser limitada à 0,75% em massa do solo. Este limite superior do teor de adição é da ordem de 10 vezes o máximo teor indicado pelos principais fabricantes de 1,2 kg/m³, aproximadamente 0,06% em massa da mistura, contudo, a aplicação também se difere do objetivo proposto, o qual se atém ao melhoramento do comportamento frágil do solo.

Milani, Paz e Dias (2016), por outro lado, na avaliação da adição de fibras em solo-cimento autoadensável, identificaram que o teor limite de adição de fibras de 0,1% em relação

a massa da mistura apresenta melhora nas propriedades mecânicas e físicas reduzindo a fissuração, compatível com o intuito da pesquisa em questão

Assim, neste estudo foram adotadas microfibras de polipropileno *Fiberstrand* Viapol (Figura 4), a qual segue caracterização da Tabela 3.

Figura 4 - Microfibra de polipropileno.

Fonte: Próprio autor (2023).

Tabela 3: Características técnicas Fiberstrand.

Ensaio	**Medida**
Composição	Polipropileno 100% Virgem
Densidade	0,91 kg/m³
Comprimento da fibra	12 mm
Tipo	Monofilamento
Ponto de fulgor	330º
Condutividade térmica e elétrica	Baixa
Absorção de água	Desprezível
Resistência aos álcalis e ácidos	Excelente
Dosagem típica	0,3 a 1,2 kg/m³

Fonte: Viapol (2016).

Os teores de adição estudados são de 0,06 e 0,10 % em relação à massa da mistura, sendo o teor usual sugerido pelo fabricante e o máximo teor sem decaimento das propriedades físicas e mecânicas conforme identificado por Milani, Paz e Dias (2016).

3.5 MÉTODO

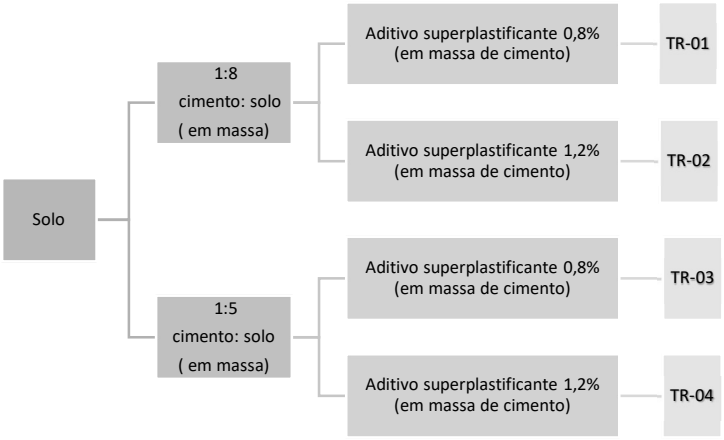
Para avaliar a influência da adição de cimento, aditivo superplastificante e fibras de polipropileno no comportamento físico-mecânico do solo-cimento autoadensável foi realizado o estudo fatorial de dosagem, sendo determinadas as dosagens com melhor comportamento físico e mecânico por meio da avaliação estatística dos resultados obtidos nos ensaios aplicados nas dosagens de solo-cimento autoadensável com incorporação de aditivo superplastificante e microfibras sintética.

Para verificar a viabilidade técnica para o emprego do solo-cimento autoadensável adicionado de fibras de polipropileno em paredes monolíticas foram utilizadas as dosagens com melhor comportamento físico-mecânico para a moldagem de prismas e painéis, onde foram avaliadas as caraterísticas de autoadensabilidade e aplicabilidade do SCAA no seu estado fresco e a evolução da resistência mecânica no seu estado endurecido.

4. ESTUDO DE DOSAGEM

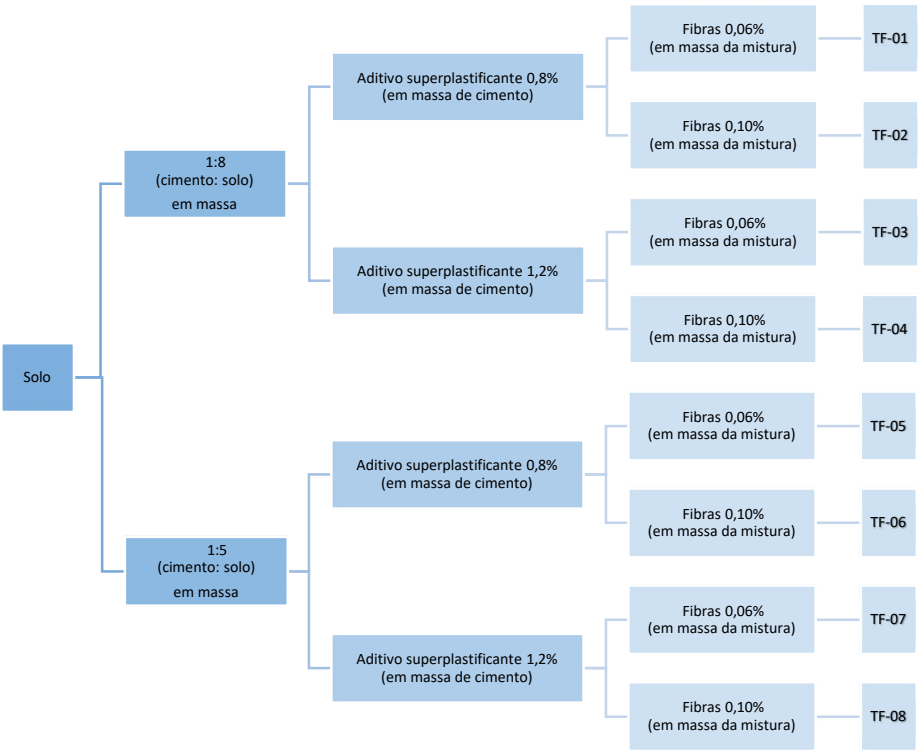
Para a análise da variação dos teores de dosagem de aditivos superplastificante e fibras de polipropileno nos espalhamentos de 320 e 370 mm do ensaio de *Slump Flow* modificado, foi composta a abordagem fatorial de dosagens para avaliação comparativa com a dosagem de referência (Figuras 5 e 6).

Figura 5 - Fatorial para dosagem de referência.



Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 6 - Fatorial para dosagem de estudo.



Fonte: Próprio autor (2023).

Sendo assim, a análise fatorial de aditivos e adições; pôde então definir os traços das dosagens de referências e das dosagens de estudo.

Para todas as dosagens, visando o atendimento da premissa da autoadensabilidade da mistura, foi executado o ensaio da ABNT NBR 15823-2:2017 *Slump Flow*, com o cone de Abrams modificado (Figura 7), conforme indicado por Ferreira (2020), determinando o teor de água para a transição do estado plástico para o fluido.

A estimativa inicial do teor de adição de água em massa de solo para solos siltosos e argilosos é o Limite de Liquidez, determinado conforme a ABNT NBR 6459:2016, para solos arenosos a autora afirma que devido à elevada porcentagem de areia e baixa coesão, não é possível obter resultados para o Limite de Liquidez.

Este fato foi constatado na verificação do Limite de Liquidez do solo arenoso utilizado nesta pesquisa, o qual não apresentou Limite de Liquidez.

Figura 7 - Ensaio *Slump flow* modificado aplicado no SCAA.

Fonte: Próprio autor (2023).

Assim, optou-se pela determinação iterativa do fator água/solo para o espalhamento mínimo de 320 mm e o valor intermediário de 370 mm (Tabela 4), sendo esperado que o menor teor de adição de água também seja o teor onde ocorre o pico de resistência mecânica na fase endurecida para o solo-cimento autoadensável adicionado de fibras.

Tabela 4: Fator água/solo para estudo de dosagem do SCAA.

DOSAGEM (cimento:solo:aditivo:fibra)	Fator água/solo (%) Espalhamento 320 mm	Fator água/solo (%) Espalhamento 370 mm
TR-01 (1:8:0,8)	31,00	35,00
TR-02 (1:8:1,2)	30,50	33,50
TR-03 (1:5:0,8)	32,00	35,00
TR-04 (1:5:1,2)	31,00	35,00
TF-01 (1:8:0,8:0,06)	32,50	35,00
TF-02 (1:8:0,8:0,10)	34,00	36,50
TF-03 (1:8:1,2:0,06)	32,00	34,00
TF-04 (1:8:1,2:0,10)	33,50	35,50
TF-05 (1:5:0,8:0,06)	33,50	35,50
TF-06 (1:5:0,8:0,10)	34,75	36,50
TF-07 (1:5:1,2:0,06)	32,50	34,50
TF-08 (1:5:1,2:0,10)	32,50	35,00

Fonte: Próprio autor (2023).

Para a determinação da influência do aditivo e da microfibra no estado fresco da mistura foi realizada a análise de variância ANOVA, em conjunto com o Teste de Tukey, podendo assim, inferir a real relevância destes fatores na variação da consistência da mistura no estado fresco. A análise de variância com teste de Tukey foi gerada com o auxílio do programa *R-Studio,* (Tabela 5).

Tabela 5: ANOVA para *Slump Flow* adaptado do SCAA.

Análise de Variância ANOVA					
	Adição	Soma de quadrados	Grau de Liberdade	F	p
Espalhamento 320/370mm	Cimento	406	1	1,243	2,72 e-1
	Superplastificante	7506	1	22,985	2,66 e-05
	Água	109622	16	20,980	7,81 e-14
	Fibras	16378	2	25,075	1,31 e-07
	Resíduos	12083	37		

Fonte: Próprio autor (2023).

Como esperado, tanto a variação da adição de fibras como de aditivo superplastificante possuem relevância na consistência da mistura, por outro lado a variação do teor de adição de cimento não possuiu impacto significativo na determinação do fator água/solo que produz o espalhamento nos valores de 320 e 370 mm.

Estabelecido o teor de água ótimo para as dosagens, foram moldados e ensaiados corpos de prova para a verificação do comportamento mecânico de cada tratamento para obtenção do teor ótimo de aditivo e microfibra que ainda atenda a resistência mecânica característica de 1,3 MPa aos 7 dias, sendo realizado os ensaios de determinação de resistência à compressão simples, conforme ABNT NBR 17014:2022.

Para cada dosagem a ser ensaiada foram moldados 3 corpos de prova para a determinação da resistência à compressão axial, 3 corpos de prova para resistência à tração por compressão diametral, 2 corpos de prova para determinação da capacidade de absorção de água e um corpo de prova reserva para eventual dano de desforma ou manejo, totalizando 9 corpos de prova por tratamento (Figura 8), sendo que as dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura e o preparo seguiram o prescrito na ABNT NBR 7215: 2019.

Figura 8 - Corpos de prova de SCAA na cura em câmera úmida.

Fonte: Próprio autor (2023).

Para a determinação da resistência à compressão simples aos 7 dias de idade para as dosagens de SCAA (Figura 9), foram seguidas as orientações do Anexo C da ABNT NBR 17014:2022, aplicando coeficiente de incerteza ϕ para a determinação da resistência característica (Tabela 6), conforme equações 1 e 2. Para a análise estatística foi realizada a implementação direta das resistências à compressão simples individuais de cada corpo de prova, o que possibilitou melhor acurácia na avaliação da influência dos componentes na mistura na sua resistência mecânica.

$$f_c = \frac{F_{rup}}{A_{rup}} \quad (1)$$

Onde:

f_c: Resistência à compressão simples, em megapascal;

F_{rup}: Carga de ruptura, em newtons;

A_{rup}: Área da seção transversal do corpo de prova, em milímetros quadrados.

$$f_{ck,est} = fc.\phi \quad (2)$$

Onde:

$f_{ck,est}$: Resistência característica estimada compressão simples em megapascal;

ϕ: coeficiente de incerteza, adimensional.

Figura 9 - Ensaio de resistência à compressão simples aplicado no SCAA.

Fonte: Próprio autor (2023).

Tabela 6: Resistência à compressão simples característica do SCAA.

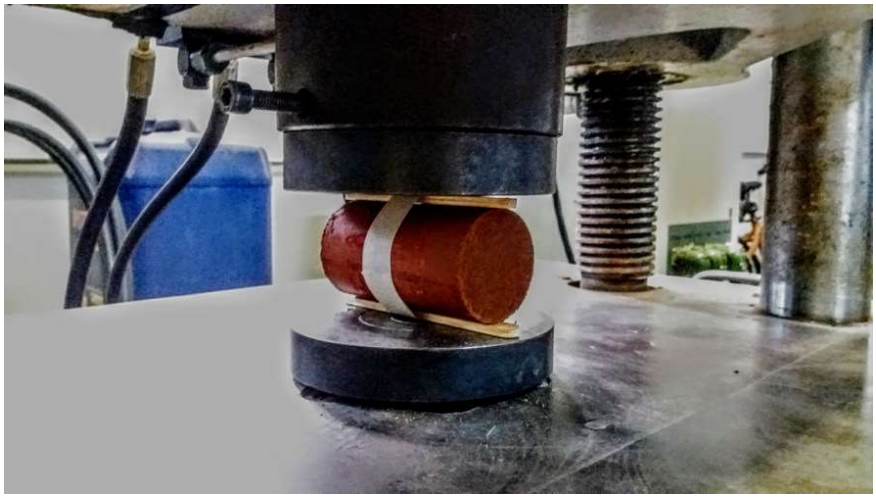
DOSAGEM (cimento:solo:aditivo:fibra)	**Resistência à compressão Espalhamento 320 mm**	**Resistência à compressão Espalhamento 370 mm**
	$f_{ck,est}$ **(MPa)**	$f_{ck,est}$ **(MPa)**
TR-01 (1:8:0,8)	1,33	0,88
TR-02 (1:8:1,2)	1,46	0,97
TR-03 (1:5:0,8)	3,59	2,84
TR-04 (1:5:1,2)	3,98	3,29
TF-01 (1:8:0,8:0,06)	1,16	1,03
TF-02 (1:8:0,8:0,10)	0,95	0,96
TF-03 (1:8:1,2:0,06)	1,21	1,21
TF-04 (1:8:1,2:0,10)	1,09	0,85
TF-05 (1:5:0,8:0,06)	3,41	1,95
TF-06 (1:5:0,8:0,10)	2,93	2,41
TF-07 (1:5:1,2:0,06)	3,46	1,67
TF-08 (1:5:1,2:0,10)	3,57	2,90

Fonte: Próprio autor (2023).

Para a resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias, o ensaio foi procedido conforme a ABNT NBR 7222:2011. A adoção deste ensaio para a avaliação da resistência à tração justifica-se pela praticidade de execução, sendo largamente aplicado à concretos sem adição que, conforme Quinino (2015), possuem similaridades com concretos com adição de fibras.

Para o atendimento normativo, onde a força aplicada deve agir sobre a geratriz do corpo de prova, foram fixados filetes de madeira no alinhamento da geratriz (Figura 10).

Figura 10 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral aplicado no SCAA.



Fonte: Próprio autor (2023).

Os valores obtidos para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias para todas as dosagens, (Tabela 7), foram determinados pela equação.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (3)$$

Onde:

$f_{ct,sp}$: Resistência à tração por compressão diametral, em megapascal;

F: Força máxima obtida no ensaio, em newtons;

d: Diâmetro do corpo de prova, em milímetros;

l: Comprimento do corpo de prova, em milímetros.

Tabela 7: Resistência média à tração por compressão diametral do SCAA.

DOSAGEM	Resistência à tração			Resistência à tração		
	$f_{ct,sp}$ (MPa)	DESV*	VAR*	$f_{ct,sp}$ (MPa)	DESV	VAR
TR-01 (1:8:0,8)	0,24	0,032	0,001	0,21	0,010	0,000
TR-02 (1:8:1,2)	0,27	0,024	0,001	0,22	0,035	0,001
TR-03 (1:5:0,8)	0,67	0,030	0,001	0,68	0,099	0,010
TR-04 (1:5:1,2)	0,79	0,180	0,033	0,78	0,041	0,002
TF-01 (1:8:0,8:0,06)	0,23	0,015	0,000	0,21	0,010	0,000
TF-02 (1:8:0,8:0,10)	0,20	0,014	0,000	0,20	0,008	0,000
TF-03 (1:8:1,2:0,06)	0,19	0,039	0,001	0,25	0,021	0,000
TF-04 (1:8:1,2:0,10)	0,21	0,016	0,000	0,53	0,024	0,001
TF-05 (1:5:0,8:0,06)	0,63	0,045	0,002	0,47	0,049	0,002
TF-06 (1:5:0,8:0,10)	0,48	0,037	0,001	0,56	0,025	0,001
TF-07 (1:5:1,2:0,06)	0,66	0,013	0,000	0,56	0,058	0,003
TF-08 (1:5:1,2:0,10)	0,63	0,093	0,009	0,63	0,040	0,002

*DESV e VAR (desvio padrão em MPa e Coeficiente de Variação em %)

Fonte: Próprio autor (2023).

Foi possível verificar que os resultados obtidos para a resistência mecânica apresentam concordância com a variabilidade das dosagens de aditivos e adições para o SCAA, tanto para compressão axial quanto para tração por compressão diametral, representando a homogeneidade dos lotes ensaiados, não sendo, no entanto, suficientes para confirmar a real significância e representatividade dos resultados. Assim, fez-se necessário o tratamento estatístico dos dados, com o auxílio do software RStudio por meio da Análise de variância ANOVA (Tabelas 8 e 9), verificando o atendimento às premissas de normalidade, linearidade e homoscedasticidade, através da análise gráfica dos resíduos.

Tabela 8: ANOVA para resistência média à compressão simples do SCAA.

Análise de Variância ANOVA					
	Adição	**Soma de quadrados**	**Grau de Liberdade**	**F**	**p**
Espalhamento 320 mm	Cimento	112,669	1	1326,097	2,20 e-16
	Superplastificante	1,779	1	20,935	4,01 e-05
	Fibras	3,717	2	21,872	2,82 e-07
	Resíduos	3,653	43		
Espalhamento 370 mm	Cimento	37,987	1	78,890	5,02 e-10
	Superplastificante	0,270	1	0,5616	0,459
	Fibras	1,142	2	1,1860	0,319
	Resíduos	14,927	31		

Fonte: Próprio autor (2023)

Tabela 9: ANOVA para resistência média à tração por compressão diametral do SCAA.

Análise de Variância ANOVA					
	Adição	**Soma de quadrados**	**Grau de Liberdade**	**F**	**p**
Espalhamento 320 mm	Cimento	1,588	1	236,910	4,57 e-16
	Superplastificante	0,021	1	3,066	0,090
	Fibras	0,082	2	6,127	0,006
	Resíduos	0,208	31		
Espalhamento 370 mm	Cimento	1,319	1	252,706	2,20 e-16
	Superplastificante	0,0156	1	2,994	0,0935
	Fibras	0,086	2	8,219	0,001
	Resíduos	0,162	31		

Fonte: Próprio autor (2023).

Para a resistência à compressão simples, a ANOVA mostrou para as dosagens com espalhamento 320 mm que a variação de todas as adições e aditivos considerados apresentaram significância no modelo de resistência, enquanto que para as dosagens com espalhamento 370 mm somente a variação da adição de cimento apresentou significância.

Para a resistência à tração por compressão diametral, em ambas as consistências - espalhamento 320 e 370 mm - somente o cimento influiu significativamente na variação desta resistência.

A ANOVA, no entanto, não foi suficiente para a determinação quantitativa da variação dos teores de adições e aditivos na resistência do SCAAF assim, foi necessária a análise conjunta com o Teste de Tukey, comparando par-a-par a variação de cada dosagem (Tabelas 10 e 11).

Tabela 10: Teste de Tukey para resistência à compressão simples.

	Adição	P
Espalhamento 320 mm	Cimento (1:8-1:5)	1,1 e-12
	Superplastificante (0,08-0,12)	4,01 e-05
	Fibras (0-0,006)	1,23 e-04
	Fibras (0-0,010)	2,59 e-07
	Fibras (0,006-0,010)	1,60 e-01
Espalhamento 370 mm	Cimento (1:8-1:5)	5,02 e-10
	Superplastificante (0,08-0,12)	4,59 e-01
	Fibras (0-0,006)	9,86 e-01
	Fibras (0-0,010)	4,35 e-01
	Fibras (0,006-0,010)	3,50 e-01

Fonte: Próprio autor (2023).

Tabela 11: Teste de Tukey para resistência à tração por compressão diametral.

	Adição	p
Espalhamento 320 mm	Cimento (1:8-1:5)	8,17 e-14
	Superplastificante (0,08-	8,98 e-02
	Fibras (0-0,006)	1,37 e-01
	Fibras (0-0,010)	4,08 e-03
	Fibras (0,006-0,010)	2,95 e-01
Espalhamento 370 mm	Cimento (1:8-1:5)	8,15 e-14
	Superplastificante (0,08-	9,35 e-02
	Fibras (0-0,006)	1,77 e-02
	Fibras (0-0,010)	1,36 e-03
	Fibras (0,006-0,010)	5,89 e-01

Fonte: Próprio autor (2023).

Para a resistência à compressão simples, o Teste de Tukey mostrou que para as dosagens com espalhamento 320 mm, com exceção da variação do teor de fibras de 0,06% para 0,10% em massa de cimento, todas as variações de adições e aditivos foram significativas no comportamento da resistência à compressão, com $p < 0,05$. Para as dosagens com espalhamento 370 mm, constatou-se que as variações dos teores de aditivos e adições perdem a relevância sobre a resistência à compressão simples sendo esta, determinada majoritariamente pela variação do teor de dosagem de cimento, que rejeita a hipótese nula com $p<0,05$.

Para à resistência à tração por compressão diametral, o Teste de Tukey mostrou que para as dosagens com menor fluidez, somente as variações do teor de aditivo de 0,08% para 0,12% em massa de cimento e da porcentagem de microfibras de polipropileno em massa da mistura de 0% para 0,10%, possuem impactos relevantes na resistência à tração do SCAA.

Para as dosagens com espalhamento 370 mm, com exceção da variação do teor de adição de microfibras de 0,06% para 0,10% em massa da mistura, todas as demais variações afetam diretamente à resistência à tração, mostrando uma maior sensibilidade do tratamento de SCAA nesta fluidez.

A análise dos resultados do ensaio à compressão simples aos 7 dias restringiu as dosagens ao teor de adição de cimento em massa de solo de 1:5, onde o teor de adição de cimento de 1:8 em massa de solo, em ambas as consistências, não atendeu a resistência característica mínima de 1,3 MPa conforme ABNT NBR 17014:2022. Sendo assim, voltada a atenção para as dosagens com teor de adição de cimento de 1:5 em massa de solo, proporção esta que apresentou maiores resistências tanto à compressão simples como à tração por compressão diametral com espalhamento no ensaio de *Slump Flow* modificado de 320 mm, condizente com o observado por Ferreira (2020).

As dosagens deste grupo, teor de adição de cimento de 1:5 em massa de solo com espalhamento de 320 mm, apresentaram resistências ligeiramente superiores, tanto à compressão quanto à tração, quando aplicado o teor de aditivo superplastificante de policarboxilato de 1,2% em massa de cimento.

Para o teor de adição de fibras, a análise dos resultados dos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral não foram suficientes para a determinação do teor de adição ideal. No entanto, o Teste de Tukey mostra que a adição de fibra tanto na dosagem de 0,06% quanto 0,10% em massa da mistura possuem impacto negativo na resistência à compressão simples. Para a resistência à tração por compressão diametral, o Teste de Tukey mostra que somente a alteração do teor de adição de microfibras de 0 para 0,10% em massa da mistura é relevante.

Em ambas as análises da resistência à compressão e tração por compressão diametral, o Teste de Tukey não apresentou relevância na variação do teor de adição de microfibras de 0,06 para 0,10% em massa da mistura.

Conforme Callejas *et al.* (2022), o impacto negativo da adição dos teores de microfibras de polipropileno nas resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral do SCAA tem sua parcela devido à redução da massa específica aparente do compósito, visto que os autores constataram a relação direta na tendência da redução da massa específica aparente com o aumento do teor de adição de microfibras de polipropileno.

Ainda, observou-se que a adição e o aumento do teor de microfibras impactaram no aumento da quantidade de água para o alcance das consistências de autoadensabilidade estudadas. Para Milani e Barboza (2016) a resistência mecânica do solo-cimento autoadensável aumenta com a diminuição do fator água/solo, e o aumento do teor de adição de aditivo superplastificantes, corroborando o entendimento da análise estatística apresentada.

Complementarmente ao comportamento mecânico das dosagens estudadas, foi aplicado o ensaio de absorção de água aos 7 dias de idade de cura úmida dos traços de SCAA, conforme a ABNT NBR 13555:2012, com resultados apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Capacidade de absorção de água do SCAA.

DOSAGEM (cimento:solo:aditivo:fibra)	Absorção (%) Espalhamento 320 mm	Absorção (%) Espalhamento 370 mm
TR-01 (1:8:0,8)	24,03	26,47
TR-02 (1:8:1,2)	24,01	25,45
TR-03 (1:5:0,8)	22,12	25,03
TR-04 (1:5:1,2)	21,30	25,17
TF-01 (1:8:0,8:0,06)	24,92	27,95
TF-02 (1:8:0,8:0,10)	26,23	29,14
TF-03 (1:8:1,2:0,06)	24,66	27,05
TF-04 (1:8:1,2:0,10)	25,27	27,89
TF-05 (1:5:0,8:0,06)	23,65	25,56
TF-06 (1:5:0,8:0,10)	24,25	26,58
TF-07 (1:5:1,2:0,06)	22,83	24,54
TF-08 (1:5:1,2:0,10)	23,52	24,84

Fonte: Próprio autor (2023).

A capacidade de absorção de água para todas as dosagens, inclusive as dosagens de referência, apresentaram porcentagem de absorção em relação à massa seca superiores à 20%, limite indicado pela ABNT NBR 13553:2012. Notou-se, porém, que o aumento do teor de adição de cimento e a redução do teor de adição de água para a obtenção de consistência com espalhamento de 320 mm influenciaram positivamente na redução da capacidade de absorção de água por imersão.

Por outro lado, a adição e o aumento do teor de adição de fibras elevaram a absorção de água do SCAA. Este comportamento também foi observado por Callejas *et al.* (2022), sendo além do tipo do autoadensamento imposto ao material, um impacto do aumento da porosidade do compósito pela adição de fibras, os autores indicam, no entanto, que este comportamento pode ser contornado pela aplicação de produtos impermeabilizantes.

Assim, com base no conjunto de resultados obtidos no estudo de dosagem aliado com a análise estatística da ANOVA e Teste de Tukey, constatou-se que as dosagens TF-07 (1:5:1,2:0,06) e TF-08 (1:5:1,2:0,10) apresentaram melhores comportamentos mecânicos, sendo estas escolhidas para a etapa subsequente deste trabalho. Manteve-se ainda a dosagem de referência TR-04 (1:5:1,2) para avaliação dos impactos no SCAA causados pela a adição e variação de microfibras.

5. CARACTERIZAÇÃO DO SCAAF

A avaliação do comportamento físico e mecânico do solo-cimento autoadensável com fibras (SCAAF) de melhores resistências mecânicas observado no estudo de dosagem foi concebida para que haja representatividade real à aplicação prevista do material. Assim, foram aplicados os seguintes ensaios nos tratamentos (cimento: solo: aditivo: fibra) TR-04 (1:5:1,2); TF-07 (1:5:1,2:0,06); e TF-08 (1:5:1,2:0,10):

a) Resistência à compressão simples em painéis em cura ambiente;
b) Resistência à flexão, tenacidade à flexão e fator de tenacidade à flexão de prismas;
c) Variação dimensional de prismas.

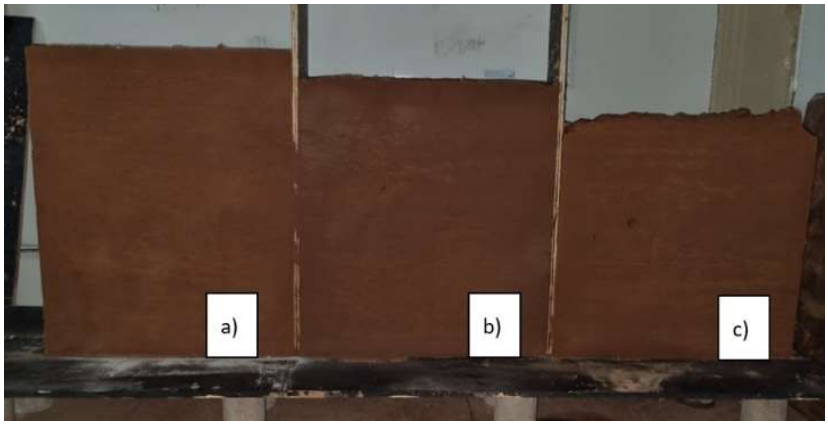
5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A determinação da resistência à compressão simples das dosagens selecionadas de SCAAF seguiram as mesmas diretrizes do Anexo C da ABNT NBR 17014:2022.

No entanto, para a representação da aplicação real do SCAAF em paredes monolíticas foram moldados painéis com dimensão 60 cm de largura, 12 cm de espessura e altura variável entre 59 a 72 cm, conforme o comportamento de cada tratamento (Figura 11).

Para todos os tratamentos estudados foram mantidas as quantidades dos materiais com maior representatividade em massa (solo, cimento e consequentemente o aditivo superplastificante). Os painéis foram expostos à cura ambiente abrigados de radiação solar direta e intempéries.

Figura 11 - Painéis de SCAAF - a) TF-8, b) TF-7, c) TR-4.

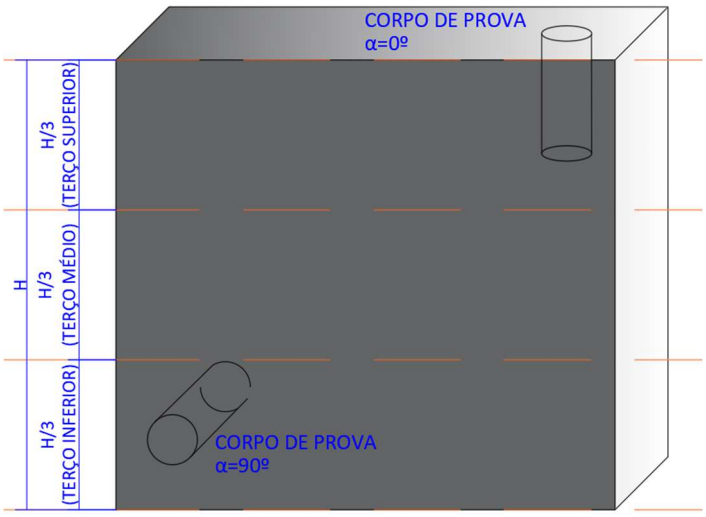


Fonte: Próprio autor (2023).

A extração de corpos de prova foi feita com perfuratriz com circulação de água e coroa diamantada de diâmetro de 48 mm. Para tanto, este método possibilitou a extração de um número maior de corpos de prova de cada painel.

Os corpos de prova foram extraídos para as idades de 3, 7 e 28 dias. Para as idades de 3 e 7 dias foram extraídos perpendiculares à face dos painéis, α=90º, 3 corpos de prova para o terço inferior do painel, 3 para o terço médio e 3 para o terço superior de cada painel (Figura 12). Para os 28 dias, além dos 3 corpos de prova de cada terço, extraídos perpendiculares, foram extraídos corpos de prova paralelos à face do painel, α=0º, na metade inferior e superior de cada mini parede.

Figura 12 – Extração de corpos de prova no painel de SCAAF.



Fonte: Próprio autor (2023).

Estes procedimentos foram adotados para a determinação da resistência à compressão simples nas diferentes idades, 3, 7 e 28 dias, e o impacto do lançamento e autoadensamento do SCAAF. Para a idade de 28 dias, ainda foi avaliada a isotropia mecânica, com o ensaio à compressão simples de corpos de prova extraídos paralelos à face dos painéis.

Todos os corpos de prova foram extraídos, identificados e retificados ao menos 24 horas antes da realização do ensaio à compressão simples, sendo que as dimensões médias para os corpos de prova analisados, foram 117,98 mm de altura e 47,68 mm de diâmetro.

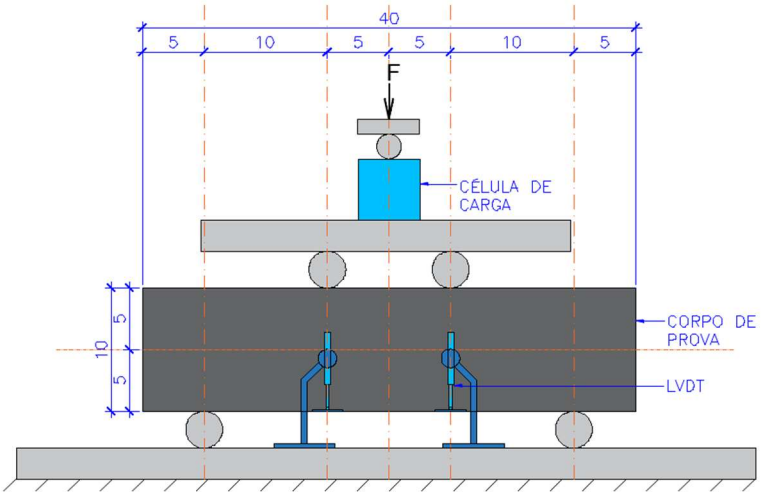
5.2 RESISTÊNCIA À FLEXÃO POR 4 PONTOS

Para a análise do SCAAF quanto à redução do comportamento frágil pela a adição de microfibras de polipropileno, foram aplicadas as normas japonesas J*apan Society of Civil Engineers – JSCE –SF2 e SF-04* (1984).

A adoção destas normas que foram desenvolvidas para a aplicação de concreto reforçado com fibras metálicas justifica-se conforme descrito por Quinino (2015), pois têm apresentado adequabilidade nos ensaios com fibras sintéticas.

Este método comumente denominado de ensaio de flexão por 4 pontos apresenta ainda a eliminação teórica dos efeitos de esforços cortantes na região de ruptura, com o posicionamento de apoios e cutelos equidistantes entre si balanceando as ações e reações aplicadas, configurando o estado de flexão pura no trecho central do prisma (Figura 13).

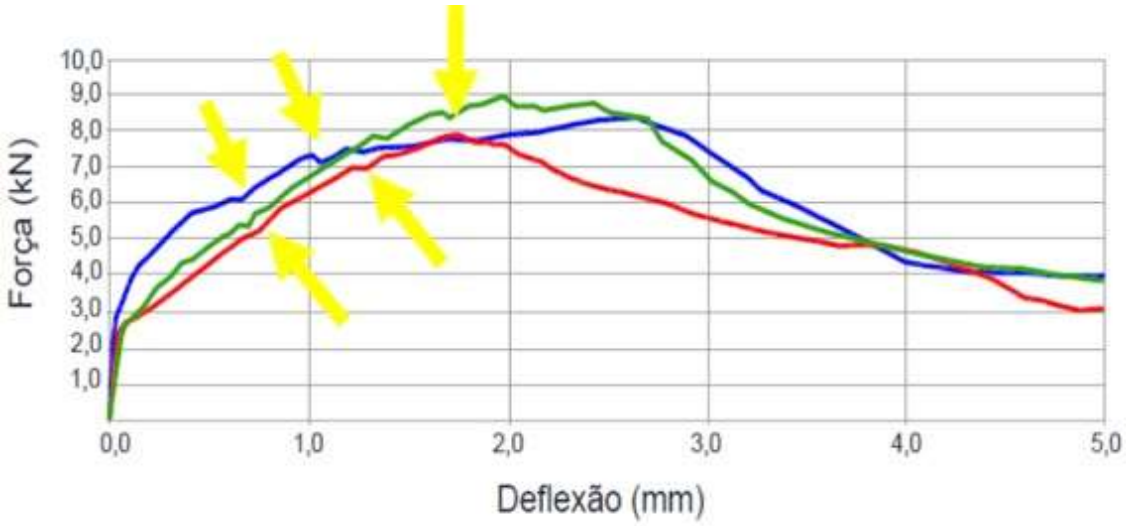
Figura 13 - Estado de flexão pura do prisma.



Fonte: Próprio autor (2023).

A aplicabilidade deste ensaio justificou-se ainda, pois conforme identificado por Junior e Garcez (2017), existe a possibilidade de verificação do efeito *strain hardening,* (endurecimento), através da presença de vales na curva carga x deflexão, que indicam o aumento da ductilidade do material devido a recuperação de resistência pelo espraiamento de tensões proporcionado pelas microfibras ancoradas na matriz do solo-cimento (Figura 14).

Figura 14 - Identificação gráfica do comportamento *strain hardening*.



Fonte: Junior e Garcez (2015).

A moldagem dos corpos de prova seguiu conforme descrito na *Japan Society of Civil Engineers – JSCE –SF2*, sendo confeccionados 4 corpos de prova prismáticos de cada dosagem para as idades de 14 e 28 dias, mantidos em câmera úmida até a idade de rompimento.

A seção dos corpos de prova prismáticos foi de 10 cm x 10 cm x 40 cm, com o posicionamento de apoios e cutelos à 10 cm de distâncias cada.

A instrumentação dos prismas foi realizada com a implementação de sistema de aquisição de dados com dois transdutores de deslocamentos (LVDT), calibrados com micrômetro e alinhados com os cutelos superiores para a determinação dos deslocamentos. Para a obtenção da carga aplicada no instante de cada deslocamento medido foi instrumentada célula de carga entre a prensa e os cutelos (Figura 15).

Figura 15 - Sistema de aquisição de dados para ensaio de flexão de 4 pontos.

Fonte: Próprio autor (2023).

Para a taxa de deflexão a norma *Japan Society of Civil Engineers – JSCE –SF4* indica que deve ser mantida a taxa de 1/1500 e 1/3000 em relação ao vão por minuto. Devido às baixas resistências do SCAAF comparado com concreto adicionado de fibras metálicas foi adotada a menor taxa de deflexão, correspondente neste caso à 0,1 mm/s até a ruptura. Para os prismas adicionados de microfibras de polipropileno foram ainda progredidos os deslocamentos até a desestabilização do corpo de prova, sendo neste intervalo a taxa de deslocamento foi aumentada para 0,5 mm/s.

A obtenção dos resultados foi realizada como prescrito pela JSCE-SF4, com a resistência à flexão através da equação 4.

$$\sigma_b = \frac{Pl}{bh^2} \tag{4}$$

Onde:

σ_b: resistência à flexão, em Newton por milímetro quadrado;

P: máximo carregamento, em Newtons;

l: vão, em milímetros;

b: largura da seção transversal, em milímetros;

h: altura da seção transversal, em milímetros.

O fator de tenacidade à flexão de primas por sua vez foi determinado pela equação 5.

$$\bar{\sigma}_b = \frac{Tb.l}{\delta tb.bh^2} \quad (5)$$

Onde:

$\bar{\sigma}_b$: Fator de tenacidade à flexão, em Newton por milímetro quadrado;

T_b: tenacidade à flexão, em quilonewton por milímetro;

l:vão, em milímetro;

δ_{tb}: deflexão de1/150 do vão ou da ruptura, em milímetro;

b: largura da seção transversal, em milímetro;

h: altura da seção transversal, em milímetro.

A tenacidade à flexão (T_b) foi determinada pela área da curva tensão deformação até o limite de deformação de 1/150 em relação ao vão, em caso de ruptura antes deste limite a área considerada foi limitada ao deslocamento até a ruptura.

5.3 VARIAÇÃO DIMENSIONAL

A análise do comportamento físico do SCAAF foi realizada conforme descrito pela ABNT NBR 15261:2022 com a determinação da variação dimensional e a influência da adição de microfibras de polipropileno.

Esta determinação se fez necessária pois conforme descrito por Brito (2004), a fissuração é principalmente causada pelos efeitos de retração do material. Esta manifestação patológica pode se apresentar devido à baixa resistência à tração, típica de materiais de construção com base em solo. O autor ainda denota que a fissuração do material pode desencadear e acelerar o processo de degradação do material, com efeitos adversos como desagregação e infiltração na matriz do solo-cimento.

Para análise da variação dimensional do SCAAF foram moldados para cada dosagem 3 corpos de prova prismáticos com dimensão de 25 mm x 25 mm x 285 mm, sendo fixados pinos metálicos em suas extremidades durante o processo de cura ambiente do SCAAF.

A determinação da variação dimensional foi feita nas idades de 1, 4, 7, 14 e 28 dias, sendo que para as idades de 1 e 4 dias devido à fragilidade dos corpos de prova prismáticos, optou-se por instrumentar todos os corpos de prova individualmente com relógios comparadores (Figura 16).

Figura 16 - Instrumentação dos corpos de prova para ensaio variação dimensional nas idades de 1 e 4 dias.

Fonte: Próprio autor (2023).

Para as idades de 7, 14 e 28 dias, foram seguidas as recomendações da ABNT NBR 15261:2022, acoplando relógio comparador com resolução de 0,001 mm ao pórtico metálico. A calibração foi realizada com a barra de referência padrão de comprimento de 295,2 mm (Figura 17).

Todos os corpos de prova foram posicionados sempre na mesma orientação vertical (Figura 18), rotacionando seu eixo para a adoção da menor medida apresentada conforme descrito pelo item 4.2.3 da ABNT NBR 15261:2022.

Figura 17 - Calibração do pórtico para ensaio de variação dimensional nas idades de 7 à 28 dias.

Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 18 - Medição dos corpos de prova no ensaio de variação dimensional.

Fonte: Próprio autor (2023).

A determinação da variação dimensional foi feita conforme equação 6.

$$\varepsilon i = \frac{L_i - L_0}{0{,}25} \qquad (6)$$

Com:

L_i: dimensão final na idade de ensaio, em milímetros;

L_0: dimensão inicial na desforma, em milímetros.

A variação dimensional média foi obtida a partir da medição dos 3 corpos de prova para cada dosagem, sendo descartada a variação unitária quando esta comparada com a variação média apresentou desvio superior à 0,20 mm/m, para esta situação foi recalculada a variação média dimensional.

5.4 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO

A primeira constatação obtida durante a moldagem dos painéis de SCAAF foi a alteração volumétrica devida à adição de fibras para a mesma massa de solo, cimento e aditivo superplastificante. A variação volumétrica do painel foi crescente tanto quanto foi o aumento do teor de fibra adicionado ao solo-cimento autoadensável as dimensões de cada painel para as dosagens TR-04 (1:5:1,2), TF-07 (1:5:1,2:0,06) e TF-08 (1:5:1,2:0,10), (Tabela 12).

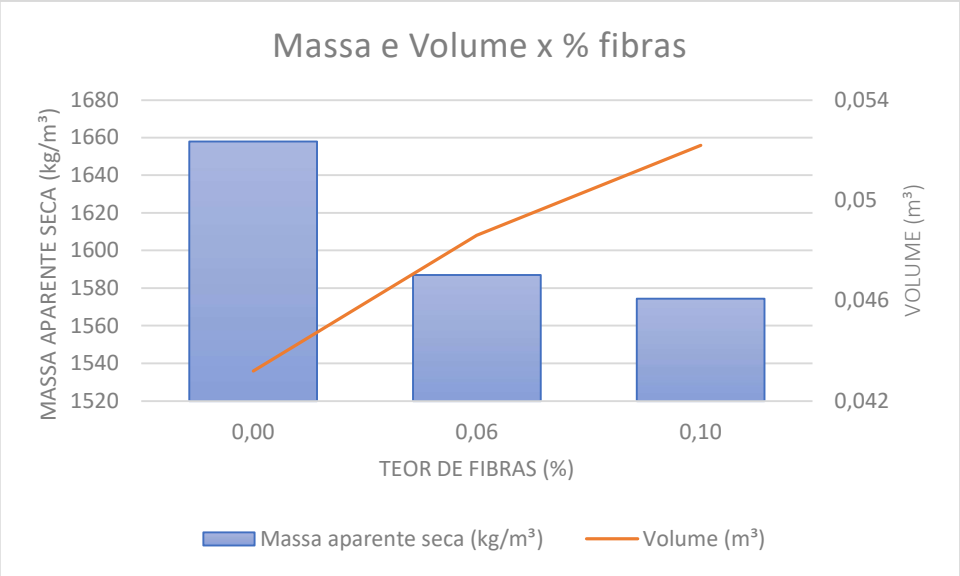
Tabela 13: Dimensões dos painéis de SCAAF no estado endurecido.

	TR-04 (1:5:1,2)	**TF-07 (1:5:1,2:0,06)**	**TF-08 (1:5:1,2:0,10)**
Largura (cm)	60	60	60
Espessura (cm)	12	12	12
Altura (cm)	59	67,5	72,5

Fonte: Próprio autor (2023).

Analisando graficamente é possível verificar que o volume e a massa aparente seca foram diretamente influenciados pela adição de fibras (Figura 19).

Figura 19 – Massa e volume do SCAAF versus teor de adição de fibras.



Fonte: Próprio autor (2023).

Esta variação revelou indícios do aumento da porosidade do SCAAF causado pelo teor de fibras. Borges (2017) no estudo da adição de fibras naturais e de polipropileno em concretos,

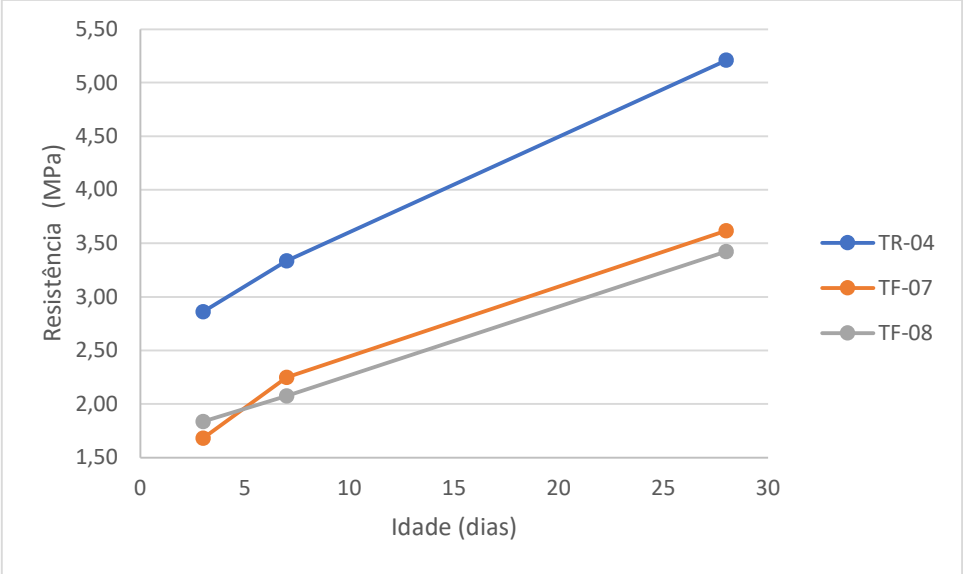
afirma que a adição de fibras tende ao aumento da incorporação de ar durante à mistura, e consequentemente afetando o índice de vazio do compósito, resultados em acordo com o observado no presente estudo. Callejas *et al.* (2022) por sua vez, no estudo de solo-cimento autoadensável com adição de microfibras fez constatação semelhante afirmando que a adição de fibras possui influência direta na massa específica aparente.

Este resultado comparativo foi possível considerando que foram mantidas as quantidades dos materiais relevantes para todas as dosagens, constatando a alteração da porosidade do material em acordo com o afirmado por Borges (2017) e Callejas *et al.* (2022).

Fonseca *et al.* (2021) *apud* Cordeiro e Toledo (2013) também relacionam a redução da porosidade com o aumento da massa específica e da resistência mecânica do compósito cimentícios, refletindo diretamente na sua durabilidade.

As constatações acima apresentadas corroboraram os resultados obtidos durante o estudo, onde para a resistência à compressão simples houve um decréscimo da resistência com o aumento do teor de adição de microfibra de polipropileno em massa da mistura (Figura 20).

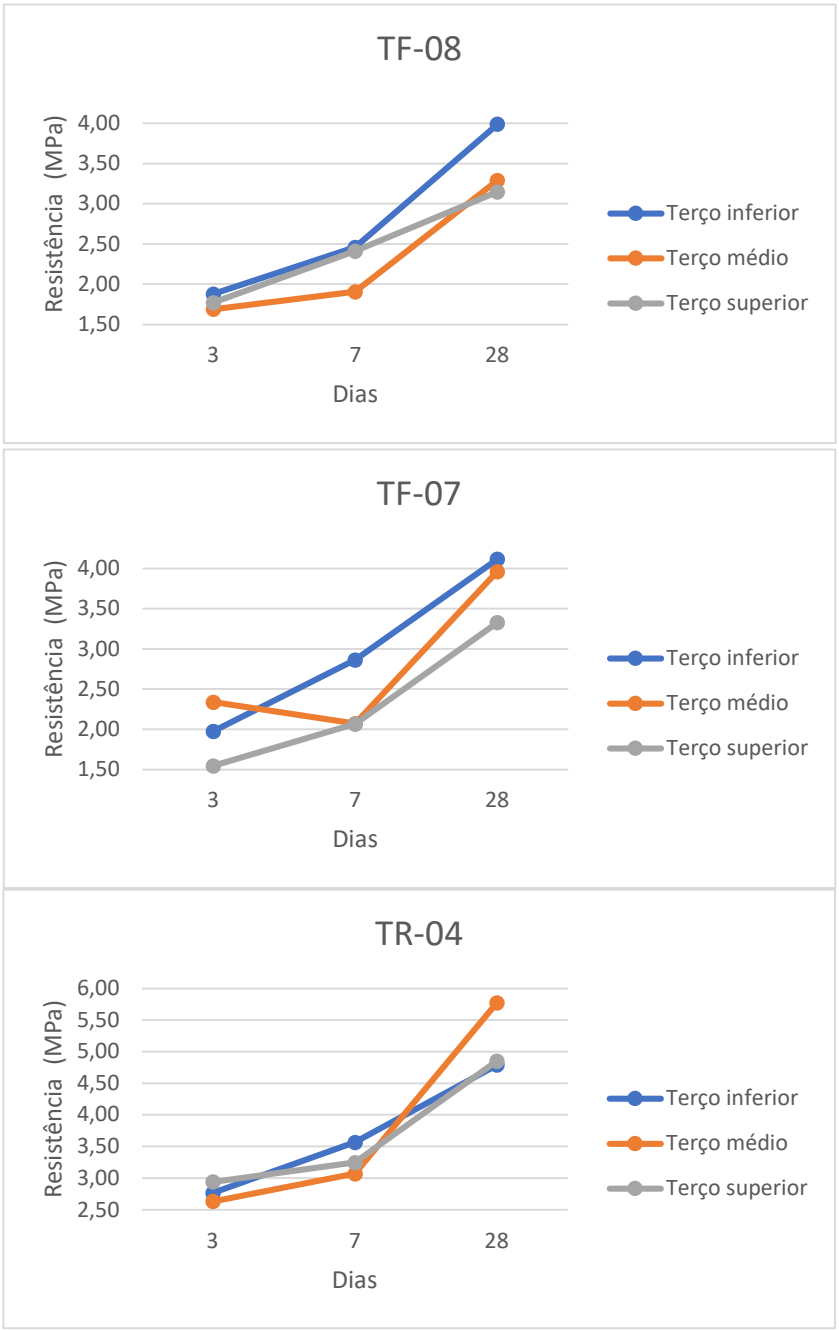
Figura 20 - Resistência à compressão simples do SCAAF.



Fonte: Próprio autor (2023).

Para a verificação do impacto da altura de lançamento na resistência à compressão simples do SCAAF nas idades estudadas, foi realizada a extração dos corpos de prova em terços inferior, médio e superior do painel, determinando assim a resistência à compressão para cada dosagem em cada altura do painel (Figura 21).

Figura 21 - Resistência à compressão simples em terços inferior, médio e superior do painel de SCAAF.



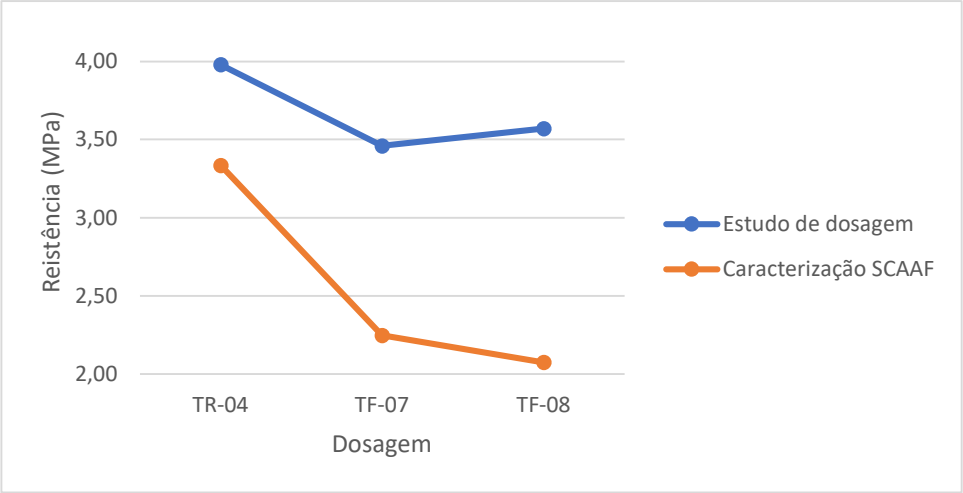
Fonte: Próprio autor (2023).

As resistências à compressão simples das misturas de SCAAF quando analisadas em seus terços apresentaram grande heterogeneidade de resultados, no entanto observa-se que houve de alguma maneira a influência do lançamento do SCCAF nas fôrmas ou ainda que o

peso próprio de cada camada afetou significativamente o adensamento e a melhoria das propriedades mecânicas da mistura no estado endurecido.

Comparando as resistências dos corpos de prova retirados dos painéis com os resultados do estudo de dosagem, observou-se decréscimo nos valores da resistência à compressão simples da caracterização do SCAAF (Figura 22).

Figura 22 – Comparação dos valores médios de resistência à compressão simples aos 7 dias.

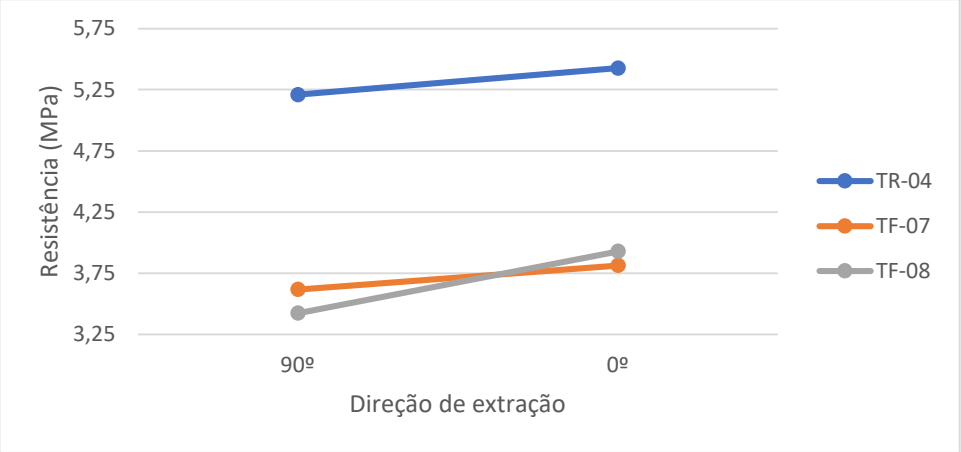


Fonte: Próprio autor (2023).

Esta variação da resistência à compressão simples aos 7 dias de idade observada entre as duas etapas pode ter sido influência pelo tipo de cura empregado, sendo cura úmida para o estudo de dosagem do SCAA e cura ambiente para a caracterização do SCAAF. A evaporação de água para cura ambiente, neste caso, pode impactar na disponibilidade deficitária de água para a hidratação dos compostos de cimentícios prejudicando a sua cristalização.

Ainda na idade de 28 dias procurou-se verificar a isotropia da resistência à compressão simples, com a extração de corpos de prova paralelamente à face dos painéis (0º), comparando os valores obtidos com a resistência à compressão dos corpos de prova extraídos perpendicularmente à face dos painéis (90º) (Figura 23).

Figura 23 - Resistência à compressão simples do SCAAF à face do painel a 0º e 90º.



Fonte: Próprio autor (2023).

Notou-se, a partir da resistência mecânica das dosagens nas direções à 0º e 90º em relação as faces dos painéis, que todas as dosagens apresentaram maiores resistências para a direção à 0º em relação à face do painel.

Para esta direção a extração dos corpos de prova não reteve áreas periféricas do painel expostas diretamente ao ambiente e diretamente suscetíveis à evaporação de água da mistura. A perda de água de hidratação da mistura para o ambiente conforme München *et al.* (2019), implica diretamente nas manifestações patológicas como fissuras e a queda da sua resistência mecânica, fato este que pode explicar os resultados obtidos na análise da isotropia do material, não relacionando, porém, à alteração dos componentes da mistura no estado fresco, mas sim às diferentes condições de cura presente no compósito.

Já no ensaio de flexão por 4 pontos para 14 e 28 dias de idade forneceu a resistência à flexão (σ_b), a tenacidade à flexão (T_b) e o fator de tenacidade à flexão ($\bar{\sigma}_b$) das misturas de SCAAF (Tabelas 14 e 15).

Tabela 14: Resultados de resistência à flexão do SCAAF aos 14 dias.

SCAAF	σ_b (N/mm²)	*Desv	*Var	T_b (KN.mm)	Desv.	Var.	$\overline{\sigma}_b$ (N/mm²)	Desv	Var
TR-04	1,512	0,144	9,524	1,432	0,230	16,061	0,494	0,070	14,170
TF-07	1,299	0,084	6,467	1,777	0,380	21,384	0,270	0,055	20,370
TF-08	1,359	0,173	12,730	2,417	0,125	5,172	0,436	0,096	22,018

*DESV e VAR (desvio padrão em MPa e Coeficiente de Variação em %)

Fonte: Próprio autor (2023).

Tabela 15: Resultados de resistência à flexão do SCAAF aos 28 dias.

SCAAF	σ_b (N/mm²)	*Desv	*Var	T_b (KN.mm)	Desv	Var	$\overline{\sigma}_b$ (N/mm²)	Desv	Var
TR-04	1,734	0,221	12,745	1,530	0,443	28,954	0,771	0,064	8,301
TF-07	1,495	0,058	3,880	3,150	0,703	22,317	0,482	0,103	21,369
TF-08	1,444	0,065	4,501	3,278	0,376	11,470	0,508	0,046	9,055

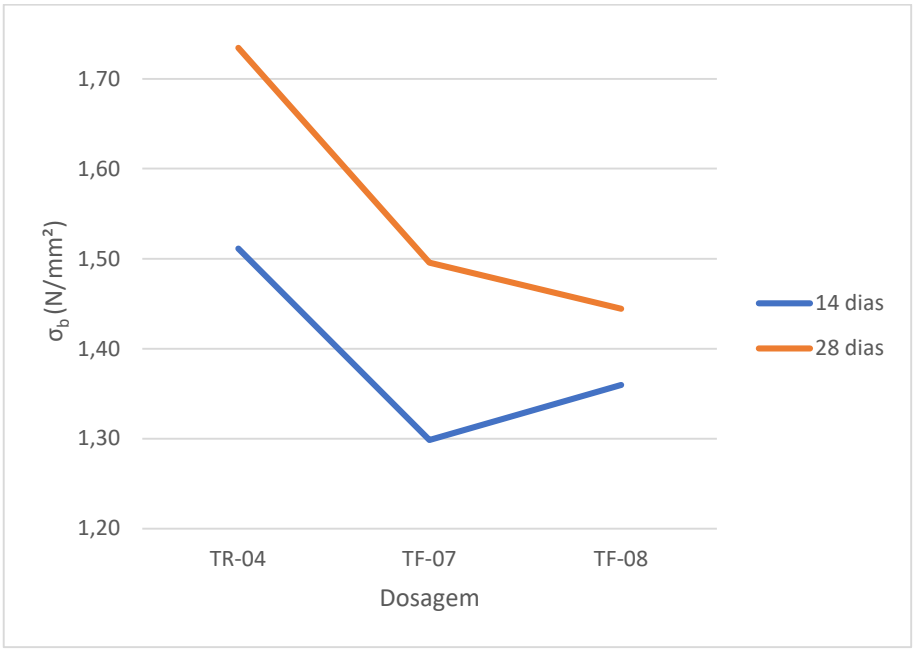
*DESV e VAR (desvio padrão em MPa e Coeficiente de Variação em %)

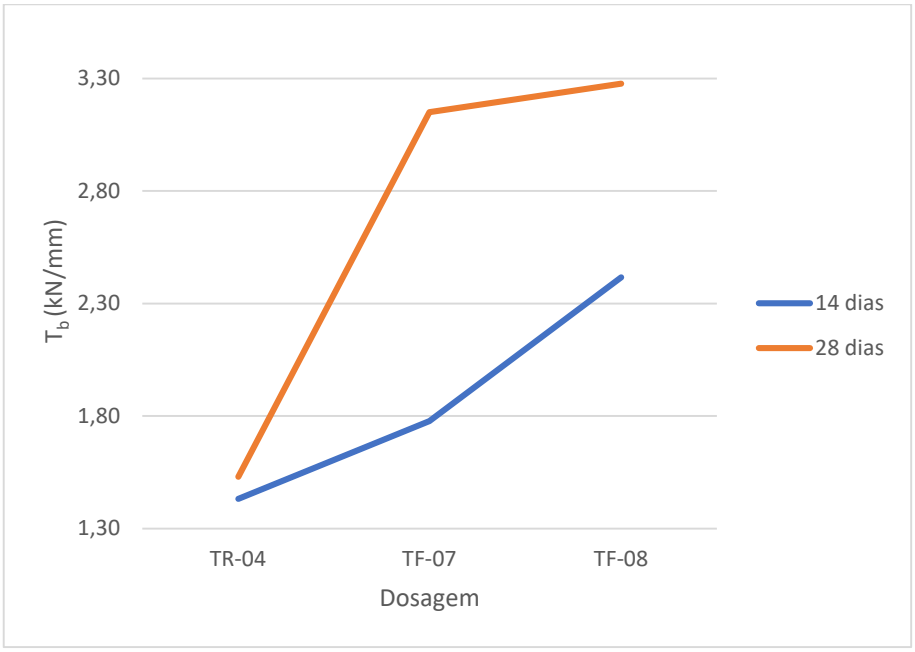
Fonte: Próprio autor (2023).

A norma japonesa JSCE –SF4 foi concebida para o ensaio de flexão por 4 pontos para concretos reforçados com fibras de aço, os quais possuem resistências à compressão e tração significativamente superiores ao SCAAF. Assim, apesar de possuir uma ressalva para a determinação do fator de tenacidade à flexão, a norma preconiza que a tenacidade seja medida até a deflexão de 1/150 em relação ao vão. Para os prismas ensaiados este valor corresponde à 2 mm, para a dosagem TR-04 sem a adição de fibras, no entanto, a ruptura ocorreu antes da deflexão de 2 mm, sendo a tenacidade à flexão medida até o ponto de ruptura.

A Figura 24 mostrou para o ensaio de flexão por 4 pontos que a adição de fibras influenciou negativamente na resistência à flexão comparativamente com a dosagem de referência TR-04. Porém, na característica de tenacidade a flexão houve o aumento significativo pela incorporação das microfibras.

Figura 24 – Resultados do ensaio de flexão por 4 pontos aplicados no SCAAF.





Fonte: Próprio autor (2023).

Observou-se significativa redução na resistência à flexão tanto para a idade de 14 quanto para de 28 dias com a adição de fibras, sendo mais expressiva a redução quando comparados os resultados obtidos para o teor de adição de fibras de 0,06% em massa da mistura, com a dosagem sem adição de fibras. A alteração do teor de fibras de 0,06% para 0,10% em massa da mistura apresentou menor impacto quantitativo na resistência à flexão não caracterizando um comportamento linear na redução da resistência a flexão pelo aumento do teor de fibras.

Os efeitos negativos na resistência à flexão podem ser explicados pela alteração da porosidade e consequentemente a resistência à compressão e tração da matriz solo-cimento, conforme observado por Borges (2017) e Callejas *et al.* (2022).

Durante o ensaio de resistência à compressão simples dos corpos de prova extraídos dos painéis, a dosagem de referência apresentou resistência superior as dosagens com adição de fibras, que por sua vez apresentou diminuição da resistência com o aumento do teor de adição de fibra em relação a massa do cimento.

Neste ponto, a queda da resistência à compressão do SCAAF pela adição de fibras se tornou um efeito iterativo com tendência negativa, ou seja, à medida que o teor de fibra é aumentado a resistência à compressão apresentará diminuição pela alteração da porosidade do material, impactando negativamente na ancoragem das fibras e consequentemente na sua capacidade de absorver e retransferir esforços, ação esperada para o aumento da ductibilidade do material.

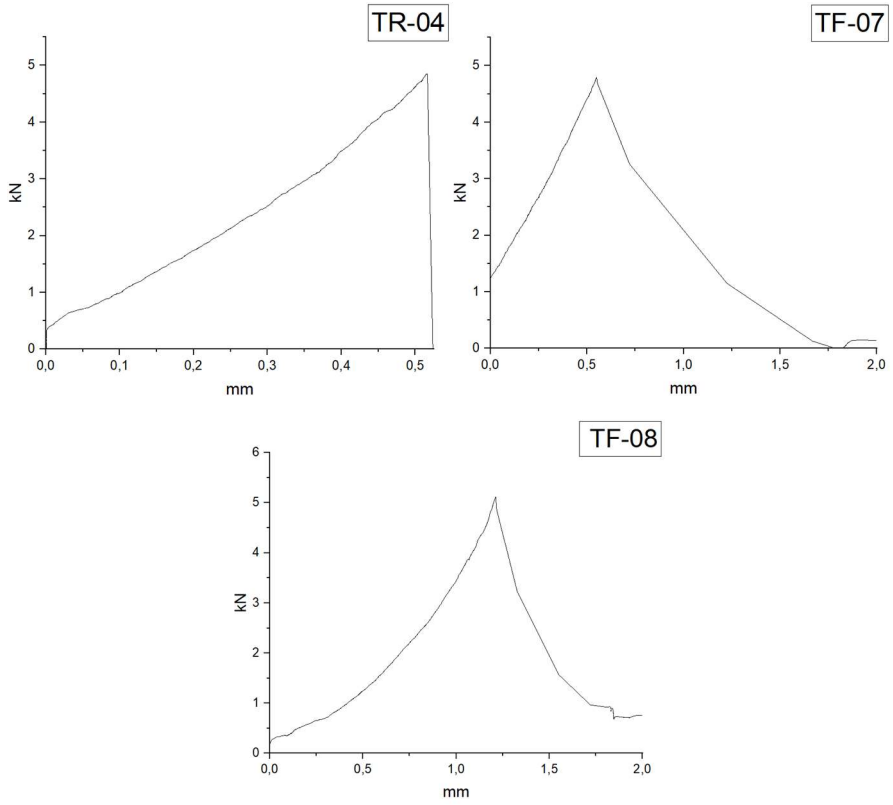
Rodrigues *et al.* (2017) observaram no estudo de concretos reforçados com fibras de politereftalato de etileno que para a resistência à tração as dosagens com teor de adição de fibras de 1,0% em volume da mistura apresentaram resistências ligeiramente menores que as dosagens sem fibras. Estes autores sugerem que isto pode ser relacionado com a presença de porosidade entre a interface da matriz cimentícia cristalizada e as fibras ocasionada pela adição das mesmas, podendo também, estar presente na avaliação mecânica do SCAAF, onde observou-se o aumento da porosidade do material com o aumento do teor de adição de fibras.

Os autores ainda indicam que compostos com a sílica ativa podem atuar na redução da porosidade do material de duas formas distintas, primeiramente devido à granulometria do material possuindo efeito físico *filler* preenchendo vazios, e o segundo efeito de natureza química pela atividade pozolânica gerando compostos cimentícios.

Durante o ensaio de flexão por 4 pontos nas misturas de SCAAF não foi possível observar o efeito de endurecimento - *strain hardening,* indicado por Junior e Garcez (2017),

com a recuperação de resistência pelo espraiamento de tensões proporcionado pelas microfibras ancoradas na matriz do solo-cimento. No entanto, houve diferenciação no modo de ruptura conforme observado nos gráficos força por deformação apresentados na Figura 25.

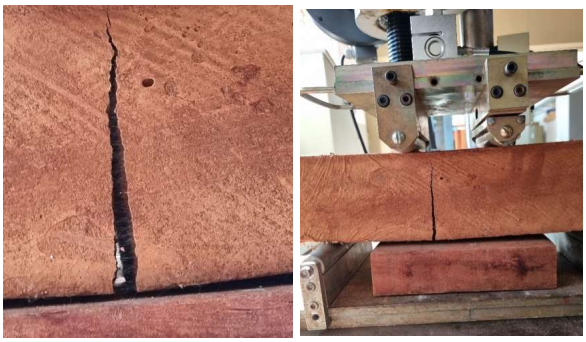
Figura 25 - Gráficos característico força (kN) versus deformação (mm) do SCAAF durante processo de ruptura.



Fonte: Próprio autor (2023).

Foi observado que o para o traço de referência TR-04 (1:5:1,2) ocorre a queda brusca da resistência após a ruptura. Já para as dosagens com adição de fibras, foi possível observar resistências residuais provocadas pelas microfibras de polipropileno atuando após a ruptura (Figura 26). Também se destaca que o aumento do teor de adição de microfibras de polipropileno de 0,06 para 0,10%, aumentou significativamente à tenacidade do material tanto para a idade de 14 quanto para 28 dias.

Figura 26 - Ruptura dos prismas de SCAAF.



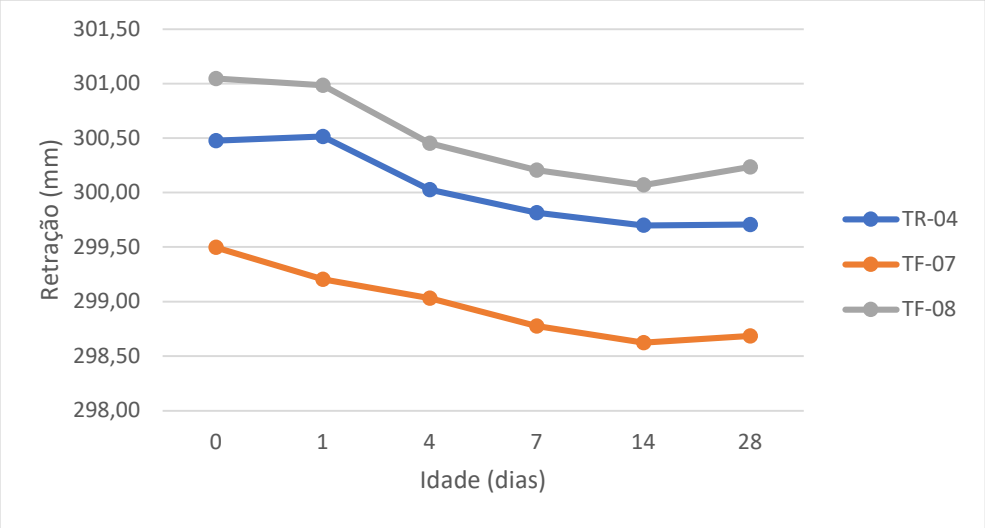
Fonte: Próprio autor (2023).

A ação das fibras no comportamento mecânico do SCAAF não mostrou aumento na resistência máxima à flexão na ruptura das dosagens com adição de fibras. Rodrigues *et al.* (2017) afirmam que neste estágio somente a matriz cimentícia do compósito é responsável pelo comportamento mecânico, não tendo ação direta do reforço de fibras. Os autores mostram, no entanto, que o ganho real da adição de fibras é devido ao aumento da tenacidade do compósito e da resistência pós fissuração.

Isto pôde ser observado no ensaio de flexão por 4 pontos aplicado no SCAAF, com o aumento da tenacidade tanto pelo aumento da idade dos corpos de prova quanto pelo aumento do teor de adição de fibras (Figura 24). Mesmo que a influência das microfibras não foi relevante para aumento nos valores de resistência à flexão, o SCAAF melhorou o comportamento frágil do compósito, absorvendo energia além do ponto de carga máxima conferida aos corpos de prova.

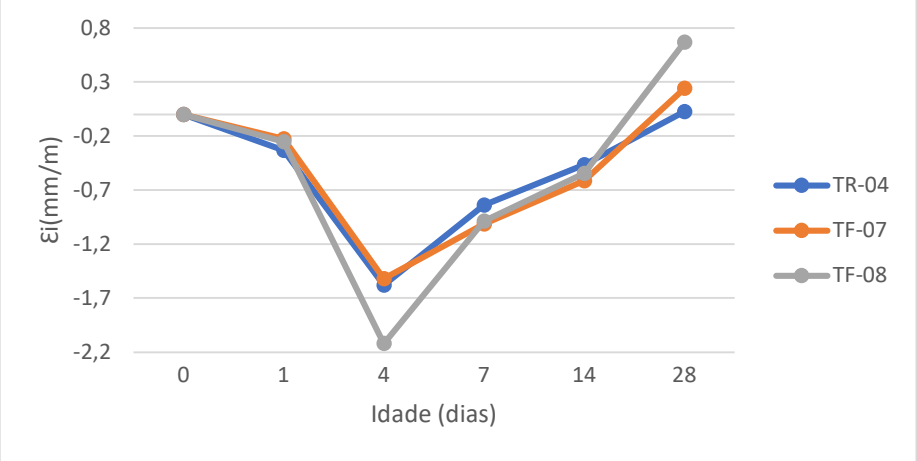
Quanto ao efeito físico da adição de fibras no solo-cimento, para o melhor entendimento do efeito das microfibras na secagem dos corpos de prova prismáticos durante a cura ambiente aos 1,4, 7, 14 e 28 dias, foram plotados nas Figuras 27 e 28 os valores de retração linear e a variação média dimensional para as dosagens de SCAAF.

Figura 27 – Retração linear do SCAAF.



Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 28 – Variação média dimensional do SCAAF.



Fonte: Próprio autor (2023).

A partir dos resultados obtidos, observou-se que para a dosagem de referência TR-04 e a dosagem com adição de fibras TF-06 houve pequena variação dimensional ao longo das idades estudadas.

A variação média dimensional dos corpos de prova prismáticos de SCAAF, como esperado, foi apresentando menores incrementos ao longo do tempo. Para os 28 dias, ainda, foram obtidas variações positivas, traduzidas como um enlongamento dos corpos de prova comparativamente às dimensões obtidas aos 14 dias, este fato podendo ser efeito da alta variação térmica ambiente durante o ensaio.

Os resultados obtidos mostraram também que a adição e variação do teor de fibras no solo-cimento autoadensável não apresentou melhoria na variação dimensional, comparativamente com a dosagem de referência.

Em relação ao teor de adição de fibras, a variação dimensional foi tão maior quanto o teor de adição de fibras, sendo a dosagem com adição fibras em 0,10% em massa de cimento, o teor com maior variação média absoluta tanto para retração com expansão.

Em concordância com os resultados anteriores para as propriedades mecânicas do SCAAF, a adição de fibras também se mostrou ineficaz na melhoria do comportamento físico do SCAAF, isto pode ser, no entanto, efeito direto da incorporação de ar durante a mistura acarretando no aumento da porosidade do SCAAF, bem como a necessidade de maiores teores de adição de água para a obtenção da consistência fluida do SCAAF para o estado autoadensável, efeitos secundários da fibra durante a sua mistura ao compósito.

6 CONCLUSÕES

A análise conjunta do estudo de dosagem e caracterização físico-mecânica do solo-cimento autoadensável adicionados de microfibras sintéticas (SCAAF) mostraram o potencial de aplicação em paredes monolíticas com possível melhora na eficiência produtiva para a dosagem de 1:5 (cimento:solo, em massa), teor de aditivo superplastificante de 1,2% em massa de cimento, consistências para espalhamento de *Slump flow* adaptado de 320 mm e teor de adição de microfibras de polipropileno tanto de 0,06 e 0,10 % em massa da mistura; atingindo resistências à compressão simples acima de 1,3 MPa aos 7 dias conforme prescrito pela NBR 17014 (2022).

Para o SCAAF, a influência de aditivos e adições no solo possibilitou a concepção de material com consistência fluida e resistência adequada para a substituição dos sistemas construtivos com base em solo com predominância de adensamento mecânico.

Observou-se que a adição do cimento tanto nas dosagens de 1:5 como 1:8 (cimento:solo, em massa) gerou suficientemente cristalização da matriz para garantir a consolidação do solo-cimento na fase endurecida. O aditivo superplastificante à base de policarboxilato manteve a consistência adequada da mistura para o estado autoadensável tanto para os diâmetros de espalhamento de *Slump flow* adaptado de 320 mm quanto para 370 mm. No entanto, em relação à adição de microfibras de polipropileno constatou-se que estas alteraram a consistência da mistura no estado fresco pela necessidade de maior teor de adição de água à mistura para o alcance da autoadensabilidade, sendo a redução da resistência mecânica do SCAAF tanto quanto maior foi o teor de adição de microfibras.

Com exceção do aditivo superplastificante, o aumento do teor de cimento e de microfibras refletiu no aumento do teor de adição de água para a obtenção da consistência da mistura para o atendimento satisfatório do autoadensamento. Assim, com o aumento da quantidade de adição de água, houve impacto direto na redução da massa específica aparente seca do SCAAF através do aumento da porosidade do compósito no estado endurecido, tanto pela provável incorporação de ar durante a mistura quanto pela deficiência do aproveitamento da água adicionada na formação de compósitos hidratados de cimento para preenchimento dos poros formados.

A diminuição da massa aparente seca do SCAAF pelo aumento da porosidade do material final prejudicou o comportamento físico e mecânico do SCAAF. Para as dosagens

estudadas apesar do alcance de resistência mecânica à compressão simples significativamente superior a requerida para aplicação como parede monolítica de edificações, não apresentou capacidade de absorção de água inferior aos 20% solicitado pela mesma norma.

A porosidade além do impacto negativo na absorção e na resistência à compressão simples pela diminuição da eficácia de transmissão de esforços dentro da matriz do SCAAF influenciou na ancoragem das fibras dentro da matriz dificultando à absorção e transmissão de esforços dentro do compósito, prejudicando assim o aumento da resistência à tração do compósito.

No entanto, o SCAAF mesmo não apresentando melhora na resistência à tração pela adição de microfibras de polipropileno para as dosagem de fibras de 0,06 e 0,10 % em massa da mistura, não apresentou ruína total quando analisado pelo ensaio de flexão de 4 pontos, podendo ser observada a atuação das fibras no compósito através da presença da resistência à flexão residual e consequentemente o aumento da tenacidade devido à presença de microfibras de polipropileno, alterando assim o comportamento frágil do solo-cimento autoadensável sem adição de fibras.

Constatou-se que o melhoramento das propriedades físicas e mecânicas do SCAAF dependem diretamente do tratamento da porosidade observada na obtenção da mistura na consistência autoadensável com a adição de fibras, podendo apresentar melhora efetiva nas resistências à compressão simples e à tração, e assim aumentar a aplicabilidade do SCAAF em estruturas onde a ruptura abrupta do material não é desejada; como por exemplo em painéis pré-fabricados, base e sub-base rodoferroviárias.

7 REFERÊNCIAS

ALCANTARA, M. A. M. Estudo do comportamento do solo-cimento autoadensável. **REEC**: Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 7, n. 2, Goiânia 2013. DOI: https://doi.org/10.5216/reec.v7i2.24560 . Disponível em: https://revistas.ufg.br/reec/article/view/24560. Acesso em: 01 ago. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT NBR 13553:** Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT NBR 13555:** Solo-cimento – Determinação da absorção de água – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT NBR 15261:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT NBR 15823**: Concreto autoadensável. Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 17014**: Taipa de Pilão – Requisitos, procedimentos e controle. Rio de Janeiro, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2018.

BORGES, A. P. S. N., MOTTA, L. A. de C., PINTO, E. B. Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais. **Revista Matéria** v.24 n.2– Rio de Janeiro 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0679. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rmat/a/LprhPDswVZzMg6ZkydLbh7f/?lang=pt#. Acesso em: 01 ago. 2023.

BRITO, J. **Patologia e Reabilitação de Construção em Terra Crua**. Lisboa, 2004.

DOI: http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1712.1762. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/282155527_Patologia_e_Reabilitacao_de_Construcao_em_Terra_Crua. Acesso em: 01 ago. 2023.

CALDAS, L. R.; MARTINS, A. P. de S.; TOLEDO FILHO, R. D. Construção com terra no Brasil: avaliação ambiental da taipa de pilão. **PARC**: Pesquisa em Arquitetura e Construção v. 12, n. 00, Campinas 2021. DOI: https://doi.org/10.20396/parc.v12i00.8656279. Disponível em: https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8656279. Acesso em: 01 de ago. 2023.

CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C.; QUEIRÓZ, H. S.; VENERE, P. C.; TEIXEIRA, R. F. S. Avaliação de argamassa de solo-cimento autoadensável (SCAA) com fibras de polipropileno quanto à susceptibilidade a absorção de água e retração. **ES: Engineering and Science**, v. 11, n. 3, 2022. DOI: https://doi.org/10.18607/ES20221114827. Disponível em: https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/14827. Acesso em: 01 de ago. 2023

CORDEIRO, M. E. V. M.; CONCEIÇÃO, P. M.; LIMA, T. V. A educação ambiental e o uso do solo-cimento. **Revista Vértices**, v. 8, n. 1/3, p. 35–54, 2010. DOI: https://doi.org/10.5935/1809-2667.20060003. Disponível em: https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/vertices/article/view/1809-2667.20060003. Acesso em: 01 de ago. 2023.

CRISTELO N., GLENDINNING S., MIRANDA T., OLIVEIRA D., SILVA R. Soil stabilisation using alkaline activation of fly ash for self-compacting rammed earth construction. **Construction and Building Materials**, v. 36, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.037 Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812004291. Acesso em: 01 de ago. 2023

DALLACORT, R.; LIMA JÚNIOR, H. C.; WILLRICH, F. L.; BARBOSA, N. P. Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6 2002. DOI: https://doi.org/10.1590/S1415-43662002000300022 Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/LYJGLZyQZfvGJHQGT63NMCS/?lang=pt. Acesso em: 01 de ago. 2023

DE FREITAS JÚNIOR, A. L.; GARCEZ, M. R. Avaliação da resistência a fadiga dos Engineered Cementitious Composites (ecc), reforçados com fibra de polipropileno e produzidos com adição de cinza de casca de arroz. **Tecno-Lógica**, v. 21, n. 2, p. 116-124, 4 jul. 2017. DOI: https://doi.org/10.17058/tecnolog.v21i2.9336 Disponível em: https://online.unisc.br/seer/index.php/tecnologica/article/view/9336. Acesso em: 01 ago. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – IPR 719.** Manual de Pavimentação. 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2006.

DURANTE, L. C.; VENERE, P. C.; BACANI, T. de D.; BELLÉ, T. A. Z.; ARCANJO , Y. R. F. Potencial inovativo do solo-cimento autoadensável para aplicação em habitações rurais. **ES: Engineering and Science**, [S. l.], v. 11, n. 3, p. 56–72, 2022. DOI: https://doi.org/10.18607/ES20221114741 . Disponível em: https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/14741. Acesso em: 01 de ago. 2023.

FERREIRA, A. P. F. **Proposta de metodologia para determinação da autoadensabilidade do solo-cimento.** Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado Profissional em eficiência energética e sustentabilidade) Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2020.

FIGUEIREDO, A. D.; FUENTE, A. F.; AGUADO; A.; ESCARIZ; R. Fibras plásticas como reforço de tubos de concreto. Parte 1: Caracterização tecnológica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Maceió. **Anais...** Fortalecendo o concreto no Brasil. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, 2012c.

FONSÊCA, N. J. M.; SOUZA, J. M.; RAMOS FILHO, R. E. B.; SILVA, J. B.; SILVA, V. M.; ACCHAR, W. Avaliação do potencial do resíduo cerâmico (RC) nas propriedades tecnológicas de tijolos de solo-aglomerante (s). **Revista Principia Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, n. 55, p. 119-129, João Pessoa set. 2021. ISSN 2447-9187. DOI: http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id4304. Disponível em: https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/4304. Acesso em: 01 ago. 2023.

GASQUES, A. C. Impactos ambientais dos materiais da construção civil: breve revisão teórica. **Revista Tecnológica**, v. 23, n. 1, p. 13-24, 4 mai. 2015. DOI: https://doi.org/10.4025/revtecnol.v23i1.23375. Disponível em: https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/view/23375. Acesso em: 01 ago. 2023.

GIORGI, P.; GRIGOLETTI, G. C.; LIMA, R. C. A.; LORENZI, L. S. Avaliação de sustentabilidade e habitabilidade de blocos de solo-cimento segundo a norma ABNT NBR 15575. **Revista Matéria** v. 23, n. 3, p. e12177, Rio de Janeiro 2018. DOI: https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0511. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rmat/a/5f639CzfSHnNSR3hcSxTgNg/?lang=pt. Acesso em: 01 ago. 2023.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. JSCE- SF 2: Method of making specimens for strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. **Concrete Library of JSCE**, Part III-2 - Method of tests for steel fiber reinforced concrete, n.3, June 1984. p.49-55.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. JSCE - SF 4: Method of tests for flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**. Concrete Library of JSCE**, Part III-2 - Method of tests for steel fiber reinforced concrete, n.3, June 1984. p.58-61.

LANGARO, E. A.; LUZ, C. A.; BUTH, I. S.; MORAES, M. C.; PEREIRA FILHO, J. I.; MATOSKI, A. A influência da composição química e da finura no desempenho de cimentos álcali ativados obtidos com escórias de alto forno. **Revista Matéria** v. 22, n. 1, p. e11792, Rio de Janeiro 2017. DOI: https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0124. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rmat/a/ZWpByYWyHH6LD4dynP9wXff/?lang=pt. Acesso em: 01 ago. 2023

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S.; LOMELI-RAMIREZ, M. G. Utilização de resíduos de Pinus spp., metacaulim de alta reatividade e resíduo de cerâmica calcinada em compósitos cimento-madeira. **Madera bosques**, v. 17, n. 2, p. 47-65, Xalapa 2011. Disponível em: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140504712011000200005&lng=es&nrm=iso . Acessado em: 01 ago. 2023.

MILANI, A. P. S.; BARBOZA, C. S. Contribuição ao estudo de propriedades do solo-cimento autoadensável para fabricação de paredes monolíticas. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 4, p. 143–153, out. 2016. DOI: https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000400110. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ac/a/PK6R76HWZKNRsJnzFZ6LtXk/?lang=pt. Acessado em: 01 ago. 2023.

MILANI, A. P. S.; PAZ, J. G. S.; DIAS, F. G. R. Uso de fibras artificiais em compósitos à base de solo-cimento autoadensável para aplicação em paredes de edificações. In: Proceedings of The 6th Amazon Pacific Green Materials Congress and Sustainable Construction Materials Lat-Rilem Conference, 2016, Cali. **Anais …,** p. 178-187. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/318781821_Uso_de_Fibras_Artificiais_em_Compositos_a_Base_de_Solo-Cimento_Autoadensavel_para_Aplicacao_em_Paredes_de_Edificacoes. Acessado em: 01 ago. 2023.

MILANI, A. P. S.; SILVA, C. I. Influence of superplasticiser on cement-stabilised selfcompacting Earth. **Ground Improvement**, v. 172, p. 85-95, 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.1680/jgrim.18.00025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325614091_Influence_of_superplasticiser_on_cement-stabilised_self-compacting_earth. Acessado em: 01 ago. 2023.

MÜNCHEN, R. M.; EHRENBRING, H. Z.; WIRTH, A.; MEDEIROS, D. R.; TUTIKIAN, B. F. Impacto nas propriedades mecânicas do concreto curado sob baixas temperaturas**. Revista Matéria** v. 24, n. 2, p. e12346, Rio de Janeiro 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0661. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rmat/a/ygDbZMkCqPjmvbVKfrrL4WN/?lang=pt#. Acessado em: 01 ago. 2023.

NEVES, C. M. M.; FARIA, O. B. **Técnicas de construção com terra.** Bauru: FEBUNESP/PROTERRA, 2011.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras.** Tese de doutorado apresentada ao programa de pós-graduação em engenharia civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

ROCHA, M. T.; REZENDE, L. R. Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. **Revista Matéria** v. 22, n. 4, p. e–11895, Rio de Janeiro 2017. DOI: https://doi.org/10.1590/S1517-707620170004.0229. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rmat/a/d6BkvL6hQgKbVnMV8Zpdbbz/abstract/?lang=pt#. Acesso: 01 ago. 2023.

RODRIGUES, P. F.; RIBEIRO, T. P.; JUNIOR, A. N. Caracterização Mecânica de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de Politereftalato de Etileno Espiraladas. **ES Engineering and Science**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 29–37, 2017. DOI: https://doi.org/10.18607/ES201764750 . Disponível em: https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/4750 . Acesso em: 01 ago. 2023.

SANBONSUGE, K.; VASCONCELOS, K.; BERNUCCI, L.; DE MOURA, E. Efeito da umidade inicial e do tempo de cura nas propriedades mecânicas de misturas solo-cimento. **TRANSPORTES** v. 25, n. 4, p. 68–82, 2017. DOI: https://doi.org/10.14295/transportes.v25i4.1257. Disponível em: https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1257. Acesso em: 01 ago. 2023.

SILVA, C. S.; BOSZCZOWSKI, R. B. Aplicabilidade de Solo-cimento Reforçado com Fibras de Polipropileno em Fundações Superficiais de Torres de Transmissão. In: Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul, XII, 2019, Joinville. **Anais ….** Disponível em: https://conferencias.ufsc.br/index.php/geosul2019/2019geosul/paper/download/190/305. Acesso em: 01 ago. 2023.

SILVA, E. J.; MARQUES, M. L.; VELASCO, F. G.; FORNARI JUNIOR, C. C. M.; LUZARDO, F. H. M. Degradação da fibra de coco imersa em soluções alcalinas de cimento e NaOH. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 10, p. 981–988, 2015. DOI: https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n10p981-988. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/x78tRfkQD5KF3zJ9NddTvHv/#. Acesso em: 01 ago. 2023.

TESSARO, A. B.; GONÇALVES, M. R, F.; GATTO, D. A.; POLLNOW, E. N.; CARREÑO, N. L. V.; DELUCIS, R. A. Compósitos cimentícios reforçados com fibras de eucalipto puras e tratadas com tetraetilortossilicato (TEOS 98%). **Ambiente Construído**, v. 15, n. 3, p. 47–55, 2015. DOI: https://doi.org/10.1590/s1678-86212015000300025. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ac/a/WFKRXZx97g3P8MszDLzyC4P/abstract/?lang=pt#. Acesso em: 01 ago. 2023.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto autoadensável.** São Paulo: PINI, 2008.