

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

LUANA MARINI MANFRO

**EFEITO DO TRATAMENTO DE MICROFIBRAS DE SISAL NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS
DIRECIONADAS**

CAXIAS DO SUL

2024

LUANA MARINI MANFRO

**EFEITO DO TRATAMENTO DE MICROFIBRAS DE SISAL NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS
DIRECIONADAS**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado a
Universidade de Caxias do Sul como requisito à
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador Prof. Dr. Vinício Cecconello

CAXIAS DO SUL

2024

LUANA MARINI MANFRO

**EFEITO DO TRATAMENTO DE MICROFIBRAS DE SISAL NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS
DIRECIONADAS**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado a
Universidade de Caxias do Sul como requisito à
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: / /

Banca Examinadora

Prof. Dr. Vinício Cecconello
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Luciano Zatti
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Matheus Poletto
Universidade de Caxias do Sul

RESUMO

MANFRO, LUANA. **Efeito do tratamento de microfibras de sisal nas propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras direcionadas.**

Caxias do Sul, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2024.

A demanda por materiais eficientes e sustentáveis a utilização de microfibras naturais em compósitos cimentícios tem ganhado relevância no cenário da construção civil, bem como as opções de tratamento disponíveis para melhorar sua durabilidade quando aplicadas na matriz, por isso, este trabalho investiga o impacto do tratamento de microfibras de sisal nas propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras direcionadas. As microfibras foram tratadas com hidróxido de sódio e com uma combinação de látex e pozolanas, com o objetivo de melhorar sua interação com a matriz cimentícia e aumentar suas resistências. Para avaliar a eficácia dos tratamentos, foram realizados ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão em corpos de prova que incluíram um controle sem fibras (CR), fibras não tratadas (CST), fibras tratadas com látex e pozolanas (CLS) e fibras tratadas com hidróxido de sódio (CHS). Os resultados mostraram que, aos 42 dias, as amostras tratadas com hidróxido de sódio (CHS) apresentaram resistências significativas, com 6,93 MPa na flexão e 29,55 MPa na compressão, enquanto CR atingiu de 6,31 MPa na resistência a tração na flexão e 32,93 MPa na resistência a compressão. As microfibras tratadas com látex e pozolanas (CLS) apresentaram valores cerca de 2% maiores nos resultados de resistência a tração na flexão em comparação a CR e cerca de 42,8% menores nos resultados de resistência a compressão. A análise Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) indicou uma melhora na área superficial das fibras para sua aplicação em compósitos cimentícios, possibilitando uma melhor interação entre a microfibra e a matriz. A análise por Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) revelou alterações na composição química das fibras após os tratamentos, evidenciando a presença de silício e sódio, que indicam efetivação dos tratamentos.

Palavras-chave: Microfibras de sisal. Tratamento. Propriedades mecânicas. Compósitos cimentícios.

ABSTRACT

MANFRO, LUANA. **Effect of sisal microfiber treatment on the mechanical properties of cementitious composites reinforced with directed fibers**. Caxias do Sul, 2024. Undergraduate Thesis in Civil Engineering, University of Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2024.

The demand for efficient and sustainable materials, including the use of natural microfibers in cementitious composites, has gained relevance in the construction industry, along with the available treatment options to improve their durability when applied in the matrix. Therefore, this study investigates the impact of sisal microfiber treatment on the mechanical properties of fiber-reinforced cementitious composites. The microfibers were treated with sodium hydroxide and a combination of latex and pozzolans to enhance their interaction with the cementitious matrix and increase their strengths. To evaluate the effectiveness of the treatments, flexural tensile and compressive strength tests were conducted on specimens that included a control without fibers (CR), untreated fibers (CST), fibers treated with latex and pozzolans (CLS), and fibers treated with sodium hydroxide (CHS). The results showed that after 42 days, the samples treated with sodium hydroxide (CHS) exhibited significant strengths, with 6.93 MPa in flexural strength and 29.55 MPa in compressive strength, while CR reached 6.31 MPa in flexural tensile strength and 32.93 MPa in compressive strength. The microfibers treated with latex and pozzolans (CLS) showed values about 2% higher in flexural tensile strength compared to CR and about 42.8% lower in compressive strength. Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis indicated an improvement in the surface area of the fibers for their application in cementitious composites, enabling better interaction between the microfiber and the matrix. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) analysis revealed changes in the chemical composition of the fibers after treatments, showing the presence of silicon and sodium, indicating the effectiveness of the treatments.

Keywords: Sisal microfibers. Treatment. Mechanical properties. Cementitious composites.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Ana Manfro e João Manfro por terem possibilitado a minha formação e por estarem ao meu lado e me apoiarem, bem como ao meu namorado, Vittório Gaboardi, por ter me dado suporte emocional em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Vinício Ceconello, por todo o suporte, ensinamentos e orientações não só durante o desenvolvimento da pesquisa, mas também durante todo o meu período de formação.

À Universidade de Caxias do Sul pelo suporte com laboratórios e equipamentos.

Ao meu melhor amigo, Efrain Schmitt, por todos os momentos juntos durante a graduação, por todo o suporte emocional e por todos os ensinamentos compartilhados.

Ao meu amigo Tiago Vezzaro, pela disponibilidade em ler meu trabalho e auxiliar, pelos momentos e conversas durante a graduação.

Ao meu amigo e laboratorista da Universidade de Caxias do Sul, Matheus Frosi, pela disposição e paciência, por me ouvir e participar do desenvolvimento desta pesquisa.

A minha amiga Camila de Oliveira, colega de graduação e dupla de trabalhos, pela persistência e por estar ao meu lado nos momentos de estudos, desenvolvimento de projetos e conversas sobre a vida.

E, de um modo geral, agradeço a todos que me acompanharam e prestaram suporte durante o meu período de formação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fibra de polipropileno (a), fibra de poliéster (b) e fibra de vidro (c).....	18
Figura 2 - Representação de falha na interação entre a fibra e a matriz.....	19
Figura 3 - Fibra de coco (a), fibra de sisal (b) e fibra de juta (c).....	20
Figura 4 - Processo do tratamento da fibra natural por hidróxido de sódio	22
Figura 5 - Processo do tratamento da fibra natural por silanização	23
Figura 6 - Processo do tratamento da fibra natural com látex e pozolanas.....	24
Figura 7 - Arranjo de 17 fibras no molde	26
Figura 8 - Resistência a tração a partir de diferentes dosagens de fibras.....	26
Figura 9 - Resistência a compressão a partir de diferentes dosagens de fibras	27
Figura 10 - Resistência a flexão a partir de diferentes dosagens de fibras	27
Figura 11 - Programa experimental do estudo	30
Figura 12 - Curva granulométrica do agregado miúdo	35
Figura 13 - Fibras de sisal cortadas em 20 mm	36
Figura 14 - Determinação da massa específica da fibra de sisal	37
Figura 15 - Fibras de sisal tratadas com látex e pozolanas	40
Figura 16 - Procedimento de mistura dos materiais	41
Figura 17 - Processo de preparação da mistura	44
Figura 18 - Arranjo das fibras nos moldes.....	44
Figura 19 - Corpos de prova após serem desmoldados.....	45
Figura 20 - Ensaio resistência a tração na flexão.....	47
Figura 21 - Ensaio de resistência a compressão.....	48
Figura 22 - Análise MEV da microfibras de sisal sem tratamento	50
Figura 23 - Análise MEV da microfibras de sisal tratada com hidróxido de sódio.....	52
Figura 24 - Análise MEV da microfibras de sisal tratada com látex e pozolanas	53
Figura 25 - Análise MEV da microfibras sem tratamento e com tratamento	54
Figura 26 - Espectroscopia de dispersão de energia da fibra sisal sem tratamento	55
Figura 27 - Espectroscopia de dispersão de energia da fibra sisal tratada com látex e pozolanas.....	56
Figura 28 - Espectroscopia de dispersão de energia da fibra sisal tratada com hidróxido de sódio	57
Figura 29 - Resultados de resistência média a tração na flexão ao longo do tempo	58

Figura 30 - Linhas de tendência dos resultados médios de resistência a tração na flexão.....	61
Figura 31 - Resultados de resistência média a compressão ao longo do tempo	63
Figura 32 - Linhas de tendência dos resultados médios de resistência a compressão	66
Figura 33 - Análise MEV dos corpos de prova	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Traços de referência	28
Tabela 2 - Especificações do fabricante para o CPII F-32	32
Tabela 3 - Granulometria do agregado miúdo.....	34
Tabela 4 - Caracterização dos agregados miúdos	35
Tabela 5 - Resultados de determinação de massa específica da fibra	37
Tabela 6 - Especificações do fabricante para o látex	38
Tabela 7 - Traço utilizado na pesquisa.....	39

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Metodologia de caracterização do agregado miúdo.....	33
-----------------------------------------------------------------	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO GERAL	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 UTILIZAÇÃO DE MICROFIBRAS EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	16
2.2 TIPOS DE MICROFIBRAS	17
2.2.1 Fibras Sintéticas	18
2.2.2 Fibras Naturais	19
2.3 TIPOS DE TRATAMENTOS EM FIBRAS NATURAIS	21
2.3.1 Hidróxido de Sódio (NaOH)	21
2.3.2 Silanização	22
2.3.3 Látex e Pozolanas	23
2.4 DOSAGEM	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	30
3.1.1 Variáveis de resposta	30
3.1.2 Variáveis de controle	31
3.2 MATERIAIS	31
3.2.1 Cimento	32
3.2.2 Cinza da Casca do Arroz	33
3.2.3 Agregado Miúdo	33
3.2.4 Água	36
3.2.5 Fibra	36
3.2.6 Látex Natural	38
3.2.7 Hidróxido de Sódio	38
3.3 MÉTODOS	38
3.3.1 Traços de referência	38
3.3.2 Tratamento das fibras	39
3.3.3 Procedimento de mistura dos materiais	40
3.3.4 Ensaio de tração na flexão	46

3.3.5	Ensaio de compressão axial.....	47
3.3.6	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	49
4.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	50
4.1	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO.....	50
4.1.1	Análise microscopia eletrônica de varredura (MEV) das fibras	50
4.1.2	Espectroscopia de dispersão de energia (EDS) e análise das fibras	55
4.1.3	Resistência a tração na flexão.....	58
4.1.4	Resistência a compressão.....	62
4.1.5	Análise microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos corpos de prova 67	
5.	CONCLUSÃO.....	69
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
	APÊNDICE A – PROGRAMA EXPERIMENTAL DA SEGUNDA ETAPA.....	75
	APÊNDICE B – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO AO LONGO DO TEMPO	76
	APÊNDICE C – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AO LONGO DO TEMPO	77
	APÊNDICE D – GRÁFICO DA ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE DISPERSÃO DE ENERGIA DA FIBRA DE SISAL SEM TRATAMENTO.....	78
	APÊNDICE E – GRÁFICO DA ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE DISPERSÃO DE ENERGIA DA FIBRA DE SISAL TRATADA COM LÁTEX E POZOLANAS	79
	APÊNDICE F – GRÁFICO DA ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE DISPERSÃO DE ENERGIA DA FIBRA DE SISAL TRATADA COM HIDRÓXIDO DE SÓDIO	80

1. INTRODUÇÃO

As microfibras naturais, como a de sisal, têm se apresentado como uma alternativa promissora para atuar como reforço em compósitos cimentícios, visto que são abundantes e de baixo custo, além de possuírem características mecânicas favoráveis de resistência a tração na flexão. Para que tenham uma durabilidade adequada, seu uso requer alguns cuidados, como a aplicação de tratamento prévio a sua utilização na matriz cimentícia.

Segundo Figueiredo (2011) é comum que a utilização de fibras em compósitos cimentícios, por agir de forma conjunta com os demais materiais que lhe deram origem, atue como reforço para algumas limitações encontradas nas matrizes de concreto, além de apresentar resultados superiores se comparados aos obtidos com os materiais que lhe deram origem individualmente.

Peruzzi (2002) e Yoo e Banthia (2019) definem que as propriedades mecânicas encontradas em argamassas e concretos que possuem microfibra apresentam-se de forma mais eficiente em comparação aos resultados encontrados para argamassas e concretos convencionais, pois podem resistir a propagação e aumento de fissuras em situações de cargas estáticas e de impacto.

Di Prisco et al. (2009) afirmam que as microfibras e macrofibras são definidas pela relação entre o diâmetro e o comprimento, sendo que as microfibras geralmente são utilizadas para reduzir a fissuração causada pelo efeito de retração por encolhimento nas argamassas, visto que desempenham uma função de ponte de transferência de tensões entre as superfícies de fissuração.

Conforme Aruna (2014), a questão sustentável relacionada a construção civil tem recebido maior atenção, sendo que inicialmente o foco eram os recursos limitados, entretanto, atualmente a ênfase está direcionada a escolha e utilização de materiais que causam menor impacto ao meio ambiente. Collivignarelli et al. (2021) reforçam a ideia de que um concreto com menor impacto ambiental requer a utilização de materiais alternativos em sua produção.

As opções de fibras disponíveis no mercado se dividem em dois grupos: sintéticas e vegetais. As principais fibras sintéticas comercializadas são as fibras de aço, carbono, vidro e poliméricas. Já para as fibras vegetais, pode-se citar como exemplo as fibras de coco, celulose e malva (Silva, 2006).

As fibras vegetais, quando utilizadas em compósitos como o concreto, necessitam de cuidados direcionados a preservação de sua integridade e verificação de compatibilidade física entre os diferentes materiais utilizados. O pH alcalino da matriz cimentícia apesar de proteger a fibra de ataques biológicos, também é capaz de atacá-la, fazendo com que seu desempenho seja afetado, visto que a água presente nos poros da matriz de cimento Portland possui pH superior a 13 (Savastano, 2000).

Moura (2019) relata que utilizar microfibras vegetais em compósitos acaba se apresentando como um desafio, visto que existe uma dificuldade de compatibilização da fibra com alguns materiais, além de citar que o tratamento químico vem sendo utilizado como forma de melhorar a interação entre a fibra e a matriz.

Os diferentes estudos desenvolvidos a respeito da aplicação de microfibras em compósitos cimentícios revelam os possíveis benefícios a serem obtidos com o uso desse material. No entanto, devido a sua origem vegetal são suscetíveis a degradação, o que pode inviabilizar o seu uso. Nesse contexto, o tratamento das fibras é considerado uma possibilidade para aumentar a durabilidade das fibras quando utilizadas no traço de uma matriz cimentícia.

O presente estudo pretende comparar as propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com microfibras naturais de sisal tratadas e não tratadas, aplicadas na matriz de forma direcionada.

1.1 OBJETIVO GERAL

Investigar o efeito do tratamento de microfibras de sisal nas propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras direcionadas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) analisar o tratamento com látex líquido natural em conjunto com pozolanas e com hidróxido de sódio em microfibra de sisal, para utilização como reforço em compósitos cimentícios;

b) comparar os resultados obtidos entre a matriz cimentícia produzida com microfibra de sisal tratada e microfibra de sisal não tratada a partir dos ensaios de tração na flexão e compressão;

- c) realizar a análise MEV e EDS das fibras individualmente e corpos de prova pós rompimento para verificar a ocorrência do tratamento e interação superficial;
- d) analisar a viabilidade técnica da utilização de tratamento em microfibras naturais aplicadas como reforço em compósitos cimentícios.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 UTILIZAÇÃO DE MICROFIBRAS EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Prakash e Sangeeth (2022) e Priya e Sudalaimani (2023), relatam que, de modo geral, o concreto convencional apresenta excelente desempenho de resistência a compressão, no entanto, seu desempenho de resistência a tração é pouco satisfatório. Portanto, para suprir essa fraqueza, faz-se necessária a utilização de reforços no processo produtivo do compósito a partir de traços definidos, sendo que a introdução de uma determinada quantidade de microfibras no concreto (CRF) pode atuar para superar as fragilidades mecânicas identificadas.

A existência de pequenas fissuras nos pontos de interação entre argamassa e agregado é uma das causas que potencializa a fragilidade do concreto convencional e, devido a sua baixa resistência a tração, essas fissuras se alargam conforme a aplicação de uma carga. Essas microfissuras surgem durante o processo de endurecimento do concreto. Tal fragilidade motivou pesquisadores a explorar e desenvolver materiais capazes de suprir essas necessidades, como as microfibras (Tamil;Thandavamoorthy, 2015).

Neville e Brooks (2013) afirmam que a micro fissuração ocorre em função das diferenças de comportamento entre a pasta de cimento e o agregado em função da tensão-deformação, a partir de movimentações de origem térmica e variação de umidade.

Denomina-se interface de transição a zona em que ocorrem os processos de interação entre o concreto e a microfibra. Antes da ocorrência de fissuração, o mecanismo é caracterizado como elástico, uma vez que os deslocamentos longitudinais na interface entre a microfibra e a matriz são compatíveis geometricamente. À medida que o carregamento aumenta, ocorre o desprendimento da fibra em relação a matriz e a transferência de tensões passa a ser por atrito (Castoldi, 2018).

De acordo com Banthia e Sheng (1996) e Banthia e Nandakumar (2003), as microfibras se diferenciam das macrofibras a partir de um valor mínimo arbitrado de 200 cm²/g como área superficial específica e, devido ao seu tamanho reduzido, as microfibras têm a capacidade de fortalecer os mecanismos a nível macroscópico, permitindo que as fissuras na matriz sejam estabilizadas antes de se tornarem

instáveis, ou seja, otimizam a resposta do compósito cimentício antes ou imediatamente após a formação de fissuras.

Segundo Cecconello e Poletto (2024), a existência de fissuras nos compósitos cimentícios, geradas em função das tensões de tração, podendo estas serem originadas em função do efeito de retração do próprio material a partir da perda de água ou por origem mecânica, atuam como meio para acelerar a degradação da estrutura. Por isso, a adição de fibras poliméricas pode atuar como reforço da matriz, tornando o material mais durável.

Figueiredo (2005) caracteriza as microfibras em dois tipos: fibriladas e monofilamento. A microfibra do tipo fibrilada é definida como uma malha de fibra de seção retangular, a qual possibilita o aumento da adesão entre a fibra e a matriz devido a um efeito de intertravamento. Já a microfibra do tipo monofilamento é definida como fios de comprimento padrão.

A partir de testes realizados, Fernandes (2023) constatou que a incorporação de microfibras no concreto pode controlar a formação de fissuras no material quando este estiver em estado endurecido, ao mesmo tempo em que influencia na consistência, reologia e trabalhabilidade da mistura, sendo que essas alterações dependem também de variáveis vinculadas as microfibras, como tipo de fibra utilizada, dosagem e geometria.

Xu et al. (2021) utilizaram microfibras em sua pesquisa de durabilidade do concreto e realizaram testes de retração por secagem, penetração de íons cloreto, permeabilidade a água, resistência a abrasão e resistência ao impacto. A partir dos resultados encontrados, foi evidenciado que a utilização de microfibras é benéfica ao processo retração por encolhimento, permeabilidade a água e resistência a fissuração, contudo, deve-se atentar para a dosagem ideal de microfibra a ser utilizada. No caso da resistência a carbonização, a microfibra desempenha um papel positivo nos resultados e melhora com o aumento da dosagem.

2.2 TIPOS DE MICROFIBRAS

Mohajerani et al. (2019), a partir de seus estudos, afirmam que as fibras naturais apresentam uma série de vantagens, como a disponibilidade abundante, eficiência energética, custo acessível, sustentabilidade econômica e capacidade de minimizar o impacto ambiental, porém, embora possam substituir as fibras sintéticas em certas

aplicações, sua durabilidade é limitada e tende a sofrer degradação com o tempo. Com relação as fibras sintéticas, os autores apontam que elas oferecem benefícios significativos na redução dos custos da construção, mas ressaltam que elas dependem de matérias-primas e causam impacto ambiental.

Serão apresentados a seguir os principais conceitos definidos por autores em seus estudos a respeito dos diferentes tipos de fibras existentes.

2.2.1 Fibras Sintéticas

As fibras de polipropileno são compostas por um polímero termoplástico que desempenha um papel importante na indústria devido a sua resistência a produtos químicos e umidade, bem como em função de suas propriedades mecânicas. A configuração de sua cadeia influencia suas características (Souza, 2010). Na Figura 1a é possível visualizar um exemplo de fibra de polipropileno.

Figura 1 - Fibra de polipropileno (a), fibra de poliéster (b) e fibra de vidro (c)



Fonte: Borges et al. 2019 (a), Ehrenbring et al. 2018 (b) e FiberGlass.com 2022 (c).

Já as fibras de poliéster são amplamente utilizadas na indústria têxtil e surgem da extração de resinas do petróleo ou da reciclagem de diversos produtos, como as garrafas PET. Na construção civil, vêm sendo utilizadas como forma de minimizar o surgimento de fissuras (Souza et al., 2019).

De acordo com Oliveira et al. (2018), aproximadamente 53% das garrafas poliméricas no Brasil não passam pelo processo de reciclagem, mas, ao reutilizá-las é possível impulsionar a sustentabilidade, além de proporcionar aumento na resistência do concreto. Na Figura 1b é possível visualizar um exemplo de fibra de poliéster.

Peruzzi (2002) e Silva et al. (2023) afirmam que apesar de as fibras de vidro convencionais serem produzidas com um material considerado frágil, elas possuem características químicas e físicas que lhe proporcionam resistência a impacto, são estáveis mesmo em altas temperaturas, sofrem grande alongamento na ruptura, possuem facilidade de processamento e, quando comparadas a outras fibras comerciais, são mais viáveis economicamente. No entanto, não resistem bem ao meio alcalino da matriz de cimento, o que acaba impactando seu desempenho mecânico.

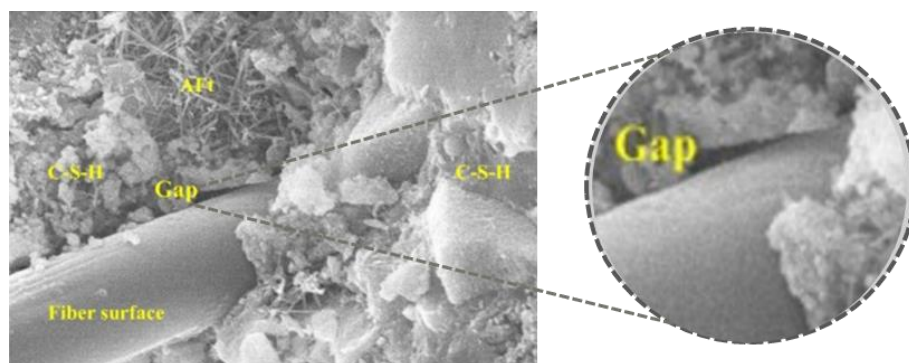
Na Figura 1c é possível visualizar um exemplo de fibra de vidro.

2.2.2 Fibras Naturais

Discher et al. (2023) relatam que as fibras vegetais passaram a ser objeto de estudo e aplicação no concreto em função de vantagens como: baixa densidade, facilidade de reciclagem, custo acessível e baixo consumo energético durante a produção. Além disso, a utilização de fibras está relacionada ao prolongamento da vida útil das estruturas, o que reduz a necessidade de utilizar novos materiais na construção de edificações.

Conforme Pieckering et al. (2016), a conexão entre a fibra e a matriz desempenha um papel crucial na determinação das características mecânicas dos compósitos, pois a transferência de tensão entre a matriz e as fibras exige uma ligação interfacial sólida para obter o reforço ideal. Em compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais, as fibras são hidrofílicas e as matrizes tendem a ser hidrofóbicas, o que pode ocasionar uma interação superficial frágil e limitar o desempenho mecânico. A Figura 2 apresenta uma falha na interação superficial entre a fibra e a matriz.

Figura 2 - Representação de falha na interação entre a fibra e a matriz



Fonte: Adaptado de Xu et al. (2021)

Savastano (2000) descreve sobre os diferentes percentuais de celulose e lignina que cada fibra natural tem dependendo de sua origem e afirma que a fibra de coco possui 53% de celulose e 40,8% de lignina em massa.

De acordo com Silva et al. (2018), 10% da massa do coco é composta por fibras. Em 2015 aproximadamente 960 mil metros cúbicos de fibra de coco foram gerados e quando volumes como esse não são reutilizados, surge uma demanda de espaço para a sua disposição. Ocorre que, a utilização da fibra de coco na construção civil pode resultar em uma redução significativa do uso de agregados minerais, como areia e brita, além de promover melhorias nas características físicas e mecânicas do compósito cimentício. Na Figura 3a é possível visualizar um exemplo de fibra de coco.

Thomas e Jose (2022) descrevem o processo de extração da fibra de sisal pelos processos de trituração, separação, lavagem e secagem. O autor também ressalta que a fibra de sisal é a que possui maior resistência dentre as fibras naturais, além de ser acessível, de baixo custo, alta durabilidade e ser bastante hidrofílica.

A composição química da fibra de sisal compreende aproximadamente de 54% a 66% de celulose, 12% a 17% de hemicelulose, 7% a 14% de lignina, 1% de pectina e 1–7% de cinzas (Silva et al., 2010). Na Figura 3b é possível visualizar um exemplo de fibra de sisal.

Figura 3 - Fibra de coco (a), fibra de sisal (b) e fibra de juta (c)



Fonte: Silva et al. 2018 (a), Borges et al. 2019 (b) e Song et al. 2022 (c)

Já a fibra de juta é originada da casca da planta de juta e possui entre 61% a 72% de celulose e 12% a 13% de lignina. Seu alto teor de celulose contribuiu para uma melhor resistência a tração da fibra, o que implica na melhoria da resistência a tração do concreto (Ahmad et al., 2022).

De acordo com Song et al. (2021), a fibra de juta é a mais barata e mais acessível dentre as fibras naturais disponíveis, além de possuir boa resistência a tração e ao fogo. Também possui capacidade de reutilização e é considerada sustentável. Na Figura 3c é possível visualizar um exemplo de fibra de juta.

2.3 TIPOS DE TRATAMENTOS EM FIBRAS NATURAIS

A partir de verificações realizadas por Madhu et al. (2020), foram estudados os efeitos da aplicação de diferentes tipos de tratamentos químicos na fibra natural com o intuito de melhorar a sua interação com a matriz cimentícia. A partir dos resultados encontrados foi constatado que todos os tratamentos atuaram de forma positiva no desempenho interfacial da microfibras com o concreto.

Propõe-se que sejam realizados aprimoramentos nas fibras naturais de forma a alcançar resultados satisfatórios no que se refere as propriedades superficiais destas, a fim de melhorar a adesão entre as diferentes matrizes. A tendência observada indica uma preferência pela utilização de tratamento químico (Faruk et al., 2014).

2.3.1 Hidróxido de Sódio (NaOH)

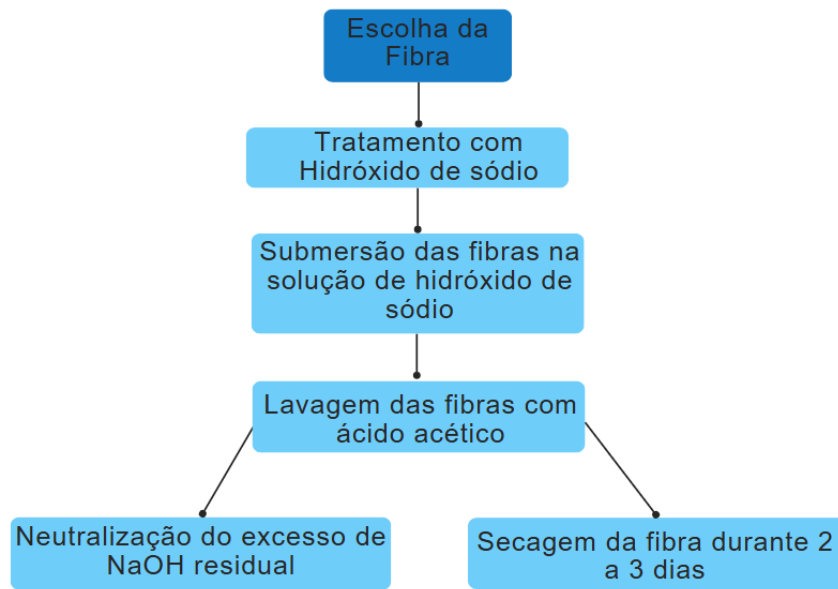
Jahn et al. (2002) afirmam que a utilização de tratamento alcalino com hidróxido de sódio, denominado mercerização, influencia na composição química da estrutura da fibra, visto que atua como meio para a remoção de substâncias como a lignina, presente em fibras naturais. Conseqüentemente, ocorre o aumento do teor de celulose, o que favorece a resistência da fibra. Os autores realizaram o estudo com diferentes concentrações de NaOH, sendo 1% a 5%, 6% a 10%, 11% a 15%, 16% a 20% e mais de 20%, em massa.

De Klerk et al. (2020) relatam que em seu estudo as fibras foram submersas em solução de hidróxido de sódio, com diferentes concentrações e, posteriormente, foram lavadas com ácido acético de forma a neutralizar o possível excesso de NaOH residual na superfície da fibra, bem como colocadas para secar durante 2 a 3 dias para que pudessem ser utilizadas nos testes.

Os testes de Klerk et al. (2020) revelaram que o desempenho do tratamento alcalino depende da concentração de NaOH utilizado em massa, visto que foi

constatado que a concentração de 2% influenciou positivamente os resultados de resistência ao arrancamento, no entanto, as concentrações de 20% a 30% atuaram de forma negativa, pois causaram danos a estrutura da fibra. A Figura 4 apresenta o processo de tratamento da fibra natural com hidróxido de sódio.

Figura 4 - Processo do tratamento da fibra natural por hidróxido de sódio



Fonte: Adaptado de Klerk et al. (2020).

2.3.2 Silanização

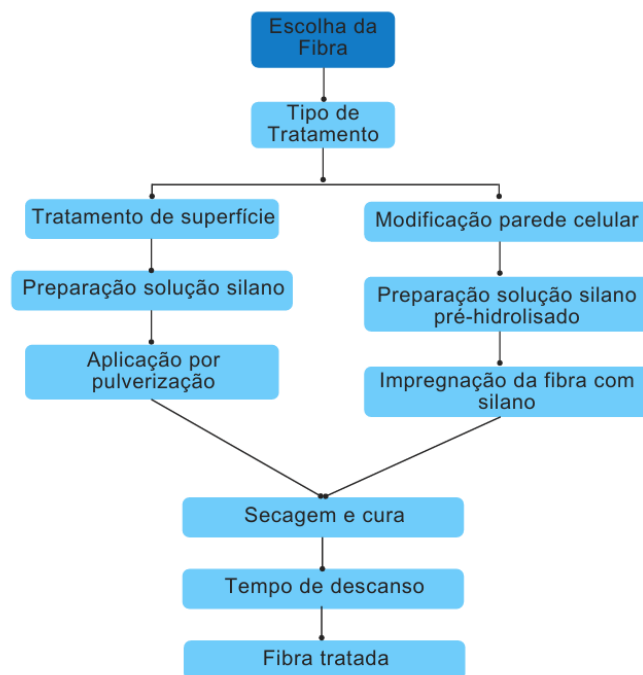
Du et al. (2021) definem que o tratamento com silano atua melhorando a interação entre as microfibras naturais e a matriz e melhora a adesão e o desempenho geral do compósito, pois atua na redução de absorção de água e resistência a degradação, além de definirem categorias de aplicação em tratamento superficial e modificação da parede celular.

Os autores caracterizam o tratamento superficial pelo revestimento da superfície externa das fibras com a técnica de pulverização, na qual uma solução de silano é preparada em solventes orgânicos ou misturas de solvente/água e pulverizada diretamente sobre as fibras, o que resulta em um revestimento superficial com silanos. Já a modificação da parede celular caracteriza-se pela impregnação das fibras com silano, no qual as fibras naturais são tratadas com uma solução de silano pré-hidrolisado, permitindo que o silano penetre na fibra e se difunda pelas paredes.

Bilba e Arsene (2008) relatam que o tratamento com silano atua de forma a melhorar a resistência a água das fibras e que os resultados variam conforme o tipo de fibra utilizado, além de citar que a concentração de silano utilizada influencia na solubilidade do silano, melhoria da espessura do filme superficial e na cobertura uniforme da superfície da fibra.

A Figura 5 apresenta o processo de tratamento da fibra natural pelo método de silanização.

Figura 5 - Processo do tratamento da fibra natural por silanização



Fonte: Adaptado de Du et al. (2020).

2.3.3 Látex e Pozolanas

De acordo com Moreno et al. (2006), 99% de todo o látex natural produzido no mundo é extraído da *Hevea Brasiliensis*, que é popularmente conhecida como seringueira, no entanto, existem aproximadamente 2000 espécies de plantas que produzem a borracha natural, a qual é uma matéria prima agrícola de elevada importância para a manufatura de diferentes produtos.

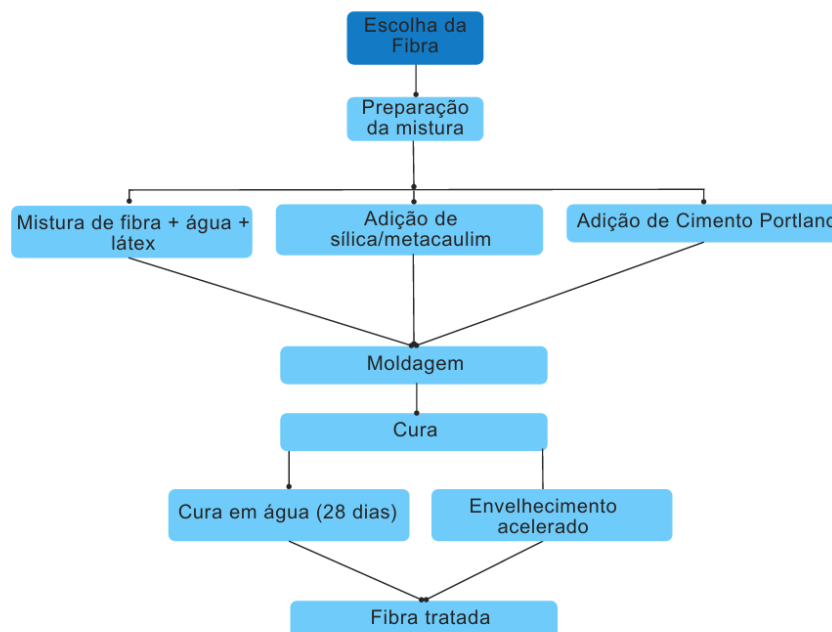
Silva et al. (2018) analisaram a aplicação de látex natural e materiais pozolânicos, especificamente sílica e metacaulim, como tratamento para as microfibras naturais de forma a aumentar a durabilidade do compósito, com o intuito de reduzir o transporte de íons na matriz cimentícia e promover reações pozolânicas

locais, de forma a proteger as fibras de coco do ataque alcalino. Inicialmente as fibras de coco foram combinadas com água e látex natural, etapa que serviu para lubrificar e aumentar a adesão das fibras com a matriz.

Posteriormente, foi adicionada a sílica ou metacaulim, estes misturados juntamente com a fibra, água e látex e em seguida o cimento também foi incorporado a mistura. O estudo constatou que o tratamento ofereceu vantagens, como a redução da degradação, pois os materiais pozolânicos reagiram com o hidróxido de cálcio do compósito, formando hidratos de silicato de cálcio, o que reduziu o pH local e o ataque alcalino às fibras. Além disso, também foi constatada a melhoria da ligação entre a matriz e as fibras e uma redução na formação de hidróxido de cálcio.

A Figura 6 apresenta o processo de tratamento da fibra natural utilizando látex natural e pozolanas.

Figura 6 - Processo do tratamento da fibra natural com látex e pozolanas



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2018).

2.4 DOSAGEM

Wu et al. (2023) afirmam que uma dosagem elevada de fibras pode agir de forma insignificante na matriz cimentícia ou até mesmo resultar em efeitos negativos se comparado ao concreto convencional, pois existe a possibilidade de afetar a trabalhabilidade, propriedades mecânicas, durabilidade e aumentar a porosidade. Os autores mencionam que a distribuição adequada das fibras no concreto pode apresentar-se de forma desafiadora, pois assim como a dosagem, a distribuição também é um fator determinante nos resultados encontrados.

O estudo realizado por Xu et al. (2021) analisou a influência da dosagem de diferentes tipos de microfibras nos resultados de desempenho do concreto por meio de testes de encolhimento por secagem, permeabilidade à água, resistência a fissuras, carbonização e penetração de íons cloreto. As fibras utilizadas foram: fibra de celulose, fibra de álcool polivinílico e fibra de poliolefina. A dosagem das fibras variou entre 1,0 kg/m³ a 4,5 kg/m³.

Neste estudo, verificou-se que para alguns testes, conforme a dosagem da fibra aumentava, os resultados melhoravam, no entanto, também ocorreram situações em que o aumento da dosagem prejudicou o desempenho do concreto, o que foi justificado na pesquisa pelo fato de que a alta dosagem pode danificar a estrutura porosa da matriz.

Islam e Ahmed (2018) observaram em seus estudos que além da dosagem da fibra, outros aspectos devem ser considerados com relação ao desempenho da matriz cimentícia, como o volume ocupado e o comprimento das fibras utilizadas, visto que para uma mesma dosagem de fibra, foi constatado que comprimentos diferentes influenciaram nos resultados obtidos.

Conforme Figueiredo (2011), as fibras podem ser dosadas em volume ou em massa por metro cúbico de concreto e, ao ocorrer a fissuração, as fibras de maior fator de forma estarão dispostas em maior número na seção de ruptura, o que resulta em uma maior resistência pós fissuração para um dado teor de fibra.

O método de dosagem das fibras de coco descrito por Silva et al. (2018) envolve um arranjo específico em moldes prismáticos, onde um conjunto de 17 fibras é disposto de forma ordenada antes de ser completamente preenchido com a pasta de cimento. Essa técnica permite uma distribuição controlada das fibras dentro da matriz, garantindo que elas estejam posicionadas estrategicamente para maximizar suas

propriedades mecânicas. A Figura 7 apresenta o arranjo das fibras nos moldes prismáticos.

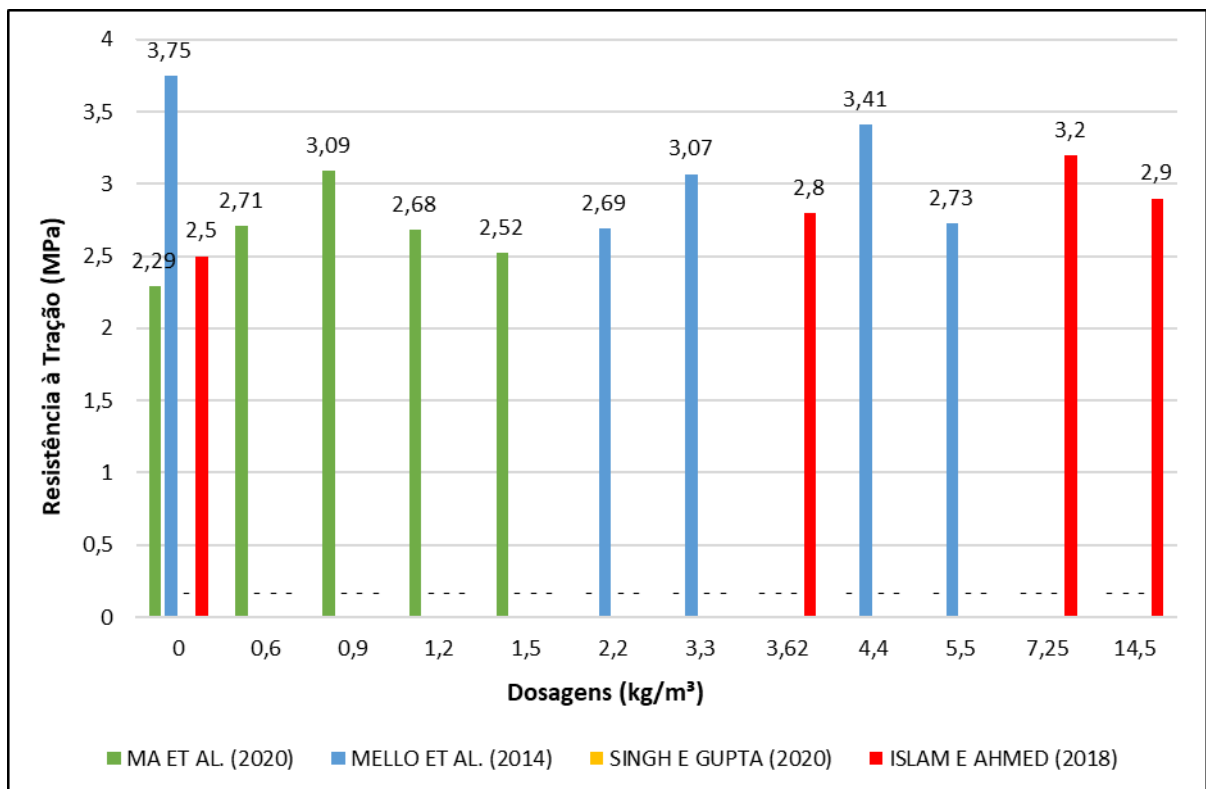
Figura 7 - Arranjo de 17 fibras no molde



Fonte: Silva et. al (2018)

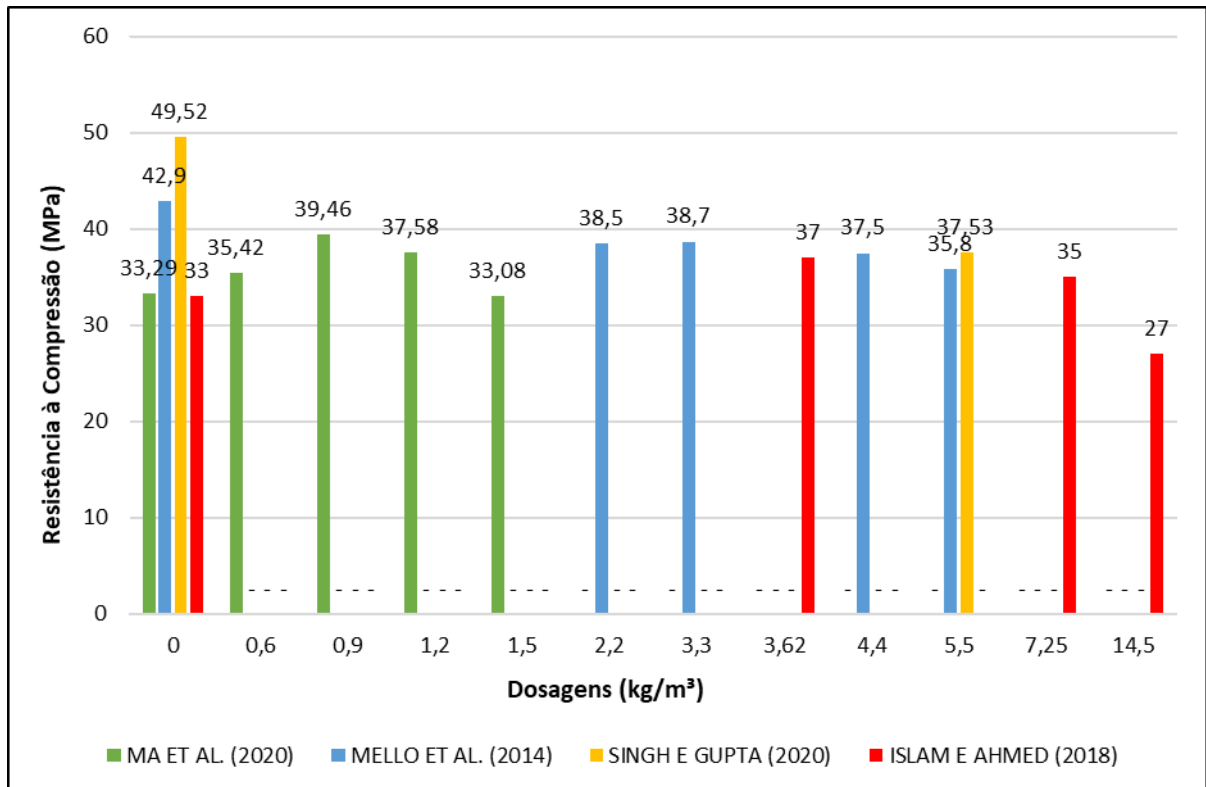
Nas Figuras 8, 9 e 10 são apresentados os resultados obtidos em diferentes estudos para os testes de compressão, tração e flexão, bem como as dosagens de fibras utilizadas. Nenhuma das fibras empregadas nas pesquisas receberam tratamento químico antes de sua aplicação no compósito cimentício.

Figura 8 - Resistência a tração a partir de diferentes dosagens de fibras



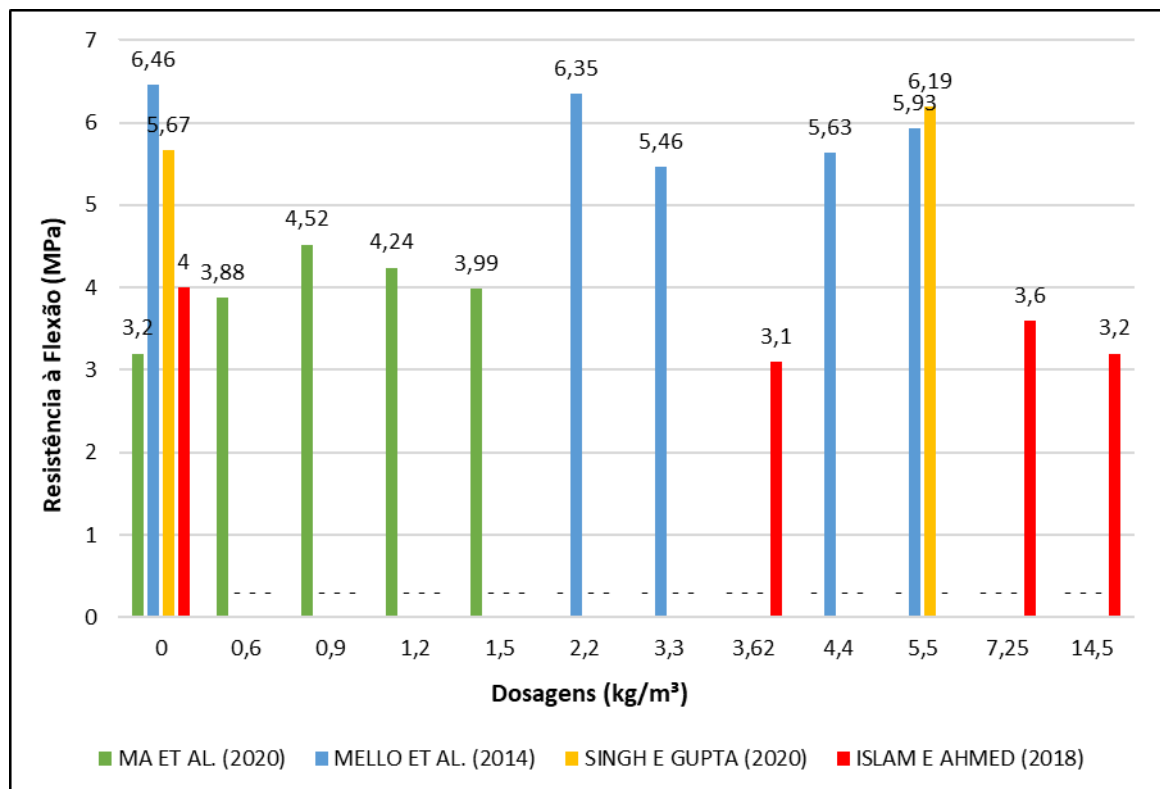
Fonte: Adaptado de Ma et al. (2020), Mello et al. (2014), Singh e Gupta (2020) e Islam e Ahmed (2018)

Figura 9 - Resistência a compressão a partir de diferentes dosagens de fibras



Fonte: Adaptado de Ma et al. (2020), Mello et al. (2014), Singh e Gupta (2020) e Islam e Ahmed (2018)

Figura 10 - Resistência a flexão a partir de diferentes dosagens de fibras



Fonte: Adaptado de Ma et al. (2020), Mello et al. (2014), Singh e Gupta (2020) e Islam e Ahmed (2018)

Os autores utilizaram diferentes traços em seus estudos, os quais são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Traços de referência

Fonte	Materiais	Proporções	Traço
MA ET AL. (2020)	Cimento	1	1:0,47:2,74:5,09
	Água	0,47	
	Areia	2,74	
	Agregado	5,09	
MELLO ET AL. (2014)	Cimento	1	1:0,50:2,29:2,38
	Água	0,5	
	Areia	2,29	
	Agregado	2,38	
SINGH E GUPTA (2020)	Cimento	1	1:0,53:2,41:3,29
	Água	0,53	
	Areia	2,41	
	Agregado	3,29	
ISLAM E AHMED (2018)	Cimento	1	1:0,42:1,27:2,14
	Água	0,42	
	Areia	1,27	
	Agregado	2,14	

Fonte: Autor (2024).

Ma et. al (2020) utilizaram fibras denominadas RS2000, derivadas de uma planta de folhas agulhas, com diâmetro variando entre 10 μm e 20 μm . Já Mello et al. (2014) aplicaram a fibra NBSK, comum na fabricação de papéis, proveniente de árvores coníferas, as quais possuem densidade de 1,10 g/cm^3 e foram cortadas manualmente, porém o estudo não especificou o tamanho exato em que foram cortadas.

Singh e Gupta (2020) utilizaram uma fibra denominada Ultra Fiber 500, de comprimento médio 2,1 mm e densidade de 1,1 g/cm^3 , proveniente de pinheiros, também espécies de árvores coníferas encontradas na América do Norte.

Islam e Ahmed (2018) optaram por utilizar fibra de juta, cortadas em comprimentos de 10 mm e 20 mm, com diâmetro de 0,10 mm e densidade de 1,45 g/cm^3 . Para esse estudo, as fibras de 10 mm de comprimento apresentaram resultados benéficos a matriz cimentícia nos ensaios de compressão e flexão, no entanto, para o ensaio de tração a fibra de 20 mm de comprimento apresentou-se como mais adequada.

No estudo de Ma et al. (2020) é possível verificar variações em compressão, tração e flexão com diferentes teores de fibras, com os melhores resultados para a

compressão e flexão observados nas dosagens intermediárias. Já para Mello et al. (2014) os resultados de compressão e flexão mostraram uma tendência geral de melhoria com o aumento da dosagem de fibras, até uma determinada dosagem.

A pesquisa de Singh e Gupta (2020) apresentou uma compressão significativamente alta para a menor dosagem e uma redução para dosagens mais altas. A flexão também aumentou com a dosagem de fibra. Islam e Ahmed (2018) mostraram que a compressão, tração e flexão variaram de acordo com o teor de fibra empregado, com resultados mais baixos para dosagens mais altas em compressão e flexão.

Percebe-se resultados bastante diferentes entre os autores analisados. Moura (2019) descreve a respeito da dificuldade em compatibilizar os materiais do compósito com a fibra e manter o controle necessário durante a produção da matriz. Tal variabilidade entre as pesquisas também pode ser explicada em função de terem sido utilizados diferentes tipos de fibra, de origem natural distintas, apesar de serem celulósicas.

A revisão da literatura demonstrou que a utilização de microfibras em compósitos cimentícios é uma abordagem promissora para melhorar as propriedades mecânicas do concreto e argamassas. As microfibras, tanto sintéticas quanto naturais, têm mostrado potencial para minimizar fissuras, melhorar a resistência e aumentar a durabilidade dos compósitos cimentícios.

As microfibras sintéticas, como polipropileno, poliéster e vidro, têm sido amplamente estudadas e aplicadas devido à sua disponibilidade e propriedades favoráveis. Por outro lado, as fibras naturais, como coco, juta e sisal, oferecem vantagens significativas, incluindo disponibilidade abundante, baixo custo e menor impacto ambiental.

A literatura aponta para a necessidade de tratamentos químicos de forma a melhorar a durabilidade e a adesão entre as fibras naturais e a matriz cimentícia. A análise das propriedades das microfibras e seus tratamentos indica que a escolha adequada da fibra e do tratamento pode ter um impacto significativo nas características finais dos compósitos cimentícios.

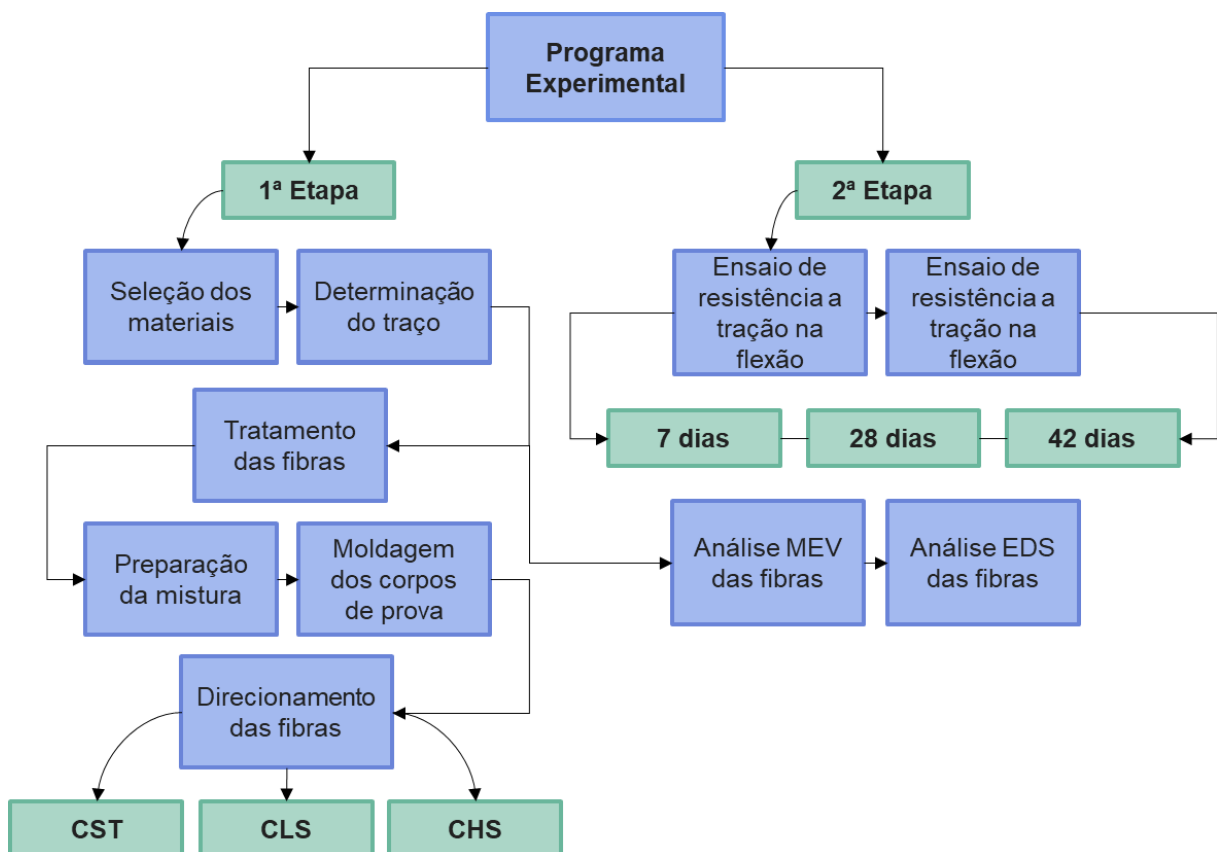
3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Estudar as propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios com aplicação de fibras requer a determinação de uma metodologia específica para obter resultados precisos e confiáveis, por isso, com base no objetivo proposto, foi desenvolvida a metodologia para a aplicação do estudo, bem como o sequenciamento das atividades.

As etapas descritas no programa experimental são apresentadas na Figura 11. O Apêndice A apresenta o programa experimental da segunda etapa do estudo.

Figura 11 - Programa experimental do estudo



Fonte: Autor (2024).

3.1.1 Variáveis de resposta

O programa experimental tem como finalidade alcançar os objetivos da pesquisa, que foi desenvolver um CP com aplicação de fibras naturais de sisal em

diferentes condições de tratamento, incluindo fibras sem tratamento, de forma a atingir um desempenho mecânico satisfatório e menor impacto ambiental. As variáveis de resposta desta pesquisa são:

- a) resistência a compressão aos 7, 28 e 42 dias;
- b) resistência a tração na flexão aos 7, 28 e 42 dias;
- c) análise microscópica (MEV) das fibras e resultados;
- d) análise de espectroscopia de dispersão de energia (EDS) das fibras e resultados.
- e) análise microscópica (MEV) dos corpos de prova aos 42 dias e resultados.

3.1.2 Variáveis de controle

A partir das variáveis de resposta foram definidas as variáveis de controle do estudo, que são:

- a) aplicação de fibras natural no traço da argamassa desenvolvida em diferentes condições, sendo utilizadas fibras naturais sem aplicação de tratamento e fibras naturais tratadas com látex e pozolanas como o primeiro tratamento analisado e fibras naturais tratadas com solução de hidróxido de sódio como segundo tratamento;
- b) a desforma dos corpos de prova ocorreu após 24 horas e a cura ocorreu até as idades determinadas para a realização do ensaio.

3.2 MATERIAIS

A seleção dos materiais para o desenvolvimento dos corpos de prova que foram utilizados na pesquisa, bem como a compatibilidade entre os materiais utilizados, são cruciais para que o compósito cimentício apresente um bom desempenho. Os materiais escolhidos precisam atender as especificações apresentadas em suas normas técnicas correspondentes, pois estabelecem o controle necessário para a aplicação desses insumos.

Para este estudo, foram utilizados os materiais disponíveis no Laboratório de Tecnologia Construtiva (LBTEC) da Universidade de Caxias do Sul, os quais foram

adquiridos na própria cidade ou regiões próximas, exceto o látex natural, o qual foi adquirido em uma plataforma de vendas online.

Em seguida, serão apresentados os materiais utilizados nesta pesquisa, juntamente com suas especificações técnicas, de forma a entender quais insumos foram utilizados para a produção dos compósitos cimentícios, permitindo o entendimento de como cada material contribui para as propriedades finais.

3.2.1 Cimento

O tipo cimento a ser utilizado, por ser o principal componente da e responsável pela ligação dos demais materiais, deve ser determinado de acordo com as propriedades que se espera para o compósito.

Neste estudo, foi utilizado o Cimento CII F-32, o qual caracteriza-se pela capacidade de desenvolver resistência mecânica rapidamente após o início de sua hidratação e é frequentemente utilizado em situações em que é necessário que o concreto ou a argamassa atinja resistências mais elevadas em um curto período de tempo.

A Tabela 2 apresenta as especificações do fabricante para o cimento utilizado.

Tabela 2 - Especificações do fabricante para o CII F-32

Químicos									
Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CO ₂	Resíduo ins.	Equiv. Alcalino
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
4,44	17,36	2,93	55,83	5,31	2,15	11,59	9,97	5,18	
Físicos									
Água na pasta normal	Tempo de pega		Sup. Específica de Blaine	Resistência a compressão					
	Início	Fim		1 dia	3 dias	7 dias	28 dias		
%	min	min	cm ² /g	MPa	MPa	MPa	MPa		
27,55	233,3	298,7	4751,64	16,85	26,12	29,87	35,21		

Fonte: Autor (2024).

3.2.2 Cinza da Casca do Arroz

A cinza de casca de arroz atua como um aditivo mineral que melhora as propriedades mecânicas e durabilidade da matriz cimentícia. Sua alta reatividade pozolânica permite a reação com a cal livre durante a hidratação do cimento, resultando em uma pasta mais densa e resistente. Além disso, a inclusão da cinza de casca de arroz reduz a permeabilidade do concreto, contribuindo para uma maior resistência a ataques químicos e à corrosão.

O uso de cinza de casca de arroz, além de melhorar o desempenho do compósito também auxilia em questões sustentáveis, pois é gerado a partir do reaproveitamento de resíduos agroindustriais. Nesta pesquisa foi utilizada a cinza de casca de arroz da marca Silcca Nobre, disponível no Laboratório de Tecnologia Construtiva (LBTEC) da Universidade de Caxias do Sul.

3.2.3 Agregado Miúdo

A areia é o agregado fino utilizado na produção de argamassas e afeta diretamente a trabalhabilidade e resistência da mistura. Além disso, a granulometria e a qualidade da areia são importantes para garantir uma boa distribuição, além de melhorar a coesão da matriz. O agregado miúdo caracteriza-se por possuir partículas menores que 4,8 mm e maiores que 0,075 mm. Neste estudo foi utilizada a areia extraída do Rio Jacuí, a qual é comercializada na cidade de Caxias do Sul.

O Quadro 1 apresenta a metodologia de caracterização do agregado miúdo.

Quadro 1 - Metodologia de caracterização do agregado miúdo

Ensaio	Metodologia
Massa Unitária dos Agregados	ABNT NBR NM 45
Massa Específica do Agregado Miúdo	ABNT NBR 9776
Granulometria dos Agregados	ABNT NBR 17054

Fonte: Autor (2024).

A partir do ensaio de granulometria dos agregados, conforme ABNT NBR 17054, foi possível determinar a distribuição do tamanho das partículas de agregados.

Tal ensaio é fundamental para garantir que os materiais atendam às especificações técnicas exigidas para diferentes aplicações.

A Tabela 3 apresenta os resultados da caracterização do agregado utilizados nos traços desenvolvidos.

Tabela 3 - Granulometria do agregado miúdo

Peneiras (mm)	Agregado Miúdo Retido (%)	Agregado Miúdo Acumulado (%)
1,18	2	2
0,6	6	8
0,42	11	19
0,3	26	45
0,2	19	64
0,15	28	92
<0,15	8	100

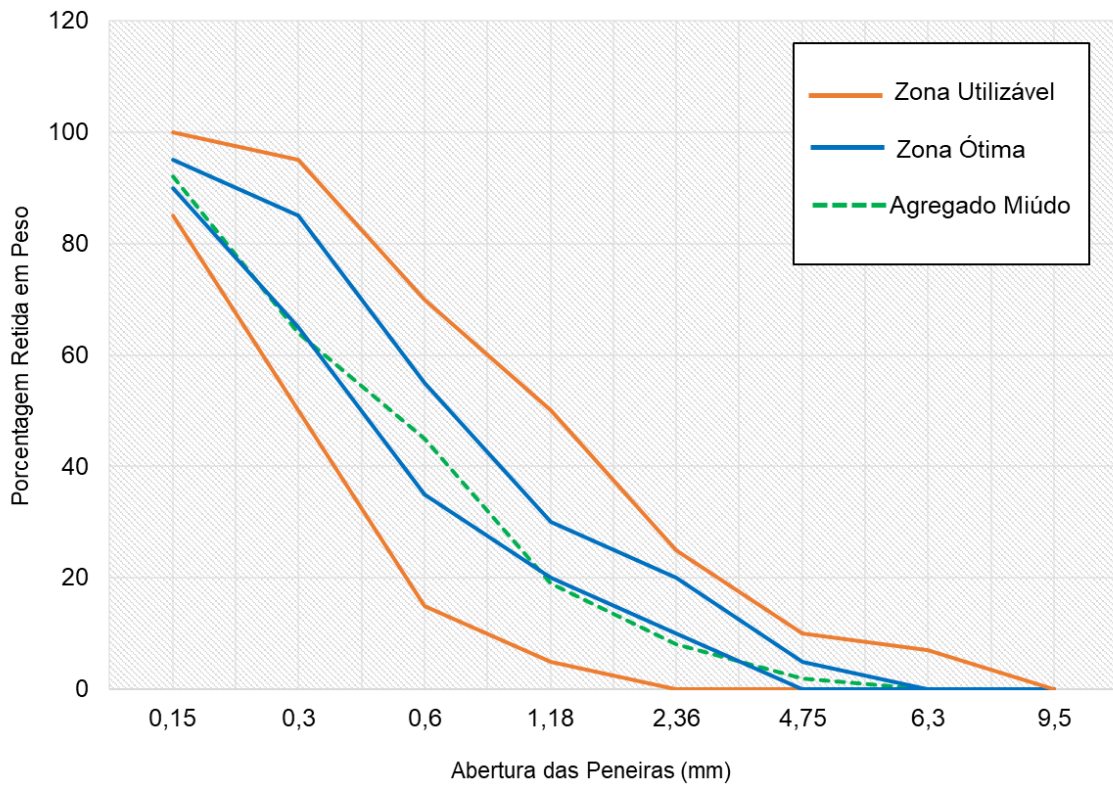
Fonte: Autor (2024).

A caracterização granulométrica do agregado miúdo revela uma distribuição significativa das partículas conforme os diferentes tamanhos de peneira. Os resultados mostram que, na peneira de 1,18 mm, 2% do material foi retido, aumentando para 6% na peneira de 0,6 mm e 11% na peneira de 0,42 mm. A partir da peneira de 0,3 mm, observa-se um aumento mais acentuado, com 26% retidos, alcançando um total acumulado de 45%. As peneiras menores, 0,2 mm e 0,15 mm, retiveram 19% e 28%, respectivamente, resultando em um acumulado de 92% antes da peneira <0,15 mm, que reteve os últimos 8%.

Esses dados indicam uma boa gradação do agregado miúdo, visto que há uma distribuição uniforme de partículas de diferentes tamanhos, o que favorece a melhor compactação e desempenho do material em compósitos cimentícios, essencial para atingir propriedades mecânicas desejadas, promovendo um equilíbrio entre resistência e trabalhabilidade no concreto. A análise sugere que a composição do agregado miúdo é apropriada para aplicações em compósitos cimentícios.

Os resultados obtidos no processo de caracterização de agregado miúdo são representados de forma gráfica a partir da curva granulométrica apresentada na Figura 12.

Figura 12 - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autor (2024).

Os ensaios de massa unitária, massa específica e granulometria dos agregados são fundamentais para a caracterização e controle de qualidade dos materiais. Eles permitem calcular proporções adequadas nas misturas de compósitos cimentícios e avaliar a densidade e a distribuição do tamanho das partículas.

Além disso, esses ensaios ajudam a identificar problemas potenciais, como segregação e impurezas, garantindo a segurança e a durabilidade das estruturas. A Tabela 4 apresenta a caracterização do agregado miúdo utilizado neste estudo conforme ensaios mencionados.

Tabela 4 - Caracterização dos agregados miúdos

Característica	Resultado
Massa Unitária (g/cm ³)	1,36
Massa Específica (g/cm ³)	2,58
Diâmetro Máximo (mm)	1,2
Módulo de Finura	2,3

Fonte: Autor (2024).

3.2.4 Água

A água é fundamental para a hidratação do cimento e plasticidade da argamassa, porém a quantidade utilizada deve ser controlada, de forma a evitar segregação, exsudação e comprometimento das propriedades.

Neste estudo foi utilizada a água oferecida pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAMAE) da cidade de Caxias do Sul.

3.2.5 Fibra

A partir dos aspectos analisados anteriormente com relação a utilização de fibras em concretos e argamassas, como o fato de que elas podem melhorar as propriedades mecânicas, optou-se por utilizar a fibra de sisal nesta pesquisa, a qual foi confeccionada a partir de uma corda de sisal. Foi realizada a compra de uma corda de sisal no comércio de materiais de construção civil da cidade de Caxias do Sul e efetuado o corte das fibras com aproximadamente 20 mm de comprimento, conforme Figura 13.

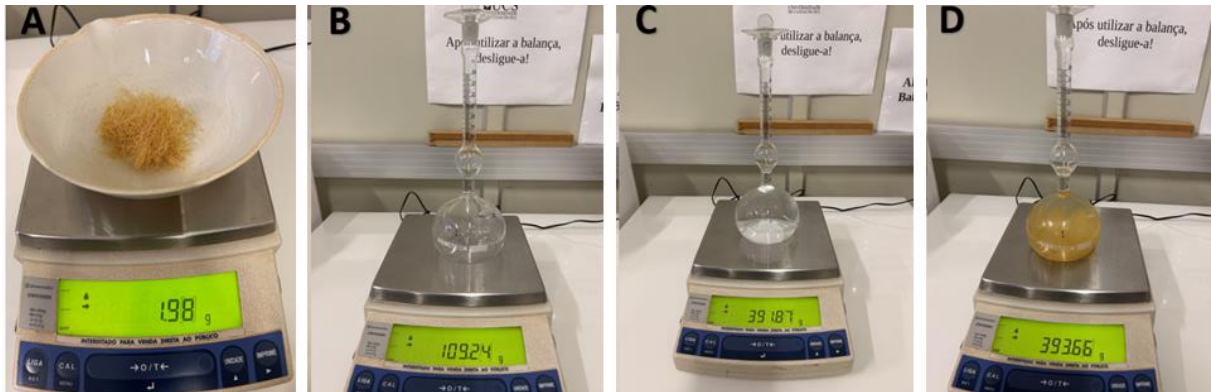
Figura 13 - Fibras de sisal cortadas em 20 mm



Fonte: Autor (2024).

A Figura 14 apresenta o processo de determinação de massa específica da fibra utilizada. Tal ensaio foi realizado a partir de uma adaptação do ensaio do frasco de Le Chatelier, o qual usualmente é utilizado para determinar a massa específica de aglomerantes.

Figura 14 - Determinação da massa específica da fibra de sisal



Fonte: Autor (2024).

Os valores de massa específica obtidos foram calculados pela Equação 1.

$$\rho = \frac{m}{V} \dots \dots \dots (1)$$

Onde:

ρ = Massa específica da fibra, em g/cm³

m = Massa da amostra de fibra, em gramas

L = Volume deslocado pela massa, em cm³

Os resultados obtidos com o ensaio são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados de determinação de massa específica da fibra

Frascos	Fibra (g)	Frasco (g)	Frasco + H ₂ O (g)	Frasco + H ₂ O + Fibra	Massa específica (g/cm ³)
1	1,98	109,24	391,87	393,66	1,11
2	1,99	107,23	414,00	415,83	1,09
3	2,01	130,13	424,88	426,89	1,00
Média					1,06
Desvio Padrão					0,0462

Fonte: Autor (2024).

3.2.6 Látex Natural

O primeiro tratamento analisado foi com a aplicação de látex natural nas fibras. As especificações do fabricante para o látex utilizados estão descritas na Tabela 6.

Tabela 6 - Especificações do fabricante para o látex

Látex Natural	
Produto	Látex líquido natural centrifugado 60%
Caracterização Química	Emulsão branca aquosa, pH 10 a 11
Origem	100% natural e estabilizado com amônia
Cor no estado líquido	Branco
Cor após a secagem	Amarelo
Características especiais	Totalmente vulcanizado e de fácil fluidez
Validade	6 meses
Aditivos	Não necessário
Toxidez	Não tóxico
Marca	Redelease

Fonte: Autor (2024).

3.2.7 Hidróxido de Sódio

O segundo tratamento analisado foi com a aplicação de hidróxido de sódio nas fibras por imersão em solução de 5% em massa, durante o período de duas horas, conforme o estudo realizado por Beltrami et al. (2014). De acordo com os aspectos analisado anteriormente, a solução é utilizada para modificar as propriedades das fibras, de forma a aumentar a durabilidade e melhorar a sua interação com a matriz.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Traços de referência

A determinação da proporção correta dos materiais que serão utilizados na produção da argamassa é necessária para que a matriz final possa atingir os requisitos esperados para o tipo de aplicação desejada. Além disso, a escolha do traço influencia diretamente na durabilidade da argamassa, bem como em sua consistência e facilidade de aplicação.

Com relação as questões sustentáveis, é importante salientar que um traço bem definido otimiza o uso de materiais, de forma a minimizar desperdícios, o que contribui para a redução dos custos que envolvem a produção e auxiliam em uma execução que permita impactar menos o meio ambiente.

O traço escolhido para este estudo foi o de Mello et al. (2014), conforme Tabela 7, equivalente em argamassa do concreto, pois dentre os analisados, os resultados obtidos com o traço mencionado apresentaram-se de forma satisfatória. O traço utilizado é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Traço utilizado na pesquisa

Materiais	Teores em massa
Cimento	1
Areia média	2,29
Água	0,5

Fonte: Autor (2024).

3.3.2 Tratamento das fibras

O tratamento das fibras de sisal no presente trabalho foi realizado em duas etapas distintas, visando melhorar suas propriedades mecânicas e a adesão ao compósito. No primeiro método, o tratamento com hidróxido de sódio foi realizado submergindo as fibras em uma solução de 5% de hidróxido de sódio em massa durante 2 horas.

Esse processo tem como objetivo remover impurezas e hemicelulose, aumentando a rugosidade superficial das fibras, o que favorece a adesão à matriz cimentícia. Após a submersão, as fibras foram removidas e espalhadas em uma superfície plana para secar, completando o processo de secagem em 3 dias.

No segundo método, as fibras foram tratadas com uma solução diluída de látex, reduzindo a concentração de 60% para 5%. As fibras foram submersas na solução de látex e em seguida foram passadas em um recipiente contendo pozolana com o auxílio de uma pinça, promovendo a adesão das partículas ao látex. Após a aplicação, as fibras foram secas durante 2 dias, finalizando o tratamento. A Figura 15 apresenta as fibras tratadas com látex e pozolanas após a secagem.

Figura 15 - Fibras de sisal tratadas com látex e pozolanas



Fonte: Autor (2024).

3.3.3 Procedimento de mistura dos materiais

A mistura completa e homogênea dos materiais garante que a argamassa tenha uma distribuição equilibrada, de forma que possa garantir as propriedades físicas e mecânicas do composto. Para a pesquisa em questão, foi elaborado o procedimento para a mistura dos materiais, levando em consideração que os testes mencionados serão realizados para corpos de prova convencionais, com aplicação de fibra natural e com aplicação de fibra natural tratada.

Após efetuado o tratamento das fibras foi possível realizar a mistura dos materiais restantes. A Figura 16 apresenta o procedimento de mistura dos materiais para a fabricação dos corpos de prova conforme previsto no programa experimental.

Figura 16 - Procedimento de mistura dos materiais



Fonte: Autor (2024).

As codificações adotadas para os traços dos compósitos cimentícios indicam a natureza e o tratamento das fibras utilizadas, de forma a facilitar a identificação e análise das propriedades de cada mistura. O código CR representa o compósito sem fibras, servindo como controle para comparar o desempenho dos outros traços. O CST designa o compósito com aplicação de fibras naturais sem tratamento, evidenciando sua utilização em estado bruto.

O traço CLS indica o compósito produzido com fibras tratadas com látex e cinza de casca de arroz. Já a codificação CHS refere-se a matriz produzida com fibras tratadas com hidróxido de sódio.

Para o traço CR, foi realizada a seleção e pesagem dos materiais, seguida pela preparação da mistura, que é essencial para garantir a homogeneidade do produto final. O preenchimento dos moldes é realizado conforme a norma NBR 13279 de 2005, assegurando que todas as especificações técnicas sejam atendidas. Após o preenchimento, foi determinado o espalhamento da argamassa, o qual foi de 32 cm. A desforma ocorreu após 24 horas, permitindo a cura adequada antes da realização dos testes de compressão e tração na flexão.

No traço CST, o processo também iniciou com a seleção e pesagem dos materiais, seguido pela preparação da mistura. Nesse caso, são colocados 8 mm de argamassa nos moldes, onde 17 unidades de fibras, que não passam por tratamento prévio, são organizadas. Posteriormente, é realizado o preenchimento dos moldes até o topo. Após a desforma, os testes de compressão e tração na flexão são aplicados conforme idades determinadas.

Por sua vez, o traço CLS envolve um tratamento prévio das fibras com látex natural e pozolanas. Assim como nos outros traços, a seleção e pesagem dos materiais são realizadas antes da preparação da mistura. A argamassa é colocada nos moldes, onde 17 unidades de fibras tratadas são arranjadas e, em seguida, os moldes são preenchidos completamente.

Finalmente, no traço CHS, o processo começa com o tratamento das fibras em uma solução de NaOH. Após a preparação da mistura, 8 mm de argamassa são colocados nos moldes, onde as fibras tratadas são dispostas antes do preenchimento completo, assim como realizado no procedimento de mistura do traço CST e CLS.

Para a preparação da mistura foram respeitados os procedimentos e orientações descritos na NBR 13279 de 2005, a qual estabelece critérios de determinação da resistência a tração na flexão e a compressão em argamassas.

3.3.3.1 Aparelhagem

A Norma estabelece a seguinte aparelhagem para a execução dos testes:

- a) moldes prismáticos metálicos que vão servir como molde para os corpos de prova que deverão ser de 4 cm x 4 cm x 16 cm;

- b) mesa de adensamento por queda para adensamento da argamassa nos moldes;
- c) conjunto de espátulas de dimensões diferentes entre si que permita nivelar as camadas de argamassa nos moldes;
- d) régua metálica;
- e) máquina para ensaio de tração na flexão;
- f) dispositivo de carga de ensaio de tração na flexão;
- g) cronômetro;
- h) utensílios de laboratório

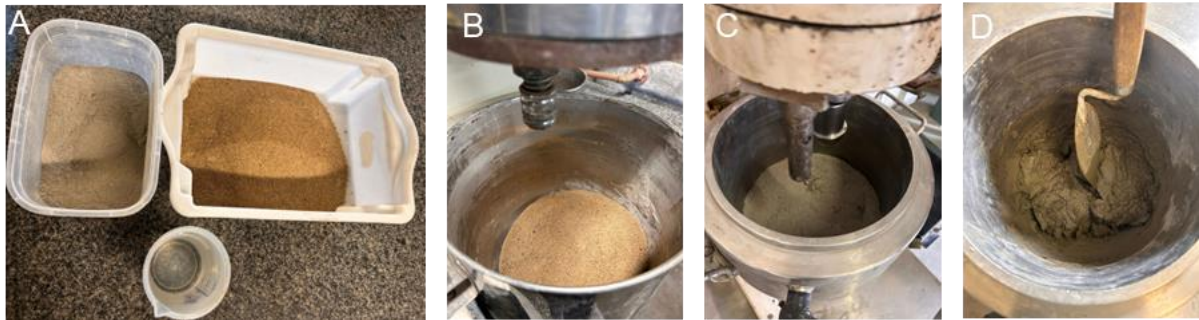
3.3.3.2 Preparação

A Norma estabelece os seguintes procedimentos para a execução dos testes:

- a) moldar três corpos de prova prismáticos por idade;
- b) colocar os moldes sobre a mesa de adensamento;
- c) aplicar fina camada de óleo mineral nas faces internas dos moldes;
- d) preparar a argamassa a ser utilizada;
- e) introduzir nos moldes uma porção de argamassa;
- f) executar o espalhamento com o auxílio do nivelador de camadas;
- g) aplicar trinta quedas através da mesa de adensamento;
- h) introduzir a segunda camada de argamassa nos moldes;
- i) executar novamente o espalhamento com o nivelador;
- j) aplicar novamente trinta quedas;
- k) rasar os corpos de prova com a régua metálica;
- l) aguardar no mínimo 48 horas antes de realizar a remoção dos moldes.

A Figura 17 apresenta o processo de separação dos materiais e preparação da mistura realizado no laboratório.

Figura 17 - Processo de preparação da mistura



Fonte: Autor (2024).

Com relação ao procedimento de determinação do espalhamento da mistura, que consiste em avaliar a trabalhabilidade do compósito conforme NBR 13279 de 2005, um molde cilíndrico é preenchido e compactado, e, em seguida, é removido, permitindo que a mistura se espalhe sobre uma superfície plana. O diâmetro do espalhamento resultante é medido, proporcionando uma indicação quantitativa da consistência e fluidez do material.

A mistura preparada neste estudo resultou em um espalhamento de 32 cm, indicando uma consistência adequada para a aplicação do material. Esse valor é indicativo de uma mistura suficientemente fluida, garantindo uma boa capacidade de preenchimento em formas e uma homogeneidade desejada.

Após a determinação do espalhamento, os moldes foram preenchidos até 8 mm e as fibras foram arranjadas conforme Figura 7, método apresentado no estudo desenvolvido por Silva et al. (2018). A Figura 18 apresenta o arranjo das fibras realizado nesta pesquisa.

Figura 18 - Arranjo das fibras nos moldes



Fonte: Autor (2024).

Realizado o preenchimento, os moldes foram submetidos a um processo de cura e após 24 horas os prismas foram desmoldados. Essa prática é importante porque permite que as amostras alcancem um desenvolvimento inicial das propriedades mecânicas.

Após a desforma, os corpos de prova foram curados em água por um tempo adicional, conforme recomendado na norma. A cura em água é essencial para garantir que as amostras continuem a hidratação adequada do cimento, o que é fundamental para o desenvolvimento das propriedades mecânicas desejadas, como a resistência à compressão e à tração.

O posicionamento correto dos moldes na prensa foi indicado com uma flecha, de forma a garantir a orientação adequada durante o ensaio, pois as 17 fibras de sisal foram cuidadosamente arranjadas na face inferior do molde. A Figura 19 apresenta os corpos de prova após serem desmoldados.

Figura 19 - Corpos de prova após serem desmoldados



Fonte: Autor (2024).

3.3.4 Ensaio de tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão consiste em aplicar uma carga de flexão em um corpo de prova até que ocorra a fratura, permitindo a determinação da tensão máxima que o material pode suportar. A resistência à tração na flexão é um parâmetro que reflete a capacidade do concreto ou argamassa de resistir a forças que tendem a causar fissuras.

O controle das propriedades mecânicas, incluindo a resistência à tração na flexão, é essencial no processo de fabricação de materiais de construção. A variabilidade nas características dos materiais, como a composição, a granulometria dos agregados e as condições de cura, pode impactar diretamente a resistência final do compósito. Para a aplicação do teste de tração na flexão, foram respeitados os procedimentos e orientações descritos na NBR 13279 de 2005.

Após a desforma dos corpos de prova, é possível iniciar o procedimento de ruptura dos corpos de prova nas idades desejadas. Deve-se atentar para a tolerância do tempo de ruptura a partir das idades ensaiadas.

A Norma estabelece que para a aplicação do teste os corpos de prova devem ser posicionados nos dispositivos de apoio do equipamento e posteriormente deve ser aplicada carga de (50 ± 10) N/s até a ruptura. A resistência a tração na flexão deve ser calculada pela Equação 2:

$$R_f = \frac{1,5 F_f L}{40^3} \dots\dots\dots(2)$$

Onde:

R_f = Resistência a tração na flexão, em Megapascal

F_f = Carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em Newtons

L = Distância entre os suportes, em milímetros

No ensaio de resistência a tração na flexão, a carga foi aplicada no centro do corpo de prova de maneira gradual até que ocorresse a fratura da amostra, permitindo a medição da carga máxima suportada. Durante o ensaio, foram registradas as deformações e a carga aplicada, possibilitando o cálculo da resistência à tração na flexão.

Neste estudo, o ensaio de tração na flexão foi executado em 3 pontos, no qual corpo de prova é apoiado em dois pontos e uma carga é aplicada no meio, situação em que a máxima tensão ocorre exatamente sob o ponto de aplicação da carga, tornando o teste mais sensível a falhas nessa região. A Figura 20 apresenta o corpo de prova posicionado na prensa e após o rompimento.

Figura 20 - Ensaio resistência a tração na flexão



Fonte: Autor (2024).

3.3.5 Ensaio de compressão axial

No ensaio de resistência à compressão as amostras moldadas são submetidas a uma carga axial até a fratura. A resistência à compressão obtida é um indicador fundamental da capacidade do material de suportar cargas e tensões, refletindo diretamente sua durabilidade e desempenho em estruturas de concreto.

A variabilidade nas condições de produção, como a mistura dos componentes e a cura pode influenciar significativamente a resistência final do compósito. Para a aplicação do teste de resistência a compressão, foram respeitados os procedimentos e orientações descritos na NBR 13279 de 2005, a qual estabelece critérios de determinação da resistência a tração na flexão e a compressão em argamassas.

Para a realização do teste de compressão axial, a norma orienta a utilização dos mesmos corpos de prova utilizados no teste de tração na flexão, posicionando-os

no dispositivo de apoio do equipamento. Deve-se aplicar cargas de (50 ± 10) N/s até a ruptura.

A resistência a compressão é calculada segundo a equação 3:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \dots\dots\dots(3)$$

Onde:

R_c = Resistência a compressão, em megapascals

F_c = Carga máxima aplicada, em newtons

Após a realização do ensaio de tração na flexão, os corpos de prova resultantes foram preparados para o ensaio de resistência à compressão. Inicialmente, as superfícies de fratura dos fragmentos foram ser limpas e em seguida os fragmentos foram, então, posicionados na prensa de compressão de forma que a carga fosse aplicada uniformemente sobre suas superfícies. A máquina foi ajustada para aplicar a carga de maneira gradual e controlada até que a fratura ocorra.

A Figura 21 apresenta o corpo de prova posicionado na prensa e após o rompimento.

Figura 21 - Ensaio de resistência a compressão



Fonte: Autor (2024).

3.3.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A análise microestrutural do material é realizada por meio do uso do microscópio eletrônico de varredura, que é uma ferramenta para obter as micrografias de alta resolução da superfície das amostras. Esse equipamento permite investigar as interações entre os componentes da amostra, revelando detalhes cruciais sobre as dimensões das partículas presentes.

De acordo com Silveira (2007), a capacidade do microscópio eletrônico de varredura de fornecer alta resolução é fundamental para compreender a microestrutura do material, possibilitando a identificação precisa do tamanho e da distribuição das partículas que o compõem. Essa análise é essencial para entender as propriedades físicas e mecânicas do material em estudo.

Neste estudo, as amostras foram inseridas no microscópio eletrônico, onde foram submetidas a um feixe de elétrons, permitindo a captura de imagens de varredura de alta resolução das superfícies e estruturas das fibras bem como das superfícies de interação das fibras com a matriz pós rompimento dos corpos de prova, o que possibilitou a observação detalhada das alterações nas superfícies das fibras resultantes dos diferentes tratamentos. A análise de MEV foi realizada no Laboratório Central de Microscopia (LCMIC) da Universidade de Caxias do Sul (UCS).

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos neste estudo a respeito dos efeitos dos tratamentos aplicados, incluindo a utilização de soluções de hidróxido de sódio e a combinação de látex e pozolanas, sobre a resistência à compressão, à tração na flexão e a microestrutura do material.

4.1 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

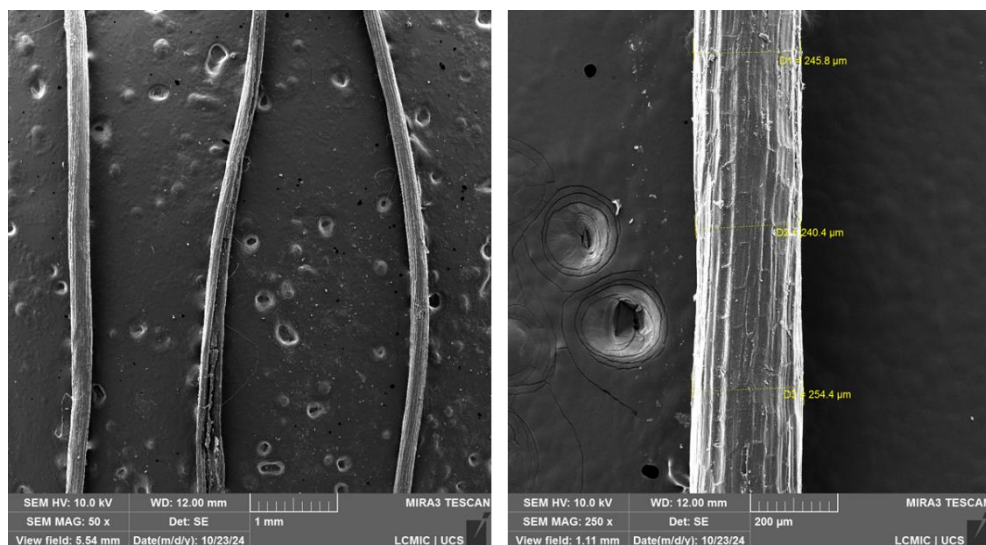
O estado endurecido refere-se à fase em que o material atinge sua rigidez. A seguir serão abordadas as propriedades no estado endurecido dos compósitos cimentícios reforçados com microfibras de sisal, de forma a analisar como os diferentes tratamentos aplicados às fibras influenciam seu desempenho mecânico.

4.1.1 Análise microscopia eletrônica de varredura (MEV) das fibras

A seguir, serão apresentadas as análises microscópicas realizadas por meio da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura, com o objetivo de investigar as características morfológicas das fibras utilizadas nos compósitos cimentícios.

Na Figura 22 é possível observar a análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da microfibra de sisal sem tratamento, utilizada neste estudo.

Figura 22 - Análise MEV da microfibra de sisal sem tratamento



Fonte: Autor (2024).

É possível observar na análise que as microfibras CST apresentam uma superfície irregular e naturalmente rugosa, o que é benéfico para a adesão a matrizes em compósitos. Essa rugosidade é resultado da composição natural da fibra, incluindo lignina, celulose e hemicelulose, que contribuem para a formação da textura da superfície. As micrografias apresentadas na Figura 22 foram ampliadas em 50x e 250x.

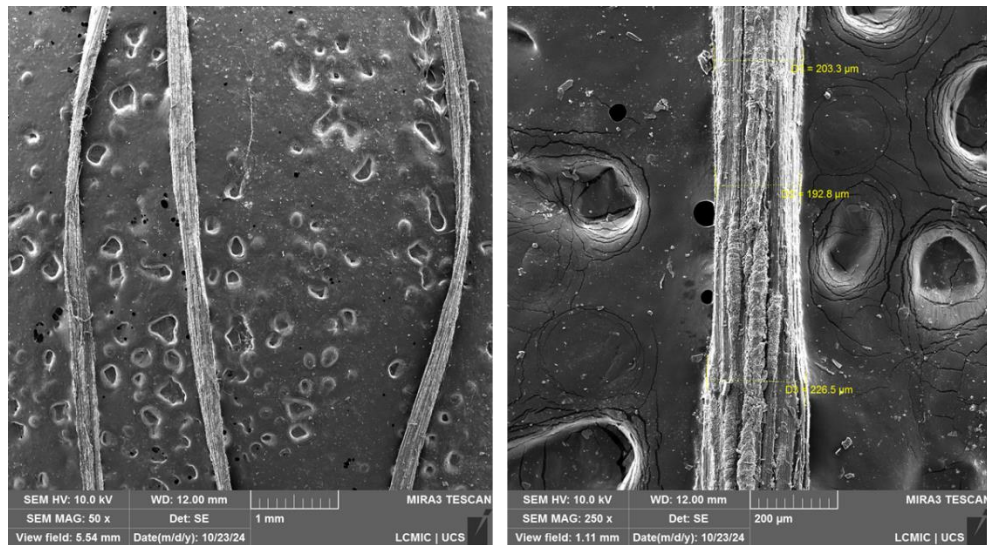
As microfibras sintéticas, se comparadas as microfibras de sisal, mesmo sem aplicação de tratamento, apresentarão um superfície mais lisa devido ao seu processo de fabricação industrial, que envolve uma extrusão controlada. A rugosidade do sisal pode resultar em melhor aderência quando aplicadas em compósitos cimentícios, ocorre que, conforme apresentado no estudo de Savastano (2000) as microfibras naturais tendem a sofrer degradação quando aplicadas em um compósito cimentício, visto que a matriz é altamente alcalina.

A alcalinidade da matriz cimentícia pode interagir com os componentes químicos da fibra de sisal, resultando na degradação da lignina e da celulose, que são essenciais para a integridade estrutural do sisal. Essa degradação não apenas compromete a resistência das fibras, mas também pode impactar na estrutura observada na análise MEV apresentada neste estudo.

A degradação da lignina e da celulose pode levar a alterações na morfologia da fibra, como o aparecimento de fissuras, redução da rugosidade superficial e perda das características da microfibra consideradas importantes para a adesão à matriz cimentícia, por isso foram propostos diferentes tratamentos para a amostra em questão.

A análise MEV é importante para a validação da aplicação dos tratamentos apresentados, de forma a entender se realmente ocorreu aderência do tratamento com a superfície da fibra. A Figura 23 apresenta a análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da microfibra de sisal tratada com solução de hidróxido de sódio.

Figura 23 - Análise MEV da microfibras de sisal tratada com hidróxido de sódio



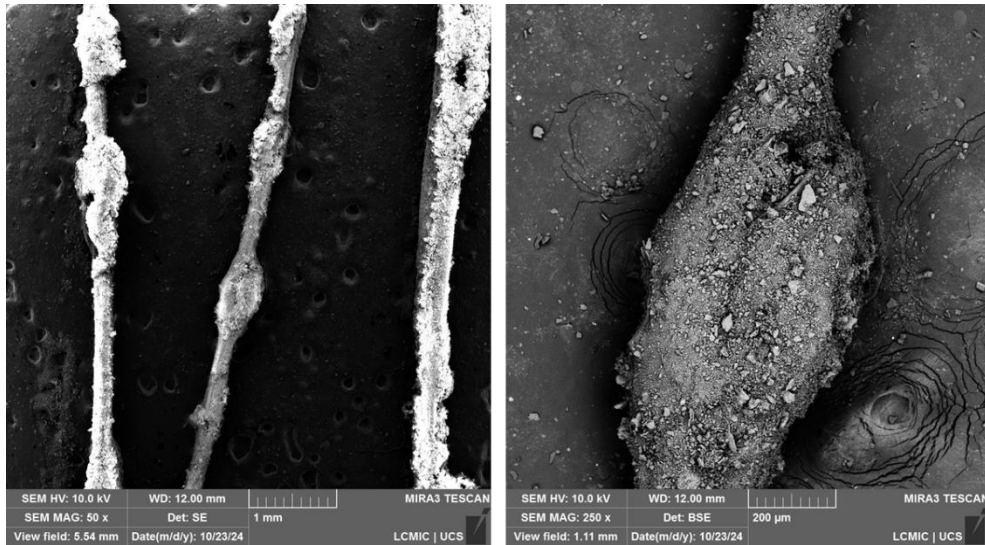
Fonte: Autor (2024).

Na análise MEV da microfibras de sisal tratada com hidróxido de sódio, é possível observar claramente as alterações na morfologia da fibra, evidenciando a ocorrência do tratamento. A solução de hidróxido de sódio atuou como um agente alcalino que promoveu a remoção de componentes como a lignina e parte da hemicelulose, resultando em uma modificação significativa na estrutura da fibra.

Essa remoção contribui para a exposição das microfibrilas de celulose, que, por sua vez, geraram uma superfície mais rugosa e texturizada. As imagens obtidas na análise mostram um aumento na rugosidade da superfície, indicando que o tratamento foi eficaz. Tal modificação na superfície aumentou a área de contato das fibras para aplicação nos compósitos cimentícios, possibilitando uma melhor adesão à matriz.

A Figura 24 apresenta a análise MEV da microfibras e sisal tratada com látex e pozolanas.

Figura 24 - Análise MEV da microfibras de sisal tratada com látex e pozolanas



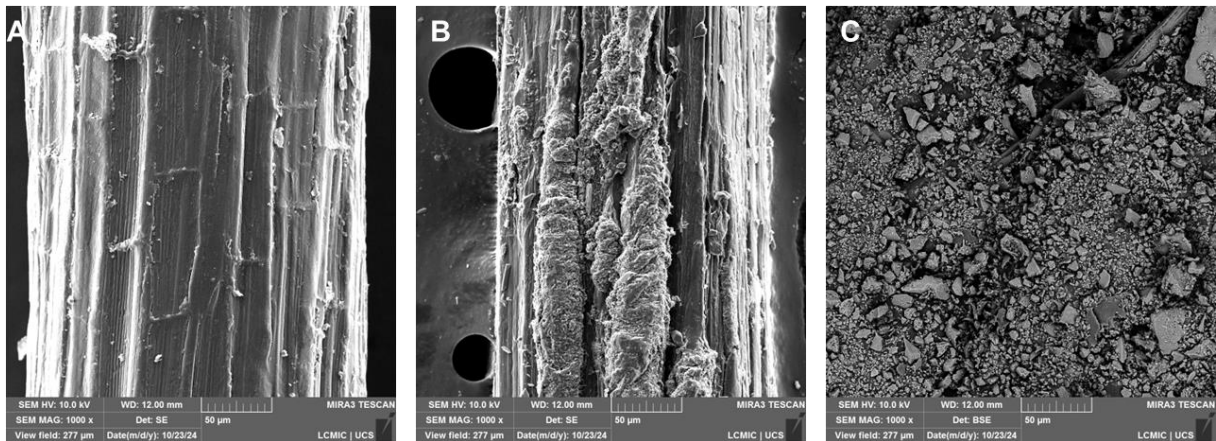
Fonte: Autor (2024).

Na análise MEV da microfibras de sisal tratada com látex e pozolanas, também é possível observar claramente a ocorrência do tratamento, evidenciada pela presença das pozolanas aderidas às amostras. As imagens obtidas mostram que as partículas de pozolana se integraram à superfície da fibra, contribuindo para a formação de uma textura rugosa.

Essa rugosidade é um indicativo de que as pozolanas não apenas se depositaram sobre as fibras, mas também interagiram com a matriz do látex, promovendo uma melhor adesão entre os componentes do compósito. A análise revelou, ainda, a formação de bolsas de pozolanas em algumas áreas da amostra, que apontam para regiões de maior concentração desse material. A presença das bolsas de pozolanas pode indicar locais de potencial reforço estrutural, aumentando a capacidade do material em resistir a tensões e cargas aplicadas.

Para o melhor entendimento a respeito das diferenças identificadas na análise MEV da microfibras de sisal sem tratamento em comparação a análise das microfibras tratadas com hidróxido de sódio e látex e pozolanas, a Figura 25 apresenta a microscopia de cada amostra lado a lado.

Figura 25 - Análise MEV da microfibras sem tratamento e com tratamento



Fonte: Autor (2024).

A análise comparativa das micrografias da microfibras de sisal sem tratamento (24a), da microfibras tratada com hidróxido de sódio (24b) e da microfibras tratada com látex e pozolanas (24c), ambas ampliadas em 1000x, revela diferenças significativas na morfologia e na textura das fibras, refletindo as características de cada tratamento. A microfibras sem tratamento exibe uma superfície relativamente lisa e menos definida, o que pode limitar a sua adesão em compósitos.

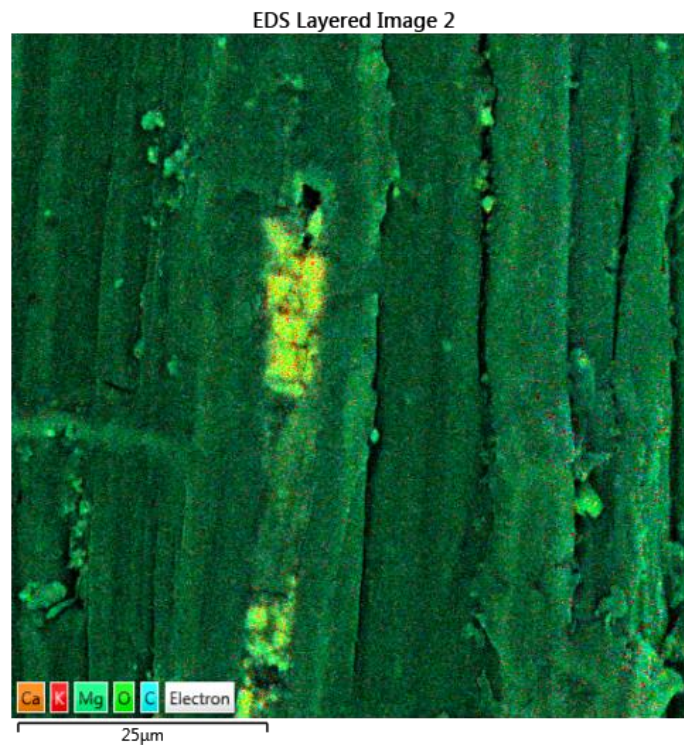
Em contraste, a microfibras de sisal tratada com hidróxido de sódio apresenta uma superfície significativamente mais rugosa, evidenciando a remoção de lignina e hemicelulose, que expõe as microfibrilas de celulose. Essa alteração não apenas melhora a aderência entre as fibras e matrizes, mas também potencializa as propriedades mecânicas da fibra, tornando-a mais adequada para aplicações em compósitos.

Por outro lado, a microfibras de sisal tratada com látex e pozolanas apresenta uma textura ainda mais complexa, com a presença de pozolanas aderidas à superfície e formação de bolsas de material pozolânico. Essa configuração não apenas aumenta a rugosidade, mas também sugere uma integração efetiva entre os componentes, o que pode potencializar a resistência e a durabilidade do compósito. Dessa forma, a análise visual e as modificações morfológicas evidenciam a eficácia dos tratamentos realizados em cada uma das microfibras de sisal.

4.1.2 Espectroscopia de dispersão de energia (EDS) e análise das fibras

Neste estudo, foi realizado o ensaio de EDS, o qual permite identificar os elementos químicos presentes na amostra, bem como suas concentrações. A Figura 26 apresenta a análise realizada para a fibra de sisal sem a aplicação de tratamento. No Apêndice D é possível visualizar o gráfico do espectro.

Figura 26 - Espectroscopia de dispersão de energia da fibra sisal sem tratamento

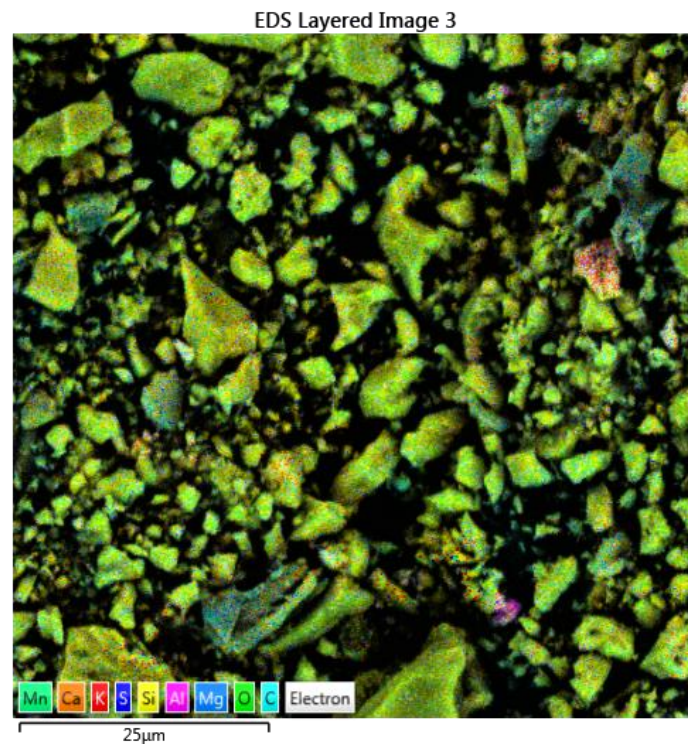


Fonte: Autor (2024).

Os resultados da análise de Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) para as fibras de sisal sem tratamento revela uma composição química que reflete as características típicas das fibras vegetais. Com cerca de 63% de carbono e aproximadamente 52% de oxigênio, esses resultados são indicativos da presença predominante da celulose, que é o principal componente estrutural das fibras de sisal. O alto percentual de carbono está associado à estrutura orgânica das fibras, uma vez que a celulose é composta por cadeias que contêm átomos de carbono.

A Figura 27 apresenta a análise realizada para a fibra de sisal que recebeu aplicação de tratamento com látex e pozolanas.

Figura 27 - Espectroscopia de dispersão de energia da fibra sisal tratada com látex e pozolanas



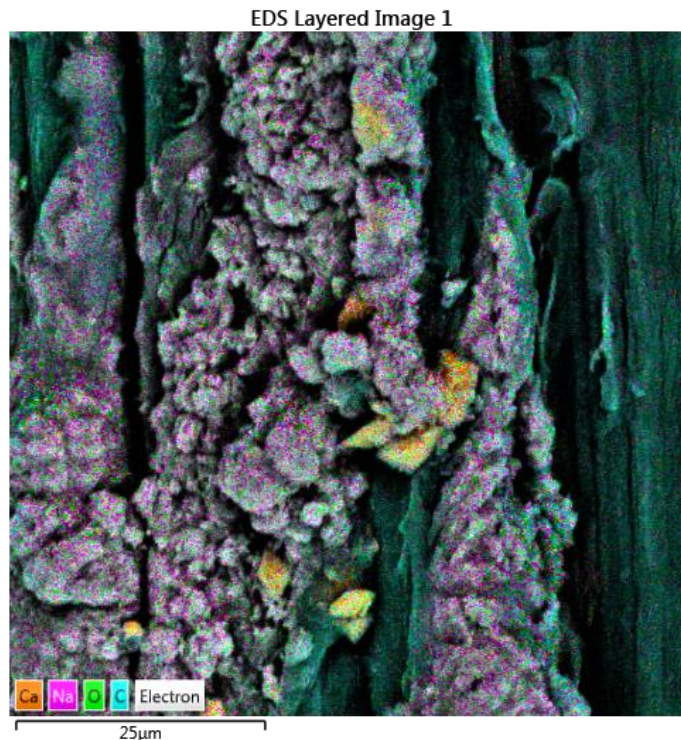
Fonte: Autor (2024).

Os resultados do EDS para as fibras de sisal tratadas com látex e pozolanas revela uma composição química que reflete as modificações introduzidas pelo tratamento. Os dados mostram cerca de 49% de carbono, aproximadamente 46% de oxigênio e 31% de silício, indicando uma alteração em relação às fibras de sisal sem tratamento.

O percentual de carbono, embora ainda representativo da estrutura orgânica das fibras, apresenta uma diminuição em comparação com as fibras não tratadas. Isso pode ser resultado da interação entre as fibras e o tratamento aplicado, que introduziu novos componentes. A presença significativa de silício pode ser atribuída ao uso de pozolanas no tratamento, pois estas são ricas em sílica.

A Figura 28 apresenta a análise realizada para a fibra de sisal que recebeu aplicação de tratamento com hidróxido de sódio.

Figura 28 - Espectroscopia de dispersão de energia da fibra sisal tratada com hidróxido de sódio



Fonte: Autor (2024).

Para as fibras de sisal tratadas com hidróxido de sódio, a análise revela uma composição química que também reflete as mudanças ocorridas devido ao tratamento químico. Os dados mostram cerca de 58% de carbono, aproximadamente 40% de oxigênio e 27% de sódio, indicando que o tratamento com hidróxido de sódio teve impacto na estrutura química das fibras.

O percentual de carbono, embora ainda elevado, apresentou uma leve diminuição em relação às fibras de sisal sem tratamento. Isso sugere que o tratamento com hidróxido de sódio pode ter ocasionado a remoção de hemicelulose e lignina. A presença de oxigênio permanece em uma proporção semelhante.

A introdução de sódio em 27% está diretamente relacionada ao uso de hidróxido de sódio no tratamento. A presença de sódio também sugere que o tratamento alterou a química superficial das fibras, o que pode ser benéfico para a sua aplicação em compósitos cimentícios.

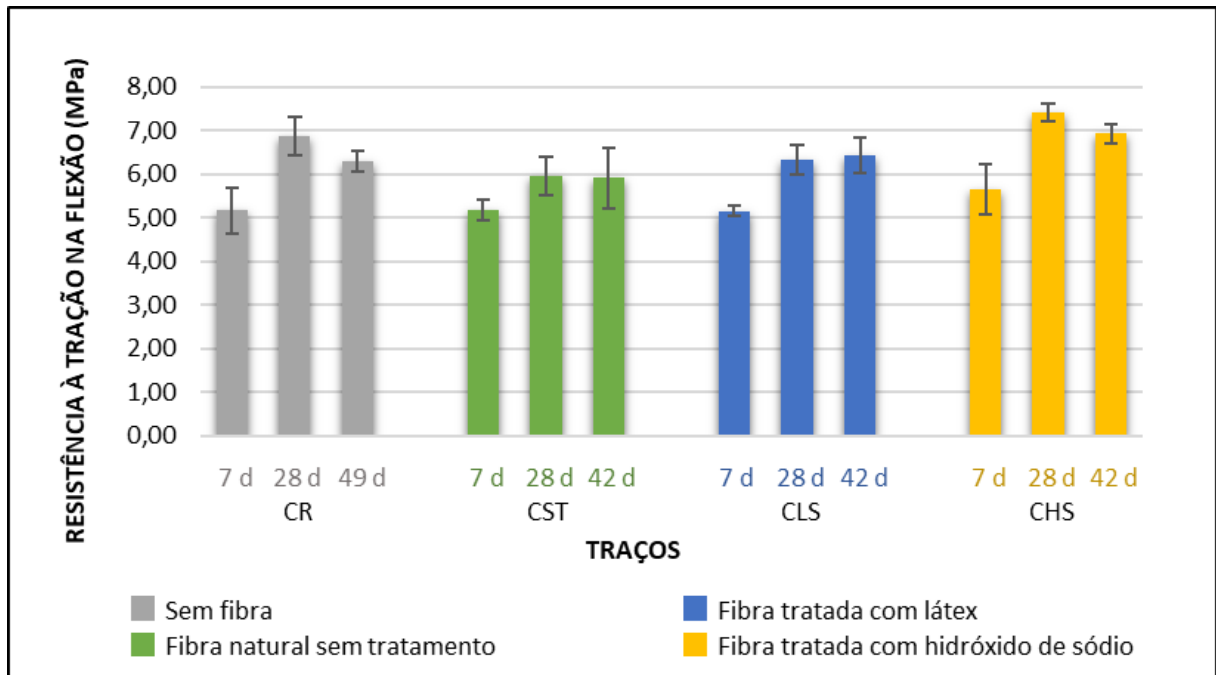
O sódio, ao ser introduzido nas fibras, pode ter promovido a abertura da superfície das microfibras, o que facilita a interação entre as fibras e a matriz cimentícia. Essa modificação superficial pode aumentar a adesão das fibras à pasta de cimento, melhorando a transferência de cargas e, conseqüentemente, a resistência

mecânica do compósito cimentício. A presença de sódio também pode atuar como um facilitador para a formação de pontes químicas entre as fibras e os componentes da matriz, proporcionando maior coesão do compósito cimentício.

4.1.3 Resistência a tração na flexão

O Apêndice B apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão dos compósitos cimentícios reforçados com microfibras de sisal, em diferentes traços e idades de cura. Para facilitar a visualização e a interpretação dos dados apresentados na tabela, foi desenvolvido o gráfico apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Resultados de resistência média a tração na flexão ao longo do tempo



Fonte: Autor(2024).

Para o CR, que não recebeu fibras, os resultados em diferentes idades de cura mostram tendências nas propriedades mecânicas do compósito. Aos 7 dias, a resistência à flexão foi de 5,17 MPa, valor esperado para esse estágio inicial de cura, pois o processo de hidratação do cimento ainda está em andamento. Aos 28 dias, foi observado um aumento, alcançando 6,88 MPa, o que é característico dos compósitos cimentícios, visto que a resistência continua a se desenvolver à medida que a hidratação avança e os produtos de reação se consolidam.

A última amostra do CR foi rompida aos 49 dias enquanto os demais traços foram rompidos aos 42 dias devido a um problema técnico ocorrido com a prensa do laboratório utilizado. Aos 49 dias, a resistência à flexão estabilizou-se em 6,31 MPa, mostrando que o processo de hidratação atingiu um ponto de equilíbrio e as reações se tornaram menos intensas. Essa estabilização indica que, após um rápido ganho de resistência nos primeiros dias, a taxa de desenvolvimento das propriedades mecânicas diminui e tende a se manter constante.

Em relação ao CST, que recebeu microfibras sem tratamento, aos 7 dias a resistência à tração na flexão foi de 5,19 MPa, sutilmente superior à do corpo de prova referência. Isso sugere que a inclusão das microfibras, mesmo sem tratamento, contribuiu para uma leve melhoria na resistência inicial, visto que podem ter absorvido parte das tensões recebidas. Aos 28 dias, a resistência aumentou para 5,97 MPa, mostrando um ganho moderado em relação aos 7 dias.

No entanto, esse valor ainda foi inferior ao do corpo de prova referência, o que pode ser explicado pela falta de tratamento das fibras, que pode ter prejudicado sua adesão à matriz e, consequentemente, seu desempenho. Aos 42 dias, a resistência se estabilizou em 5,92 MPa, mantendo-se praticamente a mesma em relação aos 28 dias.

Essa estabilização sugere que a adição das microfibras sem tratamento não resultou em melhorias significativas após o ganho inicial de resistência. Sem um tratamento adequado, as microfibras podem não ter interagido de maneira eficaz com a matriz, limitando seu potencial de reforço. Embora tenha ocorrido um aumento inicial na resistência aos 7 e 28 dias, esse ganho foi moderado e não se manteve ao longo do tempo, indicando que, sem o tratamento, as fibras não conseguiram proporcionar um reforço contínuo ou melhorar as propriedades mecânicas do compósito a longo prazo.

Para CLS, que recebeu a aplicação de fibras tratadas com látex e pozolanas, aos 7 dias, a resistência à tração na flexão foi de 5,15 MPa, um valor semelhante ao do corpo de prova referência, indicando que, nesse estágio inicial, o efeito do tratamento ainda não se apresentou um aumento significativo da resistência.

Aos 28 dias, observou-se um aumento considerável na resistência à tração na flexão, que alcançou 6,34 MPa. Esse crescimento é indicativo da eficácia do tratamento com látex e pozolanas, que melhorou a adesão entre as fibras e a matriz cimentícia, resultando em uma melhor distribuição das tensões. As pozolanas não

apenas contribuíram para a reatividade química mas também proporcionaram um compósito reforçado.

Nos 42 dias, a resistência à tração na flexão do CLS atingiu 6,43 MPa, mostrando uma leve melhoria em relação aos 28 dias. Esse aumento sutil sugere que o processo de hidratação e a consolidação dos produtos de reação continuaram a influenciar positivamente as propriedades mecânicas, mesmo após o primeiro mês de cura.

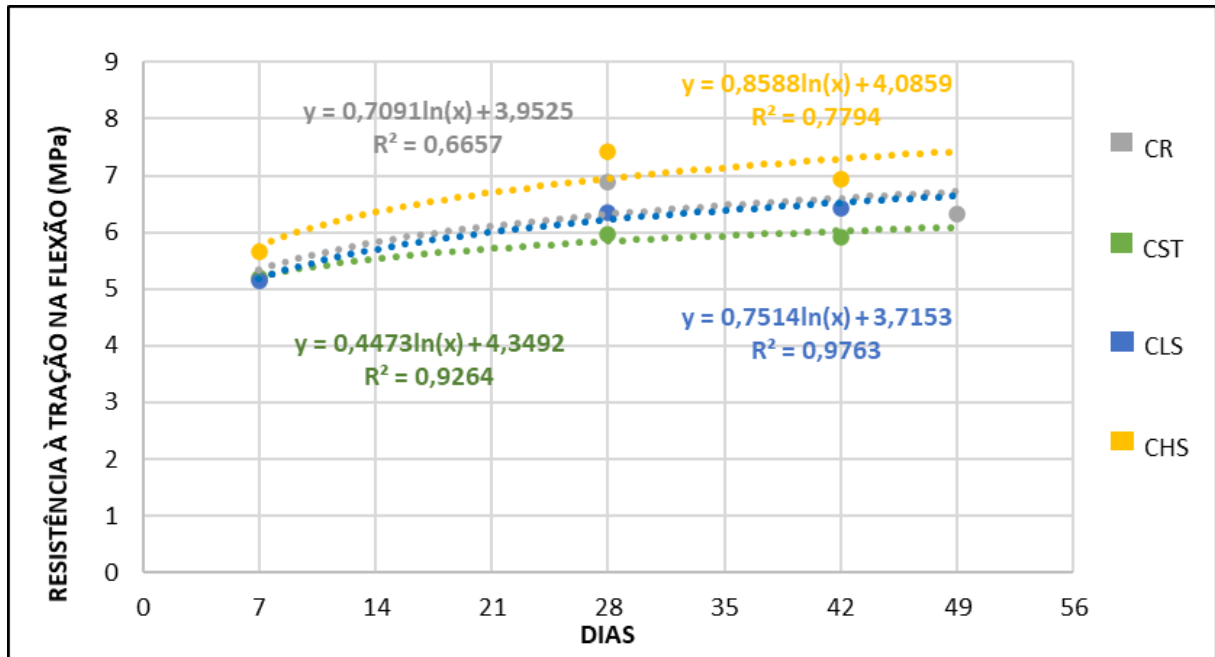
Com relação a CHS, que recebeu a aplicação de fibras tratadas com hidróxido de sódio, aos 7 dias, a resistência à tração na flexão foi de 5,65 MPa, valor que é superior ao observado no corpo de prova referência CR. Essa melhoria pode ser atribuída à remoção de lignina e hemicelulose, que auxilia na eficácia da adesão da microfibrilha com a matriz.

Aos 28 dias, a resistência à tração na flexão do CHS alcançou 7,42 MPa, representando um aumento em relação aos 7 dias. Esse ganho expressivo demonstra a eficácia do tratamento em promover uma melhor interação entre as fibras e a matriz cimentícia. A ação do hidróxido de sódio não apenas melhorou as propriedades mecânicas das fibras, mas também potencializou o desempenho do compósito.

No entanto, aos 42 dias, a resistência à tração na flexão apresentou uma leve diminuição, caindo para 6,93 MPa. Essa redução pode ser indicativa de microfissuras que podem ter se formado no corpo de prova. Apesar dessa leve queda, o valor ainda é superior ao do corpo de prova referência e indica que, em geral, o tratamento com hidróxido de sódio continua a proporcionar um desempenho mecânico satisfatório, visto que as microfibrilhas tratadas mantiveram uma forte adesão à matriz cimentícia mesmo com o passar dos dias, o que contribui para a resistência geral do compósito.

Na figura 30, é apresentado o gráfico com as linhas de tendência das médias dos resultados de resistência a tração na flexão para os diferentes traços, com o objetivo de visualizar de maneira clara e intuitiva a evolução ao longo das idades.

Figura 30 - Linhas de tendência dos resultados médios de resistência a tração na flexão



Fonte: Autor (2024).

O corpo de prova CST apresentou o valor de R sendo 0,9264, sugerindo uma forte correlação e indicando que a inclusão de microfibras, mesmo sem tratamento, proporciona uma resposta mecânica consistente ao longo do tempo. Embora não tenha alcançado os níveis de resistência do CLS e do CHS, esse resultado mostra que as microfibras contribuem positivamente para a resistência do compósito.

O corpo de prova CLS, que recebeu tratamento com látex e pozolanas, apresentou o coeficiente de R mais alto, sendo 0,9763, o que reflete uma correlação satisfatória e um desempenho superior em termos de resistência à flexão. Isso confirma os resultados anteriores que indicavam um ganho na resistência aos 28 dias, evidenciando a eficácia do tratamento em melhorar a adesão entre as fibras e a matriz cimentícia.

O látex, sendo um material flexível e adesivo, em conjunto com as pozolnas, as quais reagem com a cal livre do cimento, provavelmente melhorou a interação entre as microfibras e a matriz cimentícia, proporcionando uma adesão mais forte, o que pode ter contribuído para a formação de uma estrutura mais densa e resistente.

Por sua vez, o corpo de prova CHS, com um valor de R de 0,7794, mostra uma correlação mais moderada em comparação a CST e CLS. Embora tenha apresentado uma resistência elevada aos 28 dias, a leve diminuição aos 42 dias sugere que,

embora o tratamento com hidróxido de sódio tenha proporcionado benefícios, sua eficácia pode ter sido impactada.

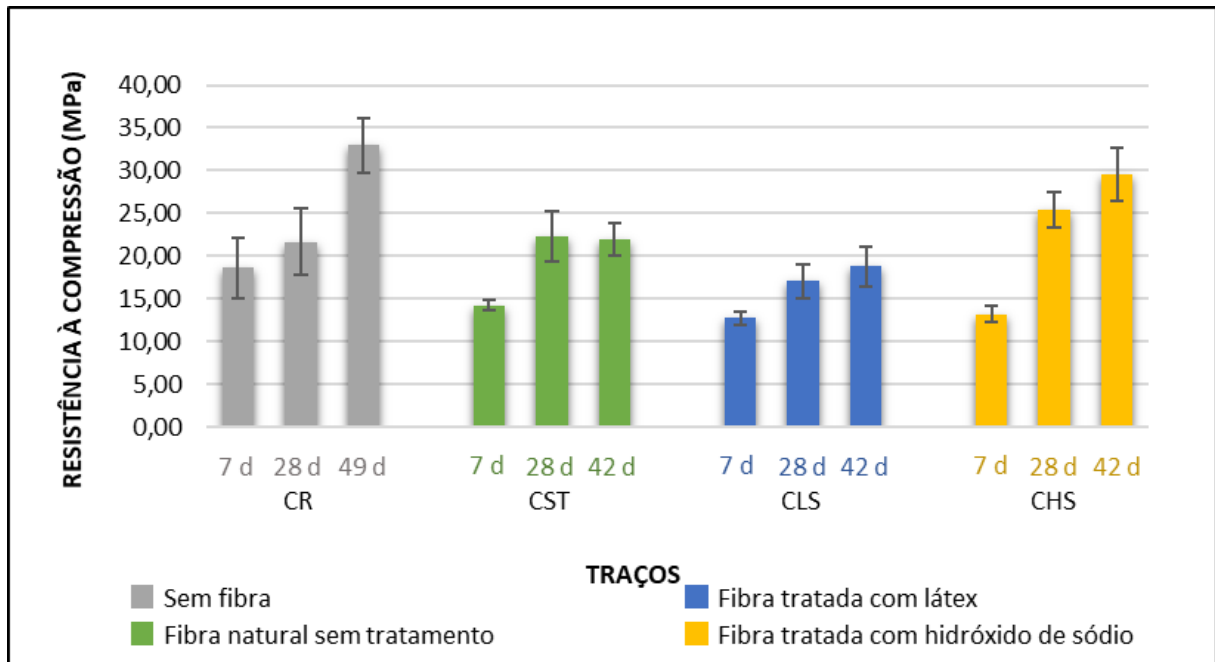
As alterações nas fibras durante o processo de tratamento, que, apesar de melhorar a adesão inicial entre as microfibras e a matriz cimentícia, pode ter levado a modificações que afetaram seu desempenho a longo prazo. O hidróxido de sódio pode ter causado uma alteração superficial nas fibras, tornando-as mais frágeis, o que pode ter contribuído para a leve diminuição na resistência observada aos 42 dias, indicando que, embora o tratamento tenha proporcionado ganhos iniciais, as fibras podem não ter mantido sua integridade ou adesão de forma tão eficaz quanto o esperado.

Por fim, o corpo de prova CR apresentou o menor valor de R, sendo 0,6657, indicando uma correlação mais fraca em comparações aos demais traços, o que comprova que a ausência de fibras resultou em um desempenho mecânico inferior, pois sem as fibras para reforçar a matriz cimentícia, o material não possui a mesma capacidade de resistir às tensões e distribuir as cargas de forma eficiente, visto que as fibras atuam como reforço, aumentando a coesão interna do compósito, o que melhora sua resistência à tração e à flexão

4.1.4 Resistência a compressão

O Apêndice C apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão dos compósitos cimentícios reforçados com microfibras de sisal, nas mesmas idades do ensaio de resistência a flexão: 7, 28 e 42 dias. Para facilitar a visualização e a interpretação dos dados apresentados na tabela, foi desenvolvido o gráfico apresentado na Figura 31.

Figura 31 - Resultados de resistência média a compressão ao longo do tempo



Fonte: Autor (2024).

Com relação a CR, aos 7 dias, a resistência à compressão foi de 18,66 MPa, um valor relativamente baixo comparado as demais idades, mas assim como na análise feita para CR nos resultados de resistência a tração na flexão, é esperado, já que esse é o estágio inicial do processo de hidratação do cimento.

Aos 28 dias, a resistência aumentou para 21,67 MPa. Esse crescimento também é esperado pois a resistência continuou a se desenvolver à medida que a hidratação avançava e os produtos de reação se consolidavam.

Nos 49 dias, a resistência à compressão do CR alcançou 32,93 MPa, mostrando um aumento considerável em relação aos 28 dias. Esse aumento reflete o potencial de ganho de resistência dos compósitos cimentícios, indicando que a estrutura do material está se tornando cada vez mais coesa, visto que ao longo do tempo ocorre o processo de hidratação contínuo do cimento, o que resulta na formação de produtos de hidratação que aumentam a densidade da matriz cimentícia.

Para o CST, aos 7 dias, a resistência à compressão foi de 14,28 MPa, um valor inferior ao observado no corpo de prova referência, que foi de 18,66 MPa. Essa diferença inicial, assim como na análise feita para os resultados de resistência a tração na flexão, pode ser atribuída à falta de tratamento das fibras, que pode ter comprometido a adesão entre as microfibras e a matriz cimentícia, resultando em uma resistência menor.

Aos 28 dias, houve um aumento na resistência à compressão, alcançando 22,33 MPa. Esse ganho é um indicativo de que as microfibras, mesmo sem tratamento, estão contribuindo para a melhoria das propriedades mecânicas à medida que a matriz cimentícia se hidrata.

No entanto, aos 42 dias, a resistência à compressão do CST foi de 21,91 MPa, apresentando uma leve diminuição em relação aos 28 dias. Essa redução sugere que, embora as microfibras tenham um efeito positivo na resistência, a falta de tratamento pode ter limitado o potencial de ganho contínuo nas propriedades mecânicas.

Para o CLS, os 7 dias, a resistência à compressão foi de 12,76 MPa, um valor inferior ao observado tanto no corpo de prova referência quanto nos corpos de prova com aplicação de microfibras sem tratamento. Essa resistência inicial pode ser atribuída à fase inicial de cura, principalmente das pozolanas, visto que as interações entre as fibras tratadas e a matriz cimentícia ainda estão em processo de reação.

Aos 28 dias, a resistência aumentou para 17,09 MPa, demonstrando um ganho em relação aos 7 dias. Esse aumento sugere que o tratamento com látex e pozolanas gerou um impacto positivo na adesão entre as fibras e a matriz. As pozolanas podem ter contribuído para a melhoria da microestrutura do compósito, resultando em uma maior resistência à compressão.

Entretanto, aos 42 dias, a resistência à compressão do CLS foi de 18,82 MPa, ou seja, apresentou uma leve elevação em comparação aos 28 dias. Esse comportamento sugere que, embora o tratamento tenha proporcionado um aumento nas propriedades mecânicas, o ganho adicional de resistência entre 28 e 42 dias foi moderado. Essa estabilização indica que a matriz cimentícia atingiu um ponto em que a hidratação e a formação de novos produtos químicos se tornaram mais lentas.

Já para o CHS, assim como ocorreu com os demais traços, o valor de resistência aos 7 dias foi inferior as demais idades. Aos 28 dias, houve um aumento na resistência, alcançando 25,46 MPa. Esse crescimento expressivo indica que o tratamento com hidróxido de sódio teve um impacto positivo nas propriedades mecânicas do compósito. A alcalinidade do hidróxido de sódio, assim como evidenciado no ensaio de resistência a tração na flexão, pode ter contribuído para a remoção de hemicelulose e lignina das fibras, aumentando a área de interação com a matriz cimentícia.

Nos 42 dias, a resistência à compressão do CHS aumentou ainda mais, alcançando 29,55 MPa. Esse contínuo aumento mostra que o tratamento com

hidróxido de sódio não apenas promoveu um ganho inicial, mas também contribuiu para o fortalecimento do compósito ao longo do tempo. O fato de a resistência continuar a aumentar até os 42 dias indica que a hidratação da matriz cimentícia e a interação com as fibras tratadas estão ocorrendo de maneira eficaz.

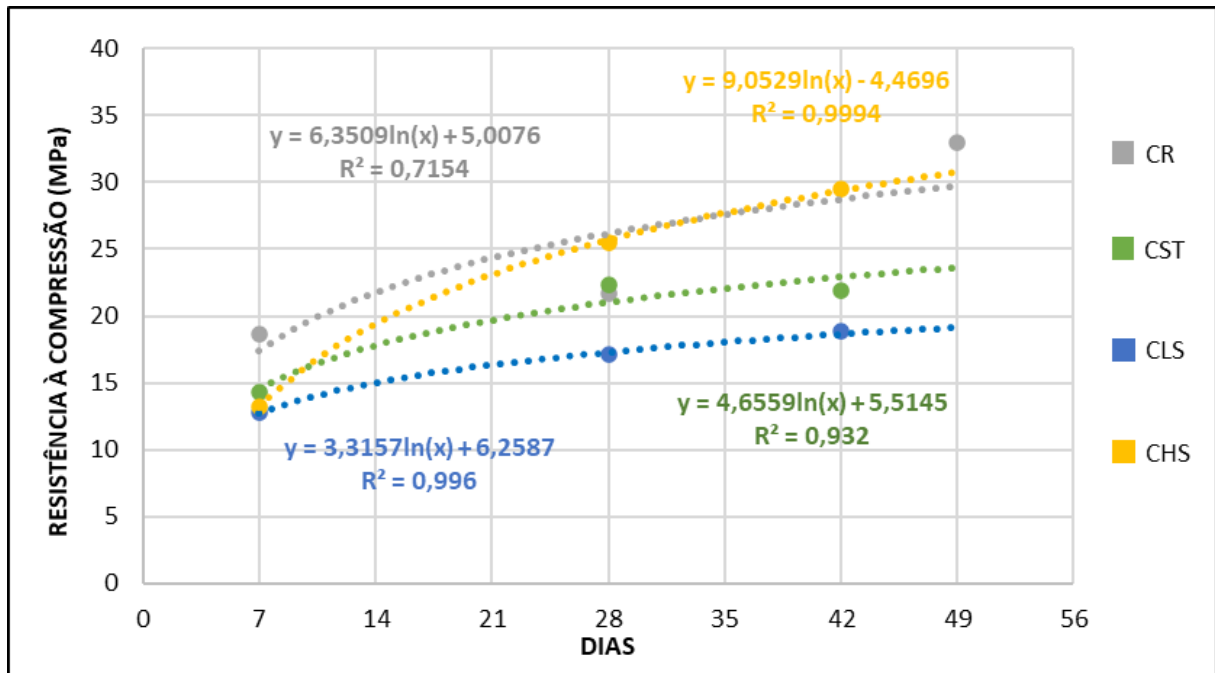
A alteração na superfície das fibras ocasionada pelo tratamento com solução de hidróxido de sódio pode ter tornado as microfibras mais rugosas e reativas, facilitando sua adesão à matriz cimentícia. Esse aprimoramento da adesão entre as fibras e a matriz permite uma distribuição mais eficiente das tensões dentro do compósito, o que pode ter auxiliado no desempenho mecânico.

Nas maiores idades, os resultados de resistência à compressão mostraram que o CR, que não recebeu a aplicação de fibras, apresentou os maiores valores, alcançando 32,93 MPa. Apesar de os demais traços terem demonstrado eficiência e benefícios ao longo do tempo, a presença de microfibras, tanto tratadas quanto não tratadas, não ultrapassou a resistência do CR.

No entanto, o CR foi rompido aos 49 dias, enquanto os demais traços foram rompidos aos 42 dias. Pode-se afirmar que dada a moderada diferença entre os resultados de CR aos 49 dias em comparação ao CHS aos 42 dias, possivelmente atingiriam praticamente o mesmo resultado de resistência a compressão se tivessem sido rompidos na mesma idade.

Na figura 32, é apresentado o gráfico com as linhas de tendência das médias dos resultados de resistência a compressão para os diferentes traços.

Figura 32 - Linhas de tendência dos resultados médios de resistência a compressão



Fonte: Autor (2024).

O corpo de prova CR apresentou um valor de R de 0,7154, indicando uma correlação moderada entre a resistência à compressão e o tempo. Esse valor relativamente baixo sugere que o comportamento mecânico do compósito foi menos previsível.

No caso de CST o coeficiente de R foi de 0,932. Esse valor indica uma forte correlação, sugerindo que a presença das microfibras, mesmo sem tratamento, contribuiu para a resistência à compressão. O aumento observado aos 28 dias e a leve diminuição aos 42 dias refletem a contribuição das fibras, mas também indicam que a falta de tratamento pode ter afetado a adesão entre as fibras e a matriz.

O CLS apresentou um valor de R de 0,996, evidenciando uma correlação forte. Esse resultado sugere que o tratamento melhorou a interação entre as fibras e a matriz cimentícia, principalmente em função das pozolanas, que reagem com a cal livre do cimento, resultando em um comportamento mecânico consistente. O aumento contínuo na resistência à compressão indica que as pozolanas e o látex contribuíram para a formação de uma matriz mais resistente.

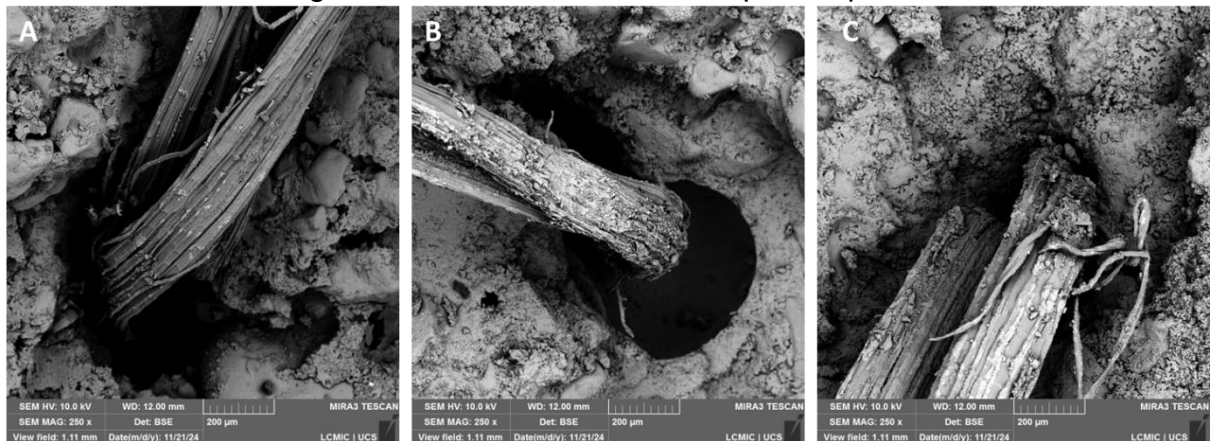
Por fim, CHS apresentou o maior valor de R, sendo 0,9994, que indica uma correlação forte. Isso sugere que o tratamento com hidróxido de sódio não apenas melhorou a adesão entre as fibras e a matriz, mas também indicou um comportamento mecânico previsível. A resistência à compressão do CHS aumentou de forma

consistente ao longo do tempo, evidenciando o impacto positivo do tratamento nas propriedades do compósito.

4.1.5 Análise microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos corpos de prova

A seguir, serão apresentadas as análises microscópicas realizadas por meio da técnica de MEV, com o objetivo de investigar as características morfológicas de interação das fibras com a matriz cimentícia. Na Figura 33 é possível observar a análise MEV de cada corpo de prova lado a lado.

Figura 33 - Análise MEV dos corpos de prova



Fonte: Autor (2024).

Com relação a Figura 33a, a análise MEV do corpo de prova CST revelou que a microfibras apresenta uma superfície lisa e com baixa rugosidade, o que compromete a adesão à matriz cimentícia e reduz a resistência mecânica do compósito. Além disso, foi observada a presença de material residual depositado na microfibras, que é proveniente da própria matriz cimentícia durante o processo de rompimento.

Pode-se afirmar que a lacuna identificada entre a microfibras e a matriz foi causada pela falta de tratamento superficial da fibra. Essa lacuna prejudica a transferência de carga, afetando negativamente a resistência e durabilidade do compósito, o que sugere a importância de tratamentos para melhorar a adesão entre a fibra e a matriz.

A análise MEV do corpo de prova CHS, identificada na Figura 33b, revelou uma microfibras mais rugosa, o que era esperado devido ao tratamento aplicado. No entanto, mesmo com a aplicação do tratamento, também foi identificada a presença

de um vazio entre a microfibrilha e a matriz, embora este seja menor em comparação com o corpo de prova CST.

Esse vazio pode ser justificado pelo fato de que o tratamento com hidróxido de sódio modificou a superfície da fibra e melhorou a aderência, mas não foi capaz de eliminar completamente a lacuna observada. Essa observação sugere que, embora o tratamento tenha melhorado a adesão em relação ao corpo de prova CST, ainda são necessários tratamentos adicionais ou ajustes nas proporções do tratamento para melhorar a interação entre microfibrilha e matriz cimentícia.

A análise MEV do corpo de prova CLS revelou uma lacuna entre a microfibrilha e a matriz cimentícia significativamente menor em comparação aos corpos de prova CST e CHS. No entanto, os melhores resultados de resistência mecânica foram observados no corpo de prova CHS, o que pode ser explicado ao observar a microfibrilha na Figura 33c, que se mostrou mais lisa se comparada a análise MEV realizada nas microfibrilhas antes de serem aplicadas na matriz cimentícia.

Isso sugere que ocorreu desprendimento de material pozolânico da microfibrilha após sua aplicação no corpo de prova e este depositou-se junto à matriz durante o processo de cura, o que conseqüentemente permitiu a diminuição da lacuna entre os dois componentes. No entanto, esse fato pode ter removido parcialmente o tratamento da fibra, tornando-a mais lisa e, assim, prejudicando a adesão esperada entre a microfibrilha e a matriz, o que explica os melhores resultados mecânicos obtidos com o tratamento com hidróxido de sódio.

Como a análise MEV dos corpos de prova foi realizada após os rompimentos, também foram observados pontos de desfibrilhação nas microfibrilhas, o que pode ser atribuído ao processo de rompimento mecânico ao qual as fibras foram submetidas neste estudo. A desfibrilhação ocorreu devido aos esforços aplicados nos corpos de prova, o que pode causar a separação da estrutura original da fibra.

5. CONCLUSÃO

Este estudo investigou o impacto de diferentes tratamentos aplicados em microfibras de sisal, as quais foram utilizadas em compósitos cimentícios de forma direcionada, avaliando a resistência à compressão e à tração na flexão ao longo de três idades: 7, 28 e 42 dias. Os resultados mostraram que a presença de microfibras influenciou positivamente nas propriedades mecânicas da matriz, embora de forma variada, dependendo do tipo de tratamento aplicado.

Os corpos de prova com aplicação de microfibras não tratadas (CST), apresentaram resultados pouco satisfatórios de resistência a compressão, inclusive em comparação ao corpo de prova referência (CR), o que sugere que o tratamento é necessário para otimizar o desempenho do material, visto que a zona de interação superficial das microfibras com a matriz se torna frágil quando estas não recebem nenhum tipo de tratamento.

As fibras tratadas com látex e pozolanas (CLS) também apresentaram um desempenho inferior de resistência a compressão em comparação ao corpo de prova referência (CR), situação que pode estar relacionada ao fato de que as pozolanas necessitam de um tempo de cura maior para que ocorra a reatividade com o cimento e também em função do desprendimento de material observado na análise MEV dos corpos de prova.

Observou-se que, para a resistência à compressão, os corpos de prova com as microfibras tratadas com hidróxido de sódio (CHS) apresentaram o melhor desempenho, visto que indicaram um aumento significativo da resistência ao longo do tempo. Esse tratamento possibilitou uma melhor interação entre as microfibras e a matriz cimentícia, o que resultou em uma resistência semelhante a corpo de prova referência aos 42 dias, comprovando a eficácia do tratamento.

Assim como nos resultados de resistência a compressão, os corpos de prova reforçados com fibras sem tratamento (CST) também apresentaram resultados pouco satisfatórios nos ensaios de resistência a tração na flexão, indicando fragilidade na interação e necessidade de aplicação de tratamento.

Já os compósitos contendo fibras tratadas com pozolana (CLS) apresentaram um desempenho consistente de resistência a tração na flexão ao longo do tempo, com valores satisfatórios, especialmente aos 28 e 42 dias. Dessa forma, os resultados indicam que, com um tempo de cura maior e ajustes no tratamento de forma a

melhorar a fixação da pozolanas com o látex na microfibra, o CLS pode ser uma alternativa promissora.

Os corpos de prova com aplicação de fibras tratadas com hidróxido de sódio (CHS) apresentaram as maiores resistências, superando os outros traços em todos os períodos avaliados. Tal desempenho pode ser atribuído ao tratamento com NaOH, que promoveu uma melhor aderência entre as fibras e a matriz cimentícia e, conseqüentemente, diminuiu os vazios que poderiam se formar na zona de interação superficial da microfibra com a matriz. Os resultados indicam que o CHS tem grande potencial para aplicações em que a resistência à tração na flexão é necessária.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de colaborar para estudos futuros de forma a aprofundar o entendimento sobre o comportamento dos compósitos cimentícios reforçados com microfibras de sisal, ficam as seguintes sugestões:

- a) analisar o efeito de outros tratamentos para as microfibras de sisal, dentre eles o processo de silanização mencionado nesta pesquisa;
- b) aplicação dos mesmos tratamentos utilizados nessa pesquisa, sendo estes o tratamento com solução de hidróxido de sódio e látex com pozolanas em outros tipos de fibras naturais;
- c) avaliar possíveis ajustes no tratamento com látex e pozolanas, de forma a melhorar a fixação das pozolanas no látex para que não ocorra desprendimento de material pozolânico durante a aplicação das microfibras nos corpos de prova;
- d) avaliar a durabilidade das microfibras tratadas em ambientes agressivos, com variações de umidade e temperatura;
- e) avaliar diferentes alturas de direcionamento das microfibras nos moldes, visto que nesse estudo as microfibras foram aplicadas com aproximadamente 8 mm;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, J.; ZHOU, Z. Mechanical properties of natural as well as synthetic fiber reinforced concrete: A review. **Construction and building materials**, v. 333, n. 127353, p. 127353, 2022.

ARUNA, M. Mechanical Behaviour of Sisal Fibre Reinforced Cement Composites. **International Journal of Materials and Metallurgical Engineering**, 2014.

BANTHIA, N.; NANDAKUMAR, N. Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites. **Cement & concrete composites**, v. 25, n. 1, p. 3–9, 2003.

BANTHIA, N.; SHENG, J. Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites. **Cement & concrete composites**, v. 18, n. 4, p. 251–269, 1996.

BELTRAMI, L.V.R.; SCIENZA, L. C.; ZATTERA, A. J. **Efeito do tratamento alcalino de fibras de curauá sobre as propriedades de compósitos de matriz biodegradável**. Revista Polímeros, vol. 24, n. 3, p. 388-394, 2014.

BILBA, K.; ARSENE, M.-A. Silane treatment of bagasse fiber for reinforcement of cementitious composites. **Composites. Part A, Applied science and manufacturing**, v. 39, n. 9, p. 1488–1495, 2008.

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. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 2, 2019.

CECCONELLO, V.; POLETTO, M. Effect of graphene oxide surface deposition process on synthetic macrofibers and its results on the microstructure of fiber-reinforced concrete. **Polymers**, v. 16, n. 8, p. 1168, 2024.

COLLIVIGNARELLI, M. C. et al. A review on alternative binders, admixtures and water for the production of sustainable concrete. **Journal of cleaner production**, v. 295, n. 126408, p. 126408, 2021.

DE KLERK, M. D. et al. Durability of chemically modified sisal fibre in cement-based composites. **Construction and building materials**, v. 241, n. 117835, p. 117835, 2020.

DE SOUZA CASTOLDI, R. **Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos reforçados com fibras de polipropileno e sisal**. [s.l.] Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), fev. 2018.

DI PRISCO, M.; PLIZZARI, G.; VANDEWALLE, L. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. **Materials and structures**, v. 42, n. 9, p. 1261–1281, 2009.

DISCHER, M. G.; FORTES, A. S.; ARAÚJO, M. L. V. A Utilização do Concreto Estrutural com Adição de Fibras não Metálicas na Construção Civil, uma Prospecção Tecnológica. **Cadernos de Prospecção**, v. 16, n. 3, p. 745–760, 2023.

DU, S. et al. The effect of silane surface treatment on the mechanical properties of UHPFRC. **Construction and building materials**, v. 304, n. 124580, p. 124580, 2021.

EHRENBRING, H. Z.; TUTIKIAN, B. F.; QUININO, U. C. DE M. Análise comparativa da retração por secagem de concretos com fibras novas e recicladas de poliéster. **Ambiente construído**, v. 18, n. 3, p. 195–209, 2018.

FARUK, O. et al. Progress report on natural fiber reinforced composites: Progress report on natural fiber composites. **Macromolecular materials and engineering**, v. 299, n. 1, p. 9–26, 2014.

FERNANDES, S. C. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas de concretos reforçados com microfibras de vidro e microfibras de polipropileno**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS, 2023.

FIGUEIREDO, A. D. DE. **Concreto com fibras**. Instituto Brasileiro do Concreto. 2005.

FIGUEIREDO, A. D. DE. **Concreto reforçado com fibras**. [s.l.] Universidade de Sao Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA), 2011.

ISLAM, M. S.; AHMED, S. J. U. Influence of jute fiber on concrete properties. **Construction and building materials**, v. 189, p. 768–776, 2018.

JÄHN, A. et al. Characterization of alkali treated flax fibres by means of FT Raman spectroscopy and environmental scanning electron microscopy. **Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy**, v. 58, n. 10, p. 2271–2279, 2002.

LAMINE, B. A.; MOHAMED, A.; RACHID, R. Concrete reinforcement using composite fiberglass-based materials. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 9, n. 7, p. 16530–01e, 2023.

MA, W. et al. Mechanical properties and engineering application of cellulose fiber-reinforced concrete. **Materials today. Communications**, v. 22, n. 100818, p. 100818, 2020.

MADHU, P. et al. Effect of various chemical treatments of *Prosopis juliflora* fibers as composite reinforcement: Physicochemical, thermal, mechanical, and morphological properties. **Journal of natural fibers**, v. 17, n. 6, p. 833–844, 2020.

MELLO, E.; RIBELLATO, C.; MOHAMEDELHASSAN, E. Improving Concrete Properties with Fibers Addition. **World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering**, 2014.

MORENO, R. M. B.; DE SOUZA GONÇALVES, P.; MATTOSO, L. H. C. **Desempenho da Borracha Natural Crua de Novos Clones de Seringueira (hevea spp.) da Série IAC para Recomendação ao Plantio no Estado de São Paulo: II - As Propriedades**

Tecnológicas DRC (%), % de Nitrogênio, % de Cinzas e % de Extrato Acetônico. EMBRAPA, 2006.

MOURA, C. R. APLICAÇÕES E TRATAMENTOS DA FIBRA DE BAMBU E SIMILARES: UMA REVISÃO. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 5, n. 5, p. 0460–0468, 2019.

NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2 Ed. Bookman, 2013.

Oliveira, C. V. S., Oliva Olivani, A. L. C., Alves Santos, S. M., & Oliveira, V. S. **CONCRETO MODIFICADO POR ADITIVO E FIBRAS DE POLIÉSTER**. Caderno De Graduação - Ciências Exatas E Tecnológicas - UNIT – SERGIPE, 2018.

PERUZZI, A. DE P. **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento Portland modificada com látex e adição de sílica ativa**. [s.l.] Universidade de Sao Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA), 2002.

PICKERING, K. L.; EFENDY, M. G. A.; LE, T. M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. **Composites. Part A, Applied science and manufacturing**, v. 83, p. 98–112, 2016.

PRAKASH CHANDAR, S.; SANGEETH KUMAR, S. K. Mechanical properties of fiber reinforced concrete – natural fibers: A review. **Materials today: proceedings**, v. 68, p. 2066–2071, 2022.

PRIYA, C.; SUDALAIMANI, K. Performance assessment of surface modified natural fibre using NaOH in composite concrete. **Materials research express**, v. 10, n. 12, p. 125101, 2023.

SAVASTANO JUNIOR, H. **Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo**. [s.l.] Universidade de Sao Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA), 2000.

SILVA, A. L. A. DA et al. As vantagens da fibra de vidro no concreto estrutural. Em: **Fundamentos de Estruturas - Volume 1**. [s.l.] Editora Poisson, 2023.

SILVA, E. J. DA et al. Compósito cimentício com elevado teor de fibra de coco tratada: propriedades físicas e durabilidade. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 3, 2018.

SILVA, F. DE A. et al. Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites. **Construction and building materials**, v. 24, n. 5, p. 777–785, 2010.

SILVA, R. DA P. **Argamassas com adição de fibras de polipropileno -estudo do comportamento reológico e mecânico**. [s.l.] Universidade de Sao Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA), 2006.

SINGH, H.; GUPTA, R. Influence of cellulose fiber addition on self-healing and water permeability of concrete. **Case studies in construction materials**, v. 12, n. e00324, p. e00324, 2020.

SONG, H. et al. A comprehensive overview of jute fiber reinforced cementitious composites. **Case studies in construction materials**, v. 15, n. e00724, p. e00724, 2021.

SOUSA, L. F.; SANTOS JUNIOR, A. G.; OLIVEIRA SANTOS, M. L. L. Avaliação do desempenho de argamassas cimentícias reforçadas com fibras de poliéster. **Brazilian Applied Science Review**, v. 3, n. 6, p. 2565–2576, 2019.

SOUZA, M. V. R. **EFEITO DE FIBRAS SINTÉTICAS NAS PROPRIEDADES DE LIGANTES E CONCRETOS ASFÁLTICOS**. [s.l.] UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, mar. 2010.

TAMIL SELVI, M.; THANDAVAMOORTHY, T. S. Load-deflection characteristics of steel, polypropylene and hybrid fiber reinforced concrete beams. **Archives of Civil Engineering**, v. 61, n. 1, p. 59–72, 2015.

THOMAS, B. C.; JOSE, Y. S. A study on characteristics of sisal fiber and its performance in fiber reinforced concrete. **Materials today: proceedings**, v. 51, p. 1238–1242, 2022.

WU, H. et al. A review of recent developments in application of plant fibers as reinforcements in concrete. **Journal of cleaner production**, v. 419, n. 138265, p. 138265, 2023.

XU, H. et al. Experimental study on durability of fiber reinforced concrete: Effect of cellulose fiber, polyvinyl alcohol fiber and polyolefin fiber. **Construction and building materials**, v. 306, n. 124867, p. 124867, 2021.

YOO, D.-Y.; BANTHIA, N. Impact resistance of fiber-reinforced concrete – A review. **Cement & concrete composites**, v. 104, n. 103389, p. 103389, 2019.

APÊNDICE A – PROGRAMA EXPERIMENTAL DA SEGUNDA ETAPA

Ensaio	Materiais	Corpos de Prova		
		7 dias	28 dias	42 dias
Resistência a Compressão	•Traço de argamassa convencional	3	3	3
	•Traço de argamassa com fibra vegetal sem tratamento	3	3	3
	•Traço de argamassa com fibra vegetal tratada com látex	3	3	3
	•Traço de argamassa com fibra vegetal tratada com hidróxido de sódio	3	3	3
Ensaio	Materiais	Corpos de Prova		
		7 dias	28 dias	42 dias
Tração na flexão	•Traço de argamassa convencional	3	3	3
	•Traço de argamassa com fibra vegetal sem tratamento	3	3	3
	•Traço de argamassa com fibra vegetal tratada com látex	3	3	3
	•Traço de argamassa com fibra vegetal tratada com hidróxido de sódio	3	3	3
Ensaio	Materiais	Amostras		
Microscopia eletrônica de varredura	•Fibra de sisal sem tratamento	1		
	•Fibra de sisal tratada com látex e pozolanas	1		
	•Fibra de sisal tratada com hidróxido de sódio	1		
Ensaio	Materiais	Amostras		
Espectroscopia de dispersão de energia	•Fibra de sisal sem tratamento	1		
	•Fibra de sisal tratada com látex e pozolanas	1		
	•Fibra de sisal tratada com hidróxido de sódio	1		

**APÊNDICE B – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO AO
LONGO DO TEMPO**

Idades de Ensaio	Traço	Resistência a Tração na Flexão (MPa)			Média Aritmética (MPa)	Desvio Padrão
7 dias	CR	5,86	5,03	4,62	5,17	0,52
	CST	5,52	5,06	5,01	5,19	0,23
	CLS	5,13	5,01	5,31	5,15	0,12
	CHS	5,65	4,94	6,34	5,65	0,57
28 dias	CR	6,48	7,49	6,66	6,88	0,44
	CST	6,05	6,46	5,40	5,97	0,44
	CLS	6,37	6,76	5,91	6,34	0,35
	CHS	7,52	7,59	7,15	7,42	0,19
42 dias	CR	6,1	6,2	6,63	6,31	0,23
	CST	6,09	5,01	6,67	5,92	0,69
	CLS	6,09	6,18	7,01	6,43	0,41
	CHS	6,62	7,03	7,15	6,93	0,23

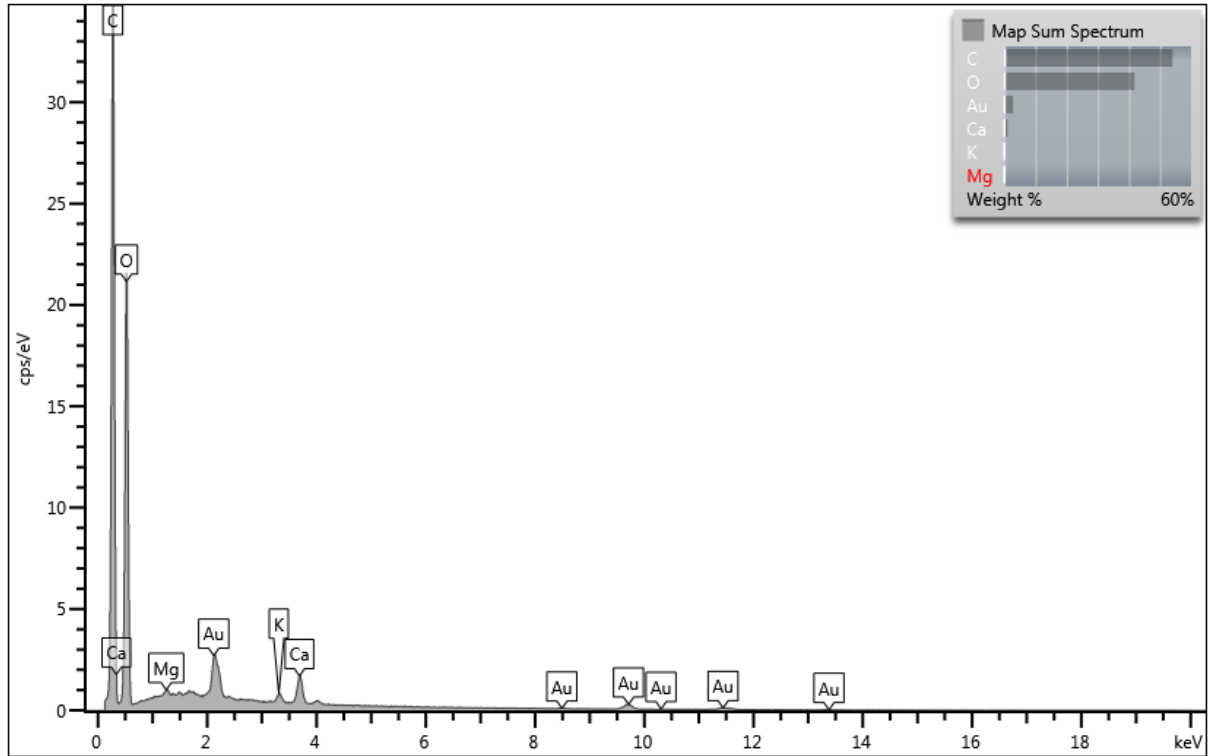
Fonte: Autor (2024).

APÊNDICE C – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AO LONGO DO TEMPO

Idades de Ensaio	Traço	Resistência a Compressão (MPa)						Média Aritmética (MPa)	Desvio Padrão
7 dias	CR	19,95	25,73	18,50	16,45	15,04	16,29	18,66	3,54
	CST	14,40	14,52	14,22	14,83	13,18	14,53	14,28	0,53
	CLS	14,31	13,06	11,86	12,65	12,55	12,11	12,76	0,79
	CHS	12,82	13,83	13,90	14,48	12,26	11,89	13,20	0,94
28 dias	CR	19,91	17,24	23,67	29,18	19,08	20,92	21,67	3,88
	CST	21,03	18,89	25,15	22,35	27,16	19,37	22,33	2,99
	CLS	14,93	16,05	18,98	14,97	20,29	17,33	17,09	2,01
	CHS	24,16	22,10	24,76	27,70	25,99	28,05	25,46	2,06
42 dias	CR	32,41	29,46	29,29	33,85	33,54	39,01	32,93	3,26
	CST	24,43	23,54	21,91	21,70	21,48	18,38	21,91	1,90
	CLS	19,25	18,32	20,98	21,09	19,23	14,04	18,82	2,35
	CHS	29,77	23,72	29,78	28,62	31,05	34,35	29,55	3,17

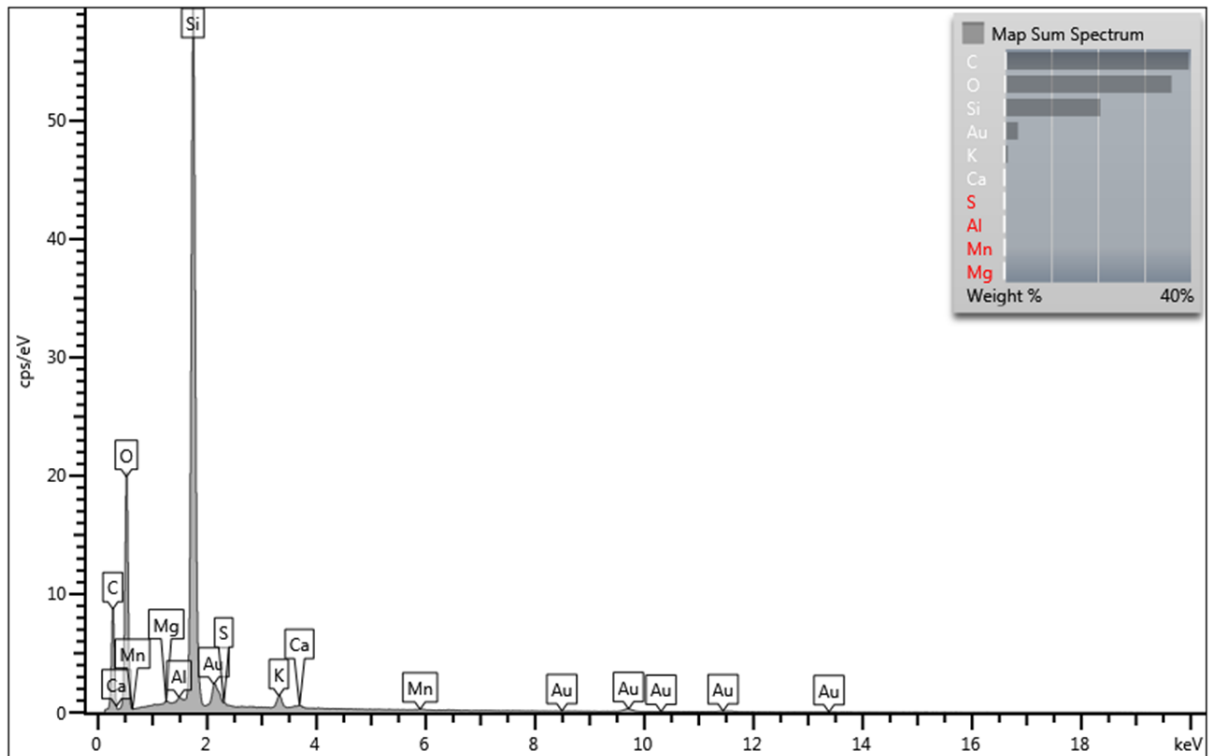
Fonte: Autor (2024).

APÊNDICE D – GRÁFICO DA ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE DISPERSÃO DE ENERGIA DA FIBRA DE SISAL SEM TRATAMENTO



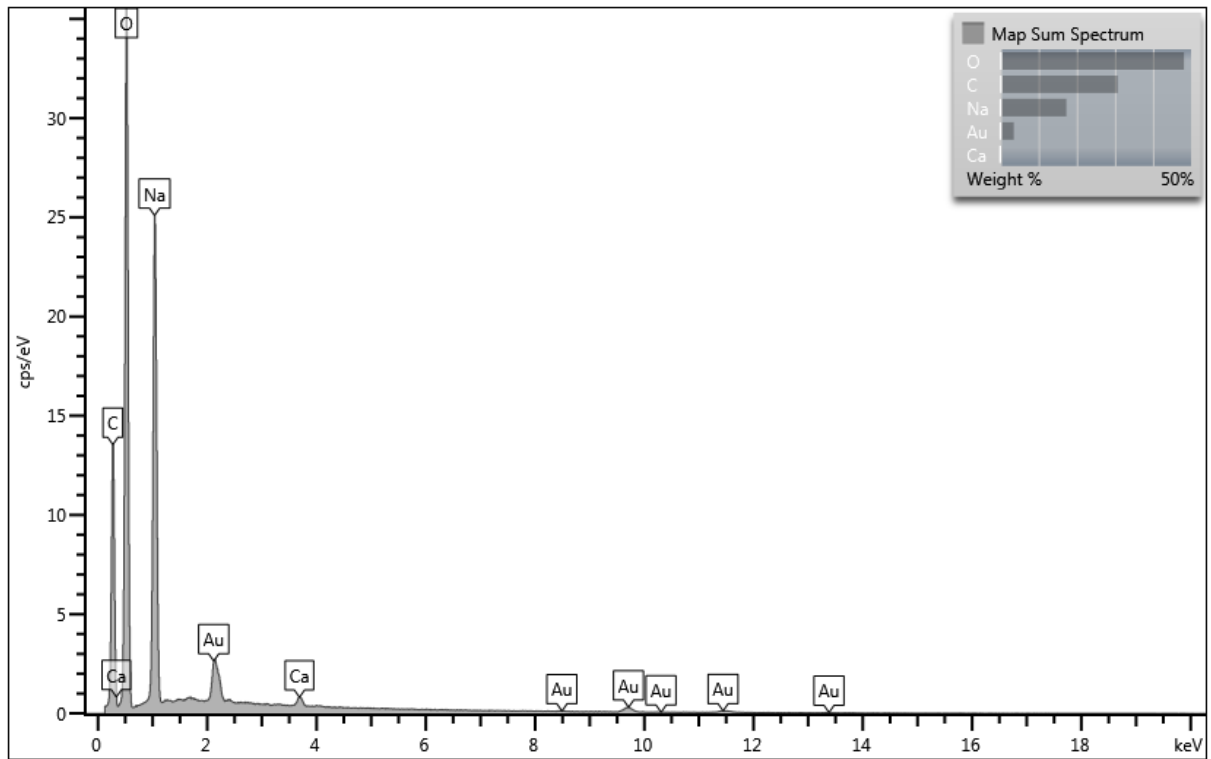
Fonte: Autor (2024).

APÊNDICE E – GRÁFICO DA ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE DISPERSÃO DE ENERGIA DA FIBRA DE SISAL TRATADA COM LÁTEX E POZOLANAS



Fonte: Autor (2024).

APÊNDICE F – GRÁFICO DA ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE DISPERSÃO DE ENERGIA DA FIBRA DE SISAL TRATADA COM HIDRÓXIDO DE SÓDIO



Fonte: Autor (2024).