

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

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS  
REFORÇADOS COM FIBRAS DE PALHA DE MILHO E POLIPROPILENO  
COMBINADAS**

**NICOLAS FERREIRA LOVATO**

**CAXIAS DO SUL  
2025**

**NICOLAS FERREIRA LOVATO**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS  
REFORÇADOS COM FIBRAS DE PALHA DE MILHO E POLIPROPILENO  
COMBINADAS**

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 Ceconello

**CAXIAS DO SUL**

**2025**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, à minha família, em especial aos meus pais, Diogo Lovato e Lucemara Ferreira, pela criação, pelo molde do meu caráter e por todo o suporte e apoio oferecidos a mim durante toda a vida, pois sei que não sou fácil de lidar.

Aos meus colegas de curso e amigos – Paulo, Ângela, Maykelvin, Pâmela, Léo, João, Fred, Melina – e às demais pessoas que trouxeram leveza e alegria, não só durante o período de aulas, mas também fora dele.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Vinício Cecconello, pelo suporte, pela orientação e pela contribuição no desenvolvimento deste trabalho, e aos demais professores do curso de Engenharia Civil da UCS, pelo conhecimento transmitido e pela confirmação de que escolhi fazer o que amo, dissipando quaisquer dúvidas de que tomei o caminho certo.

Aos meus amigos e demais pessoas fora do ambiente acadêmico — aos que estão comigo desde a infância, bem como àqueles que, em pouco tempo, entraram/passaram repentinamente pela minha vida e deixaram suas marcas com ensinamentos e momentos que guardarei para sempre.

À minha psicóloga, Paula Bisol, pelo encorajamento em matricular-me no curso de Engenharia Civil, mesmo quando esse não parecia o caminho mais fácil (e não foi) e todo o suporte emocional concedido a mim para que, dentro do possível, eu me mantivesse firme em meus objetivos pessoais.

E, de modo geral, a todos que contribuíram, de alguma forma, no meu período de graduação.

## RESUMO

LOVATO, Nicolas. **Estudo comparativo entre compósitos cimentícios reforçados com fibras de palha de milho e polipropileno combinadas.** Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2025.

A busca por soluções sustentáveis na construção civil tem impulsionado o uso de fibras naturais em substituição às fibras sintéticas, visando a redução de impactos ambientais e o reaproveitamento de resíduos agrícolas. Diante disso, o presente trabalho investiga o desempenho de compósitos cimentícios reforçados com adição de 1% fibras de palha de milho e de polipropileno, analisando diferentes proporções de dosagens para ambas. As fibras de palha de milho foram submetidas ao tratamento alcalino com hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), com o intuito de remover impurezas, reduzir a absorção de água e melhorar a adesão à matriz cimentícia. Foram realizados ensaios de índice de consistência, densidade nos estados fresco e endurecido, absorção de água por capilaridade e resistências à tração na flexão e à compressão axial nas idades de 7, 28 e 42 dias. Os resultados demonstraram que a adição de fibras tratadas apresentaram um bom desempenho quanto a trabalhabilidade, redução da absorção de água e aumento da tenacidade dos compósitos cimentícios aos 7 dias, destacando a eficiência do tratamento alcalino com  $\text{Ca(OH)}_2$ . Aos 28 e 42 dias, observou-se uma redução de desempenho em comparação aos traços com menor teor de fibras de palha de milho, apontando para uma possível degradação da fibra devido ao meio alcalino. Conclui-se que o uso de fibras naturais tratadas apresenta viabilidade técnica e benefícios ambientais, representando uma alternativa promissora para a produção de compósitos cimentícios mais duráveis e sustentáveis.

Palavras-chave: Fibras naturais; palha de milho; polipropileno; compósitos cimentícios; desempenho mecânico.

## ABSTRACT

LOVATO, Nicolas. **Comparative study between cementitious composites reinforced with combined corn straw and polypropylene fibers.** Undergraduate Thesis in Civil Engineering, University of Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2025.

The pursuit of sustainable solutions in the construction industry has driven the use of natural fibers as a replacement for synthetic ones, aiming to reduce environmental impacts and promote the reuse of agricultural residues. In this context, the present study investigates the performance of cementitious composites with the addition of 1% of corn straw and polypropylene fibers, analyzing different dosage proportions for both types of fibers. The corn straw fibers were subjected to alkaline treatment with calcium hydroxide ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) to remove impurities, reduce water absorption, and improve adhesion to the cementitious matrix. Tests were carried out to determine consistency index, density in fresh and hardened states, water absorption by capillarity, and flexural and compressive strength at ages of 7, 28, and 42 days. The results showed that the addition of treated fibers provided good performance in terms of workability, reduced water absorption, and increased cementitious composites toughness at 7 days, highlighting the efficiency of the alkaline treatment with  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . However, at 28 and 42 days, a decrease in performance was observed compared to mixes with lower corn straw fiber content, suggesting possible fiber degradation due to the alkaline environment. It is concluded that the use of treated natural fibers presents technical feasibility and environmental benefits, representing a promising alternative for the production of more durable and sustainable cementitious composites.

Keywords: Natural fibers; corn straw; polypropylene; cementitious composites; mechanical performance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema ilustrativo de concentração de tensões: (a) para o concreto simples; e (b) para o CRF .....	16
Figura 2 - Comportamento de resistência à tração dos compósitos de fibras de juta .....	18
Figura 3 - Formato adotado por Aquino <i>et al.</i> (2022) para o tratamento da fibra .....	19
Figura 4 - TGA das fibras de banana in natura e tratadas com 1, 3, 5, 7 e 9% de NaOH .....	21
Figura 5 - Resistência à compressão diametral de compósitos cimentícios com fibras de palha de milho .....	25
Figura 6 - Programa experimental.....	28
Figura 7 - Curva granulométrica do agregado miúdo .....	33
Figura 8 - Tratamento das fibras de palha de milho com $\text{Ca(OH)}_2$ .....	35
Figura 9 - Preparação das fibras .....	36
Figura 10 - Ensaio da massa específica da fibra.....	37
Figura 11 - Fibra sintética de polipropileno .....	38
Figura 12 - Dosagem para um compósito cimentício com adição de fibras .....	43
Figura 13 - Ensaio de índice de consistência .....	44
Figura 14 - Ensaio de densidade no estado fresco .....	45
Figura 15 - Ensaio de absorção de água por capilaridade .....	47
Figura 16 - Ensaio de densidade no estado endurecido .....	48
Figura 17 - Ensaio de resistência à tração na flexão.....	49
Figura 18 - Ensaio de resistência à compressão axial .....	51
Figura 19 – Resultados do ensaio de índices de consistência .....	53
Figura 20 - Resultados do ensaio de densidade no estado fresco.....	55
Figura 21 - Ensaio de absorção de água por capilaridade .....	56
Figura 22 - Ensaio de densidade no estado endurecido .....	58
Figura 23 - Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão aos 7, 28 e 42 dias.....	59
Figura 24 - Tendência de resultados do ensaio de resistência à tração na flexão .....	60

Figura 25 - Efeito do ponteamto de fissuras.....	61
Figura 26 - Comportamento das fibras quanto ao arrancamento .....	62
Figura 27 - Resultados de resistêcia à compressão axial aos 7, 28 e 42 dias	63
Figura 28 - Tendência de resultados do ensaio de resistêcia à compressão axial .....	64
Figura 29 – Análise do MEV traços 1M e 1 PP (100x) .....	65
Figura 30 - Análise do MEV traços 1M e 1 PP (1000x) .....	66
Figura 31 - Espectroscopia de dispersão de energia do traço 1M e 1PP.....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistência a compressão de corpos de prova após a exposição salina (MPa) .....	22
Tabela 2 - Consistência de compósitos cimentícios contendo fibras de palha de milho.....	23
Tabela 3 - Absorção de água do compósito cimentício com diferentes tratamentos e dosagens para a fibra da palha de milho.....	24
Tabela 4 - Requisitos químicos do cimento Portland estabelecidos pela NBR 16697 (expresso em porcentagem de massa) .....	30
Tabela 5 - Requisitos físicos e mecânicos do cimento Portland estabelecidos pela NBR 16697.....	30
Tabela 6 - Especificações do CP II-F-40.....	31
Tabela 7 - Resultados do ensaio de granulometria do agregado miúdo .....	33
Tabela 8 - Massa específica da fibra de palha de milho .....	38
Tabela 9 - Propriedades físicas da fibra de polipropileno.....	39
Tabela 10 - Combinações a serem ensaiadas .....	40
Tabela 11 - Traços de Referência .....	41
Tabela 12 - Traço utilizado na pesquisa.....	42
Tabela 13 - Quantificativo de ensaios realizados .....	51

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ca(OH) <sub>2</sub> :	Hidróxido de cálcio
CP:	Cimento Portland
CRF:	Concreto Reforçado com Fibras
EDS:	Espectroscopia de Dispersão de Energia
ELU:	Estado limite último
LBTEC:	Laboratório de Tecnologia Construtiva
LCMIC:	Laboratório Central de Microscopia
MEK-P:	Peróxido de metil etil cetona
MEV:	Microscópio eletrônico de varredura
NaOH:	Hidróxido de sódio
SAMAE:	Serviço Municipal de Água e Esgoto
TGA:	Análise termogravimétrica
UCS:	Universidade de Caxias do Sul

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1. OBJETIVO PRINCIPAL.....	14
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>15</b>
2.1. UTILIZAÇÃO DE FIBRAS EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS .....	15
2.1.1. Fibras Naturais .....	17
2.2. VARIAÇÃO QUANTO AO FORMATO DA FIBRA .....	19
2.3. TRATAMENTO SUPERFICIAL EM FIBRAS NATURAIS .....	20
2.3.1. Hidróxido de Sódio (NaOH).....	20
2.3.2. Hidróxido de Cálcio (Ca(OH) <sub>2</sub> ) .....	23
2.4. VARIAÇÃO QUANTO A DOSAGEM DA FIBRA .....	25
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>27</b>
3.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	27
3.1.1. Variáveis de resposta .....	28
3.1.2. Variáveis de controle .....	29
3.2. MATERIAIS .....	29
3.2.1. Cimento .....	30
3.2.2. Cinza da casca do arroz.....	31
3.2.3. Agregado miúdo .....	32
3.2.4. Água 34	
3.2.5. Superplastificante.....	34
3.2.6. Fibra natural .....	34
3.2.7. Fibra sintética .....	38
3.3. MÉTODOS .....	39

3.3.1.	Compósitos cimentícios.....	39
3.3.2.	Composição das misturas .....	40
3.3.3.	Ensaio de composição do compósito cimentício no estado fresco	43
3.3.4.	Ensaio de composição do compósito cimentício no estado endurecido	46
3.3.5.	Quantitativos de ensaios .....	51
3.3.6.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	52
3.3.7.	Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) .....	52
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>53</b>
4.1.	ENSAIO DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA .....	53
4.2.	ENSAIO DE DENSIDADE NO ESTADO FRESCO .....	55
4.3.	ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	56
4.4.	ENSAIO DE DENSIDADE NO ESTADO ENDURECIDO .....	57
4.5.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	58
4.6.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	62
4.7.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	65
4.8.	ESPECTROSCOPIA DE DISPERSÃO DE ENERGIA (EDS).....	67
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>69</b>
5.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	70
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>71</b>
	<b>APÊNDICE A – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE .....</b>	<b>77</b>
	<b>APÊNDICE B – DENSIDADE NO ESTADO ENDURECIDO .....</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE C – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE D – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL .....</b>	<b>80</b>

<b>APÊNDICE E – GRÁFICO DA ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE DISPERSÃO DE ENERGIA DO TRAÇO 1M.....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE F – GRÁFICO DA ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE DISPERSÃO DE ENERGIA DO TRAÇO 1PP .....</b>	<b>84</b>

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com Peruzzi (2002), compósitos cimentícios reforçados com fibras apresentam desempenho mecânico superior quando comparados aos materiais convencionais. Esse reforço contribui para a contenção da propagação e do aumento de fissuras, especialmente em situações que envolvem cargas estáticas ou impactos.

O uso de fibras naturais é considerado um avanço na ciência dos materiais cimentícios, por promover a utilização de recursos naturais em substituição às fibras sintéticas comumente utilizadas (Aquino et al. 2022). Sendo assim, a busca por novos materiais que resultem em resultados consistentes e benéficos para que sejam utilizados na construção civil segue sendo estimulada.

A palha de milho é composta por celulose, hemicelulose e lignina, que ao entrarem em contato com a água, sofrem hidrólise e liberam monossacarídeos, os quais são denominados açúcares celulósicos. Estudos realizados por Xie (2016) indicam que resíduos agrícolas e florestais não tratados apresentam concentrações significativas desses açúcares, os quais podem interferir negativamente na reação de hidratação do cimento Portland, comprometendo o desempenho de compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais.

Quando tratada, a capacidade de absorção de água da palha é reduzida, evitando a hidrólise dos açúcares celulósicos e impedindo que afete o desempenho de hidratação do cimento Portland e também prevenindo a corrosão alcalina causada pela reação de hidratação entre o cimento Portland e a água (Niu et al. 2022).

Ao longo deste trabalho, serão abordados experimentos visando a utilização da fibra da palha do milho como uma possível forma de reaproveitamento deste resíduo, avaliando os benefícios de seu incremento com compósitos cimentícios, elemento muito utilizado na construção civil.

Para isso, serão realizados ensaios em compósitos cimentícios com adição de 1% de fibras de palha de milho e polipropileno, afim de avaliar de forma comparativa o desempenho com uma fibra natural tratada e com uma fibra sintética já inserida no mercado, afim de promover a utilização de um resíduo

agrícola na construção civil de modo a agregar qualidade em um material essencial na área.

Ao longo do trabalho, serão realizados ensaios nos estados fresco e endurecido, avaliando propriedades como a trabalhabilidade, densidade, absorção de água por capilaridade, resistência à tração na flexão e resistência à compressão.

### 1.1. OBJETIVO PRINCIPAL

Comparar o desempenho de compósitos cimentícios a partir do uso de fibras de palha de milho e polipropileno de forma combinada.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) avaliar o comportamento do compósito com a adição de 1% de fibras naturais e sintéticas combinadas;
- b) avaliar o comportamento no estado fresco a partir de diferentes teores de fibras;
- c) comparar diferentes teores de fibras naturais e sintéticas quanto ao desempenho mecânico;
- d) avaliar a eficácia do tratamento alcalino com  $\text{Ca(OH)}_2$  na beneficiação das fibras de palha de milho.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão abordados os principais conceitos relacionados ao uso de fibras naturais em compósitos cimentícios, incluindo propriedades, tratamentos e efeitos na matriz. Esse embasamento teórico fornece suporte para a compreensão e análise dos resultados deste trabalho.

### 2.1. UTILIZAÇÃO DE FIBRAS EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

A argamassa exerce uma função fundamental nas construções que utilizam pedras, tijolos ou blocos cerâmicos, atuando como elemento de união entre essas unidades. Além de sua importância na ligação dos materiais, ela também é essencial nos revestimentos, formando uma camada protetora que auxilia na conservação e na durabilidade dos componentes da edificação (Santiago, 2007).

Segundo Lisboa, Alves e Melo (2017), a proporção dos materiais utilizados na mistura pode ser ajustada conforme o tipo de compósitos cimentícios e as particularidades da obra. Esse compósito consiste em um material homogêneo que pode incluir aditivos e adições minerais, composto por aglomerantes, agregado miúdo e água.

A retração de um compósito cimentício no estado fresco é resultado, principalmente, à perda de água. A retração plástica é influenciada pelo consumo de aglomerante, granulometria do agregado miúdo, teor de material pulverulento, quantidade de água adicionada para mistura e condições climáticas desfavoráveis (temperatura alta, umidade relativa baixa e ventos fortes), dentre outros fatores (Bentur e Kovler, 2003).

Ainda de acordo com Bentur e Kovler (2003), muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos com utilização de fibras para minimizar e até mesmo eliminar os efeitos provocados pela retração plástica na superfície de compósitos cimentícios.

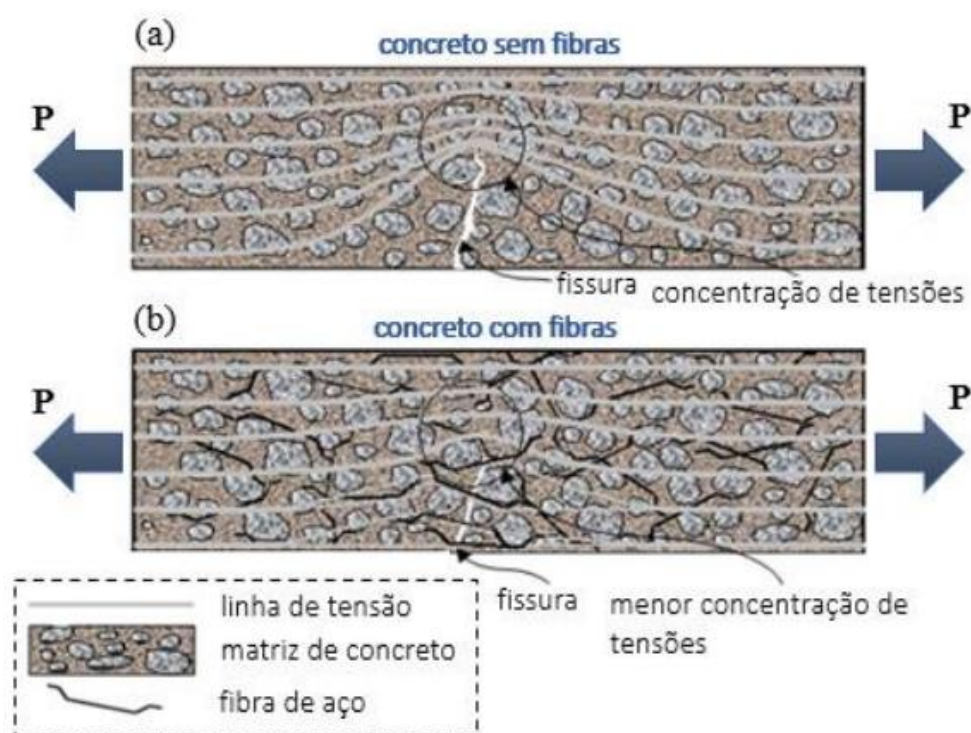
Fibras aplicadas são denominadas macrofibras e microfibras. Conforme Figueiredo (2011), as macrofibras auxiliam na contenção da abertura de fissuras,

promovendo melhorias no desempenho e na vida útil do material, enquanto as microfibras elevam a resistência da matriz frente à fadiga.

A transmissão de esforços entre a fibra e a matriz ocorre por meio da adesão, caracterizada pela tensão de cisalhamento presente na interface entre a fibra e a matriz de cimento que a envolve. Dessa forma, o acréscimo da tenacidade do compósito é, em grande parte, determinado pelos mecanismos de arrancamento das fibras (Naaman e Najm, 1991).

Figueiredo (2022), ilustra na Figura 1 a influência da utilização de fibras em um concreto submetido a tração, reduzindo a concentração das tensões e consequentemente reduzindo a propagação de fissurações.

Figura 1 - Esquema ilustrativo de concentração de tensões: (a) para o concreto simples; e (b) para o CRF



Fonte: Figueiredo (2022).

Diante do que foi apresentado, fica evidente que o uso de fibras em compósitos cimentícios traz ganhos importantes, especialmente no controle de fissuras. Além de melhorar o desempenho mecânico, essas fibras ajudam na

durabilidade do material, tornando O compósito cimentício mais resistente e eficiente para diferentes aplicações na construção civil.

### **2.1.1. Fibras Naturais**

Segundo Caixeta Silva *et al.* (2025), diversos estudos têm sido realizados recentemente com fibras naturais em compósitos cimentícios, devido à viabilidade do uso desse tipo de fibra como substituto das fibras sintéticas.

Devido a sua condutividade térmica, blocos tradicionais de materiais compósitos à base de cimento implicam em um alto custo de construção, consumo significativo de energia e forte dependência de recursos não renováveis. Isso os torna inadequados para um desenvolvimento humano sustentável a longo prazo. Resíduos agrícolas e florestais, por sua vez, vêm sendo utilizados como materiais de construção há milhares de anos. Nos países desenvolvidos atualmente, cerca de 40% desses recursos agrícolas e florestais são consumidos pela indústria da construção (Niu e Kim, 2022).

De acordo com Saleem (2025), o uso de fibras sintéticas na reabilitação de compósitos cimentícios tem sido questionado por conta da alta energia necessária para sua produção e da significativa pegada de carbono que geram, o que os torna ambientalmente pouco vantajosos. Além disso, materiais como os polímeros reforçados com fibras sintéticas costumam ter um custo elevado, especialmente em países em desenvolvimento. Diante desse cenário, surgem alternativas mais sustentáveis e acessíveis, como as fibras naturais, que vêm ganhando destaque por sua biodegradabilidade e menor impacto ambiental.

Dentre as fibras naturais utilizadas na construção civil, principalmente incorporados em compósitos cimentícios, estão as fibras de sisal e juta, que estão entre as mais utilizadas no setor.

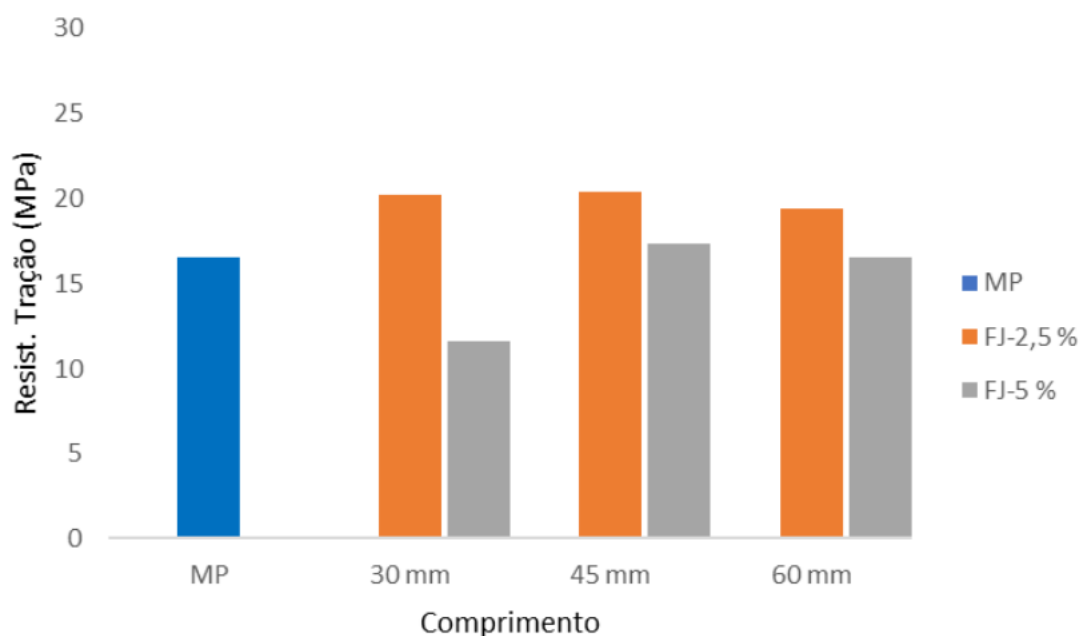
Fidelis (2014), realizou a caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibra de juta com tratamentos superficiais com polímeros, buscando principalmente a melhora da adesão fibra-matriz.

O estudo mostrou que a utilização da fibra natural tratada uma melhora da tensão adencional nominal e aumento de resistência e durabilidade do compósito.

Em pesquisa conduzida por Ramalingam *et al.* (2017), utilizando uma pequena quantidade de fibras de sisal de diferentes comprimentos (5, 10, 15 e 20mm) como estabilizante em misturas asfálticas, se obteve uma melhora em relação a resistência à fadiga e sensibilidade à umidade. Com a adição de fibras de sisal com comprimento de 15mm, na concentração de 0,05%, foram adicionadas às misturas asfálticas com teor ótimo de ligante de 5,4%, obteve-se o melhor desempenho dentre as dimensões.

Alencar *et al.* (2021), analisaram a influência do comprimento e proporção do fio de fibras de juta na resistência mecânica à tração de compósitos poliméricos, submetendo as fibras ao tratamento com resina, MEK-P (peróxido de metil etil cetona) e acelerador de cobalto. Após ensaios de resistência à tração, observou-se que os ensaios com 2,5% em massa de fibra de juta apresentaram os melhores resultados, porém com pouca variação de melhora em relação a seu comprimento, como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Comportamento de resistência à tração dos compósitos de fibras de juta



Fonte: Krishana *et al.* (2021).

## 2.2. VARIAÇÃO QUANTO AO FORMATO DA FIBRA

Segundo Figueiredo (2011), as fibras podem ser dosadas tanto em volume quanto em massa por metro cúbico de concreto ou argamassa. Quando ocorre a fissuração, as fibras com maior fator de forma tendem a estar presentes em maior quantidade na seção rompida, o que proporciona uma resistência pós-fissura mais elevada para um determinado teor de fibra.

De acordo com Metha e Monteiro (2014), a variabilidade no formato das fibras incorporadas tende a aumentar a adesão com a matriz cimentícia e tem se mostrado um campo com elevado número de pesquisas, com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas dos materiais de construção.

No caso de fibras de aço, o formato com ancoragem em gancho, dificulta o arrancamento, proporcionando uma ligação mais robusta entre a matriz cimentante e as fibras. De acordo com Braz *et al.* (2015), o fator de forma se mostrou um aspecto importante quanto ao desempenho das fibras, apontando que quanto maior esse valor, melhor será a adesão da fibra à matriz.

De acordo com o formato escolhido por Aquino *et al.* (2022) e conforme aponta a Figura 3, em que foi utilizado fibras com cerca de 30 mm de comprimento e 10 mm de largura, foi possível obter resultados satisfatórios em relação ao aumento da absorção de água e redução da densidade do compósito cimentício.

Figura 3 - Formato adotado por Aquino *et al.* (2022) para o tratamento da fibra



Fonte: Aquino *et al.* (2022).

Segundo Marvila (2021), o formato escolhido por Aquino *et al.* (2022) possibilita uma melhor caracterização química, mineralógica, morfológica e para os testes mecânicos, além de uma maior área de superfície para o tratamento da fibra.

### 2.3. TRATAMENTO SUPERFICIAL EM FIBRAS NATURAIS

O uso de diferentes tipos de tratamentos superficiais físicos e químicos provoca alterações na estrutura superficial das fibras, assim como nas suas propriedades de superfície (Hodzic e Shankz, 2014).

Para que as fibras naturais tenham um bom desempenho no compósito cimentício, é fundamental que passem por um tratamento. Esse processo ajuda a reduzir a absorção de água e melhora a adesão das fibras ao cimento. Entre os métodos mais usados estão os tratamentos com hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), que são eficientes na preparação das fibras para uso em materiais cimentícios.

#### 2.3.1. Hidróxido de Sódio (NaOH)

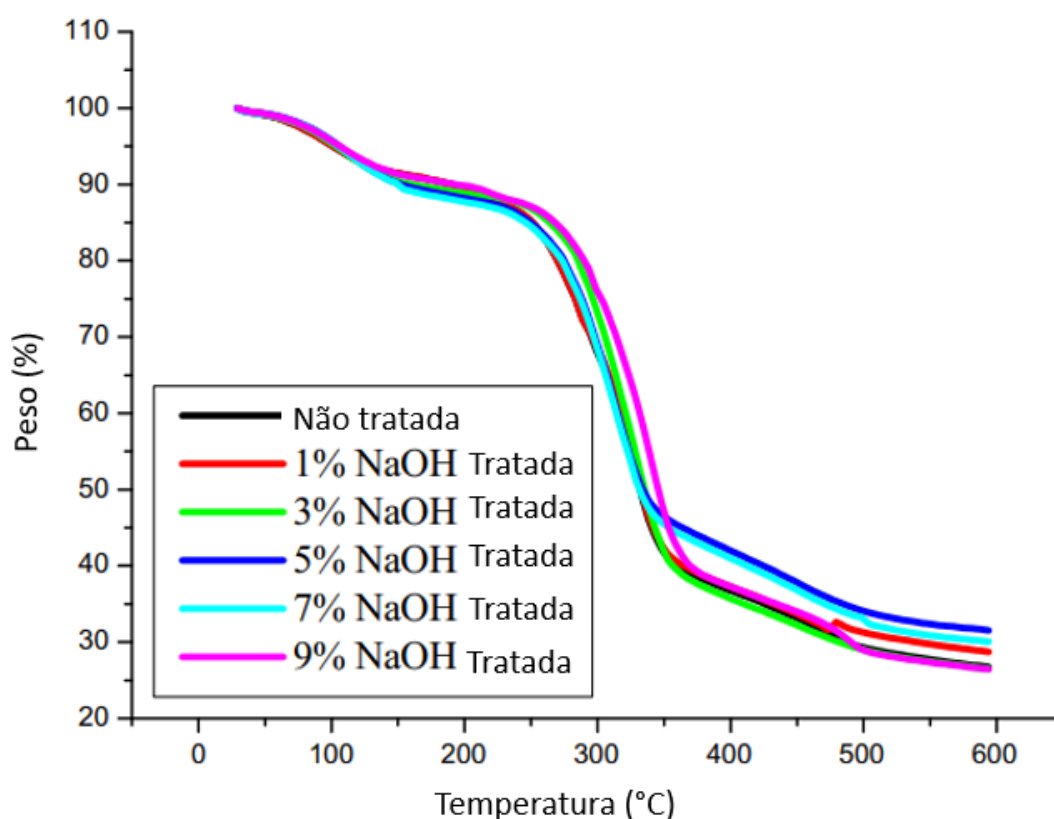
Ramadevi *et al.* (2012) promoveu um estudo sobre o efeito do tratamento alcalino na absorção de água em uma fibra celulósica e concluiu que esse beneficiamento das fibras resulta na remoção dos componentes de lignina e hemicelulose, alterando sua natureza hidrofílica para hidrofóbica.

Alguns autores, como Parre *et al.* (2020), apontam uma solução de NaOH (Hidróxido de sódio), popularmente conhecido como soda cáustica, como a melhor opção para se realizar o tratamento de fibras vegetais. O procedimento utilizado pelo autor foi realizar a imersão da fibra em uma solução com concentrações de 1, 3, 5, 7 e 9% em massa de NaOH por 24 horas em temperatura ambiente. As fibras foram então lavadas com água destilada afim de remover qualquer partícula de NaOH de sua superfície, deixadas secar por 2 dias à luz do sol e por fim, deixadas em um forno por 24 horas à uma temperatura de 90-100 °C para que sejam removidos qualquer resquício de umidade.

Parre *et al.* (2020), em seu estudo sobre as propriedades químicas, térmicas e morfológicas de fibras de banana não tratadas e tratadas com NaOH, chegou à conclusão que a concentração ótima desse tratamento foi reportada com 5% de NaOH em termos de favorecimento das fibras, se mostrando mais eficiente que as concentrações de 1%, 3%, 7% e 9%, se devendo principalmente à redução das regiões amorfas das fibras.

Por meio da análise termogravimétrica (TGA), submetendo amostras de 10 mg de fibras com diferentes dosagens de favorecimento, a decomposição térmica dessas amostras foi avaliada em uma faixa de temperatura programada de 30°C a 600°C, como mostra a Figura 4.

Figura 4 - TGA das fibras de banana in natura e tratadas com 1, 3, 5, 7 e 9% de NaOH



Fonte: Adaptado de Parre *et al.* (2020).

Em seu artigo sobre o uso de fibras vegetais naturais em compósitos cimentícios, Marvila *et al.* (2021) analisou a utilização de diferentes fibras, dentre

elas, a fibra de banana, com dosagens de 2,5% e 5% com e sem o tratamento de NaOH quanto a resistência a compressão.

Os resultados apresentados na Tabela 1 refletem a melhora em relação a resistência a compressão quando utilizado o tratamento de NaOH nas fibras de banana com dosagem de 2,5% em relação a quantidade de CP-IV (cimento Portland).

Tabela 1 - Resistência a compressão de corpos de prova após a exposição salina (MPa)

Autor	Tipo de fibra	Tratamento	Dosagem	Formato	Unidade	Resultado (MPa)
Marvila <i>et al</i>	N/A	N/A	N/A	N/A	Compressão	6,81
	Banana	N/A	2,5%	Retilíneo	Compressão	0,32
	Banana	N/A	5%	Retilíneo	Compressão	0,31
	Banana	<b>NaOH</b>	<b>2,5%</b>	<b>Retilíneo</b>	<b>Compressão</b>	<b>8,02</b>
	Banana	NaOH	5%	Retilíneo	Compressão	5,69

Fonte: Adaptado de Marvila (2023 apud Azevedo 2021).

Os valores apresentados refletem um aumento de 6,81 MPa de uma argamassa sem o uso de nenhum tipo de fibra para 8,02 MPa de uma argamassa com a dosagem e tratamento apresentados, ou seja, aproximadamente 17,8%.

Caixeta Silva *et al.* (2024), analisaram o efeito de tratamentos alcalinos em compósitos cimentício produzidos com fibra de palha e milho. Dentre seus resultados, é possível destacar consistência, realizado através do ensaio de consistência e a redução da taxa de absorção de água, que será observado nos itens 3.3.3 e 3.3.4.

Com a utilização de fibras em formato cúbico, dentre os tratamentos, aquele que apresentou os melhores resultados em relação à trabalhabilidade para revestimento de compósitos cimentícios foi o tratado com NaOH na proporção de 2,5%, uma vez que sua expansão horizontal ficou dentro dos limites de  $260 \pm 5$  mm recomendados pela NBR 13276, elaborada pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) (2016), conforme aponta a Tabela 2.

Tabela 2 - Consistência de compósitos cimentícios contendo fibras de palha de milho

Autor	Tipo de fibra	Tratamento	Dosagem	Formato	Unidade	Resultado (mm)
Caixeta Silva <i>et al</i>	N/A	N/A	N/A	N/A	Consistência	260
	Palha de milho	N/A	2,5	Cúbico	Consistência	252
	Palha de milho	N/A	5	Cúbico	Consistência	255
	Palha de milho	Ca(OH) <sub>2</sub>	2,5	Cúbico	Consistência	228
	Palha de milho	Ca(OH) <sub>2</sub>	5	Cúbico	Consistência	232
	Palha de milho	NaOH	2,5	Cúbico	Consistência	207
	<b>Palha de milho</b>	<b>NaOH</b>	<b>5</b>	<b>Cúbico</b>	<b>Consistência</b>	<b>263</b>

Fonte: Adaptado de Caixeta Silva *et al.* (2024).

O tratamento com NaOH tem se mostrado eficiente, pois remove impurezas das fibras e reduz sua capacidade de absorver água. Isso faz com que elas se integrem melhor ao compósito cimentício, melhorando sua resistência, trabalhabilidade e contribuindo para um material mais durável e confiável.

Esses dados sugerem que o uso de fibras tratadas pode melhorar a durabilidade dos compósitos cimentícios, devido à formação de pontos de adesão e à transferência de esforços proporcionada pelas fibras.

### 2.3.2. Hidróxido de Cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>)

Zukoski *et al.* (2018) analisaram a durabilidade da fibra de curauá, que foi submetida a tratamento alcalino com Ca(OH)<sub>2</sub> (hidróxido de cálcio), também conhecida como cal hidratada, visando aumentar a rugosidade da superfície da fibra e reduzir a capacidade de absorção de umidade, mesmo princípio utilizado no tratamento com NaOH. Os autores concluíram que a fibra aderiu bem à matriz, uma vez que o Ca(OH)<sub>2</sub> permitiu a mineralização da matriz da fibra, formando pontos de ancoragem e melhorando o comportamento do compósito cimentício.

Primeiramente, os autores submergiram as fibras em três ciclos de lavagem em água quente (80°C) durante 3 horas para então, as secarem. Em seguida, as fibras foram “penteadas” e cortadas em comprimentos de 40 mm. As fibras cortadas foram imersas em uma solução saturada de Ca(OH)<sub>2</sub> com água por 60 minutos e depois secas. O objetivo do tratamento alcalino foi remover a

hemicelulose e a lignina da parede da fibra e aumentar a rugosidade da superfície por deposição de cálcio, o que influencia positivamente a adesão entre fibra e matriz.

Em relação à absorção de água, a palha de milho com o tratamento de  $\text{Ca(OH)}_2$  apresentou os melhores resultados, uma vez que sua composição contribuiu para a diminuição da absorção de água do compósito cimentício.

Esta característica torna sua composição vantajosa, uma vez que deve levar a um incremento de resistência mecânica que pode ser atribuído a água ainda livre no sistema devido à redução de absorção de água pela fibra, permitindo a hidratação do cimento ao longo dos 28 dias (Savastano, 1992).

Os resultados em relação a absorção de água podem ser observados na Tabela 3 em uma adaptação ao gráfico apresentado por Caixeta Silva *et al.* (2024) em seu artigo.

Tabela 3 - Absorção de água do compósito cimentício com diferentes tratamentos e dosagens para a fibra da palha de milho

Autor	Tipo de fibra	Tratamento	Dosagem	Formato	Unidade	Resultado (%)
Caixeta Silva <i>et al</i>	N/A	N/A	N/A	N/A	Absorção de água	16,0
	Palha de milho	N/A	2,5	Cúbico	Absorção de água	15,9
	Palha de milho	N/A	5	Cúbico	Absorção de água	17,3
	<b>Palha de milho</b>	<b><math>\text{Ca(OH)}_2</math></b>	<b>2,5</b>	<b>Cúbico</b>	<b>Absorção de água</b>	<b>7,6</b>
	<b>Palha de milho</b>	<b><math>\text{Ca(OH)}_2</math></b>	<b>5</b>	<b>Cúbico</b>	<b>Absorção de água</b>	<b>7,9</b>
	Palha de milho	NaOH	2,5	Cúbico	Absorção de água	15,5
	Palha de milho	NaOH	5	Cúbico	Absorção de água	15,3

Fonte: Adaptado de Caixeta Silva *et al.* (2024).

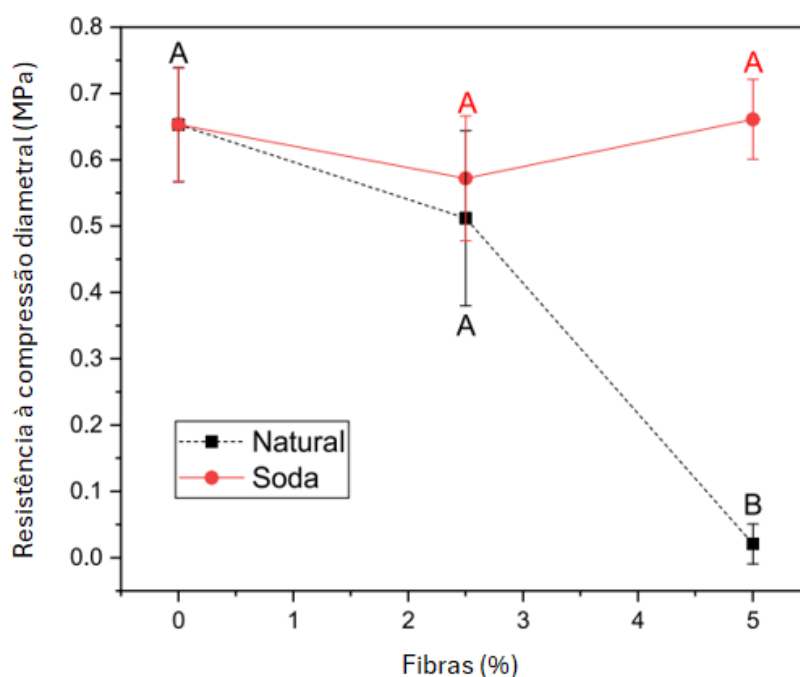
De maneira semelhante, o tratamento com  $\text{Ca(OH)}_2$  apresentou resultados positivos. Esse tratamento cria uma camada mineral na fibra, capaz de aumentar a rugosidade da superfície da fibra, melhorando sua adesão com o cimento e reduzir sua capacidade de absorção de água, diminuindo problemas com umidade, aumentando sua durabilidade e falta de hidratação do cimento (Zukowski e dos Santos, 2018).

## 2.4. VARIAÇÃO QUANTO A DOSAGEM DA FIBRA

No trabalho de Aquino (2022), foram utilizadas diferentes dosagens de fibra com e sem o tratamento de NaOH e avaliada a resistência à compressão do compósito cimentício. As quantidades utilizadas foram 0; 2,5 e 5% de fibra em relação ao Cimento Portland.

Para as fibras sem tratamento, houve uma queda de desempenho crescente ao aumentar a quantidade de fibras, já para as fibras com tratamento, a utilização de 2,5% de fibras apresentou uma redução de sua resistência à compressão, em comparação a um leve aumento para 5%, conforme aponta a Figura 5.

Figura 5 - Resistência à compressão diametral de compósitos cimentícios com fibras de palha de milho



Fonte: Adaptado de Aquino (2022).

Outros autores como Marvila (2021) e Niu e Kim (2022) realizaram ensaios semelhantes com fibras naturais e diferentes dosagens, onde observou-se que quanto maior o percentual de fibras no compósito, maior a tendência de

perda de resistência à compressão, já que a principal função das fibras se direciona a diminuição das tensões devido à tração (Figueiredo, 2022).

Diante da ampla variedade de estudos e resultados discutidos na literatura, percebe-se que a utilização de fibras naturais como reforço em compósitos cimentícios representa uma estratégia promissora para aprimorar o desempenho mecânico e a durabilidade dos compósitos.

No entanto, ainda são necessários mais estudos para entender como diferentes tipos de tratamento e teores de adição influenciam, de forma prática, nas propriedades de compósitos cimentícios.

Assim, este trabalho busca contribuir com essa compreensão, avaliando o comportamento da fibra de palha de milho tratada com agentes alcalinos quando incorporada a compósitos cimentícios, com o objetivo de aprimorar suas propriedades e ampliar seu potencial de uso na construção civil.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

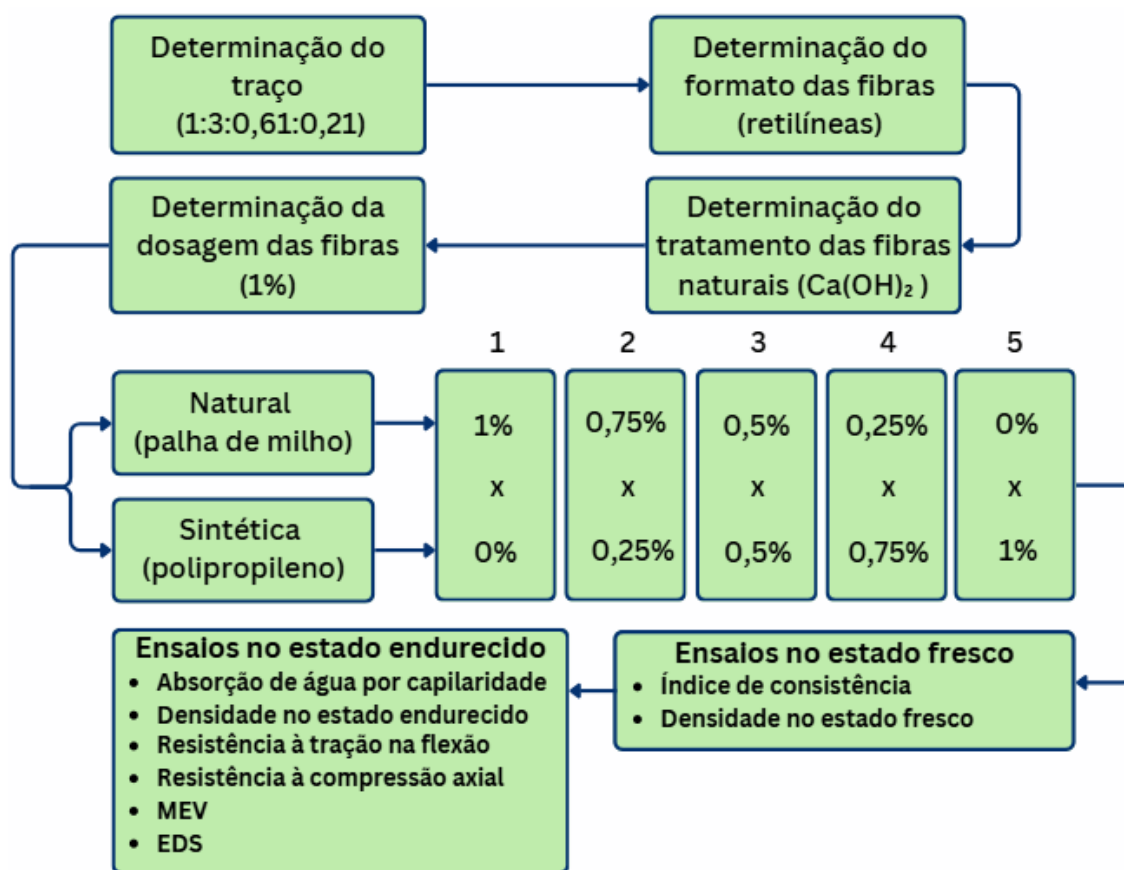
Neste capítulo, serão apresentados os materiais empregados na pesquisa, bem como os procedimentos adotados para preparação, moldagem e ensaio dos corpos de provas as etapas experimentais, os parâmetros utilizados e as técnicas de caracterização aplicadas. Essas informações garantem a reprodutibilidade e a clareza metodológica do estudo.

#### **3.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Investigar o comportamento mecânico de compósitos cimentícios com adição de fibras demanda a escolha de um método específico que assegure a obtenção de dados consistentes e precisos.

Dessa forma, com base no objetivo traçado, foi estruturado o procedimento metodológico da pesquisa ilustrado na Figura 6, juntamente com a organização sequencial das etapas do estudo.

Figura 6 - Programa experimental



Fonte: Autor (2025).

### 3.1.1. Variáveis de resposta

O programa experimental foi elaborado com o propósito de atender aos objetivos da pesquisa, que consistem no desenvolvimento de um compósito cimentício incorporando fibras naturais de palha de milho submetidas a dois tipos de tratamento. A intenção é obter um material com bom desempenho mecânico, melhora na trabalhabilidade, aliados a resistência a fissurações. As variáveis de resposta consideradas neste estudo são:

- consistência no estado fresco;
- densidade nos estados fresco e endurecido;
- absorção de água por capilaridade aos 28 dias;
- resistência à compressão axial aos 7, 28 e 42 dias;
- resistência à tração na flexão aos 7, 28 e 42 dias.

### 3.1.2. Variáveis de controle

A partir das variáveis de resposta definidas, foram estabelecidas variáveis de controle afim de garantir resultados confiáveis.

- a) aplicação de fibras naturais e sintéticas na proporção de 1% em relação ao volume do compósito;
- b) foram utilizados os mesmos lotes de materiais secos, fibras e aditivos na composição de todos os traços;
- c) a desforma dos corpos de prova ocorreram 24h após a moldagem para todos os traços.

### 3.2. MATERIAIS

A escolha e procedência dos materiais tem papel fundamental para o desempenho do compósito cimentício e resultados finais, devendo ser selecionados com a exigência de atenderem as especificações normativas da ABNT, gerando um controle que se assemelhe aos resultados bibliográficos já apresentados.

Os materiais empregados na produção do compósito cimentício com adição de fibras foram fornecidos pelo Laboratório de Tecnologia Construtiva (LBTEC), da Universidade de Caxias do Sul (UCS).

Os materiais utilizados no durante este trabalho foram divididos em 5 categorias: cimento, agregado miúdo, água e fibras, abordando dentro desses tópicos a caracterização dos materiais bem como os tratamentos utilizados para o beneficiamento das fibras.

### 3.2.1. Cimento

O cimento empregado no desenvolvimento desta pesquisa é do tipo II, escolhido por possuir baixa quantidade de adições minerais e por oferecer alta resistência inicial.

Os requisitos químicos desse cimento, de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Requisitos químicos do cimento Portland estabelecidos pela NBR 16697 (expresso em porcentagem de massa)

<b>Requisitos</b>	<b>Limites NBR 16697 (ABNT, 2018)</b>
Resíduo insolúvel (RI)	≤ 3,5
Perda ao fogo (PF)	≤ 12,0
Óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,5
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	≤ 4,5

Fonte: Adaptado de ABNT (2018).

A Tabela 5, apresenta os requisitos físicos exigidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 5 - Requisitos físicos e mecânicos do cimento Portland estabelecidos pela NBR 16697.

<b>Requisitos</b>	<b>Limites NBR 16697 (ABNT, 2018)</b>
Finura % retido na peneira 0,075 mm	≤ 6,0
Tempo de início de pega (min)	≥ 60
Expansibilidade a quente (mm)	≤ 5,0
Resistência à compressão em 1 dia (MPa)	≥ 14,0
Resistência à compressão em 3 dias (MPa)	≥ 24,0
Resistência à compressão em 7 dias (MPa)	≥ 34,0
Resistência à compressão em 28 dias (MPa)	-

Fonte: Adaptado de ABNT (2018).

O cimento CP II é amplamente utilizado em testes laboratoriais devido às suas características de alta pureza e rápida obtenção de resistência inicial. Por possuir baixo teor de adições minerais, garante maior estabilidade nos ensaios, reduzindo interferências nos resultados. Além disso, sua elevada reatividade permite avaliar com maior precisão o comportamento de materiais e aditivos em idades iniciais, tornando-se ideal para pesquisas e desenvolvimento de testes com fibras e estudos de desempenho.

A Tabela 6, apresenta as especificações químicas e físicas disponibilizadas pelo fabricante do CP-II-F-40.

Tabela 6 - Especificações do CP II-F-40

Químicos									
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Perda Fogo	CaO Livre	Resíduo Insol.	Equiv. Alcalino
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
4,49	17,19	2,77	60,8	3,81	3,04	5,63	1,95	1,24	0,61
Físicos									
Exp. Quente	Tempo de Pega		Cons. Normal	Resistência à Compressão					
	Início	Fim		1 dia	3 dias	7 dias	28 dias		
mm	min	min	%	MPa	MPa	MPa	MPa		
0,3	197	246	28,3	25,7	39	44,4	51,3		

Fonte: Autor (2025).

### 3.2.2. Cinza da casca do arroz

A cinza da casca do arroz (CCA) atua como um aditivo mineral que introduz melhoras significativas no compósito cimentício.

De acordo com Siddique e Khan (2011), o uso da cinza da casca do arroz como pozolana no concreto e no cimento apresentam incrementos positivos no compósito, como: aumento de resistência e durabilidade, reaproveitamento de resíduos, bem como a redução das emissões de dióxido de carbono na atmosfera devido a diminuição do uso do cimento.

Segundo o estudo de Cecconello (2013), a incorporação de CCA em concretos também foi responsável por reduzir a porosidade do compósito todos

os traços ensaiados em sua pesquisa, reduzindo sua permeabilidade e contribuindo para uma maior resistência a ataques químicos e à corrosão.

### **3.2.3. Agregado miúdo**

O agregado miúdo utilizado na produção dos compósitos cimentícios reforçados com fibras possui origem quartzosa, sendo extraída de jazidas localizadas na região do Rio Jacuí, no estado do Rio Grande do Sul. Para garantir maior precisão na dosagem, o material foi submetido a secagem em estufa no laboratório, evitando que sua umidade influenciasse na relação água/cimento do traço.

A determinação da granulometria do agregado miúdo foi realizada de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022), que especifica parâmetros para o ensaio.

Após coletado, o material foi seco em estufa à temperatura de  $(105 \pm 5)$  °C até massa constante e separado em duas amostras para serem submetidas as peneiras com abertura da série normal.

De acordo com o material passante e retido nas peneiras, foi possível reunir os resultados da amostragem e garantir que o agregado miúdo utilizado atenda os parâmetros estabelecidos pela NBR 7211 (2005).

A NBR 7211 estabelece valores os quais a porcentagem de material retido na peneira deve estar compreendida para que atenda os parâmetros ótimos e utilizáveis para avaliar a possibilidade de utilização desse agregado em compósitos cimentícios.

Na Tabela 7 estão reunidos os resultados do ensaio de granulometria do agregado utilizado ao longo dos ensaios.

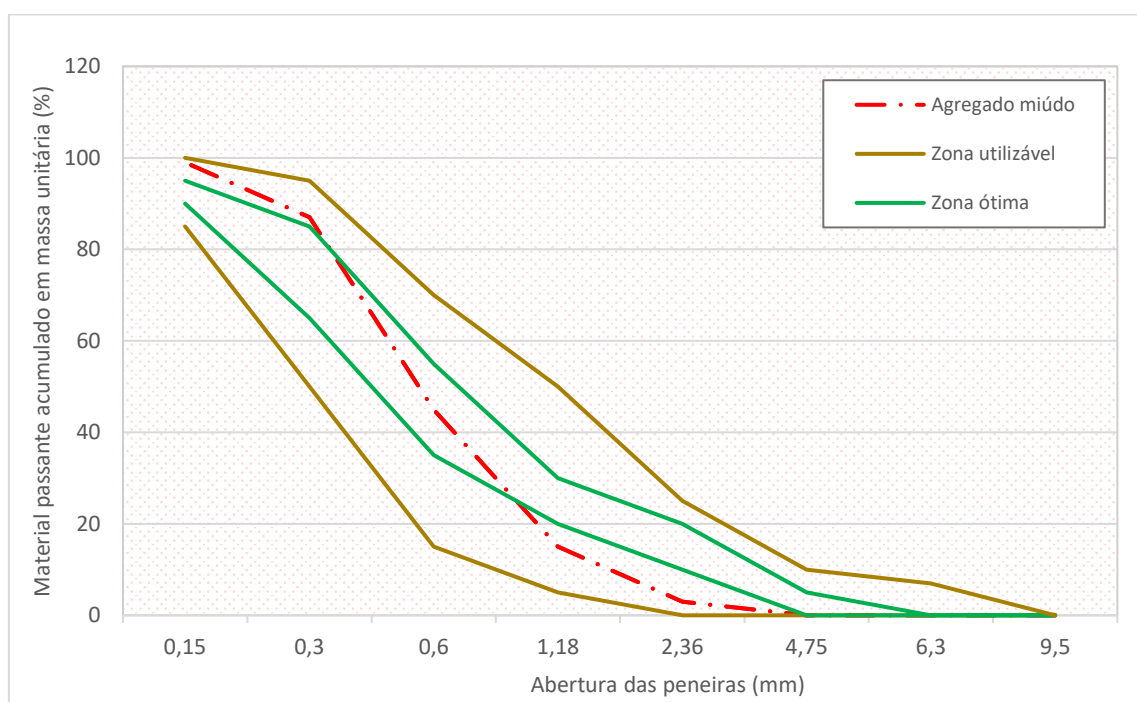
Tabela 7 - Resultados do ensaio de granulometria do agregado miúdo

Peneira (mm)	% Retido	% Acumulado	% Passante
4,75	0	0	100
2,36	3	3	97
1,18	12	15	85
0,60	30	45	55
0,30	42	87	13
0,15	11	99	1
<0,15	1	100	0

Fonte: Autor (2025).

A Figura 7 ilustra a curva granulométrica do agregado miúdo e como ele se enquadra dentro das zonas utilizáveis e ótimas em cada uma das aberturas de peneiras.

Figura 7 - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autor (2025).

### **3.2.4. Água**

A água empregada no compósito cimentício foi fornecida pelo Serviço Municipal de Água e Esgoto (SAMAE), órgão responsável pelo tratamento e pela distribuição de água no município de Caxias do Sul.

### **3.2.5. Superplastificante**

O aditivo superplastificante utilizado foi o Sika ViscoCrete - 100 HE, fornecido pela Concreteira Caxiense em forma de doação para o LBTEC para ser utilizado na presente pesquisa e em trabalhos futuros.

Dentre suas características principais estão: o tempo de pega acelerada de alta resistência inicial e melhoria no tempo de trabalhabilidade, com uso indicado para indústria de pré-fabricados, concretos de alta resistência inicial, concreto de alto desempenho (CAD) e concreto autoadensável (CAA), sendo seu uso indicado para cimentos com baixo teor de adição, como o caso do CP-II, o mesmo utilizado no escopo deste trabalho.

### **3.2.6. Fibra natural**

Tendo em vista os benefícios observados no uso de fibras vegetais em compósitos cimentícios, especialmente no que se refere à melhora do desempenho mecânico, esta pesquisa adotou como alternativa sustentável a fibra oriunda da palha do milho. A palha utilizada tem como finalidade principal a utilização em cestas decorativas, com seu formato oriundo do fornecedor em tiras de cerca de 50 cm

De acordo com Islam e Ahmed (2018), fibras naturais com comprimentos entre 10 a 20 mm apresentam resultados benéficos quanto a adesão da fibra com a matriz cimentícia. Para este estudo a palha foi segmentada em comprimentos de 20 mm para a realização dos ensaios, podendo variar de 15 a 30 mm, por ser um processo de recorte manual em grande escala.

Após o recorte, a fibra foi submetida ao tratamento químico em béqueres de vidro com capacidade de 2 L, contendo soluções preparadas com 10% de

$\text{Ca(OH)}_2$  com concentração de 5% dissolvidos em 1,5 L de água, método o qual Aquino *et al.* (2022) obteve seus melhores resultados. O objetivo foi a busca pela melhoria da interação da fibra com a matriz cimentícia.

As fibras de palha de milho foram imersas na solução e agitadas manualmente com o auxílio de uma espátula por aproximadamente 10 minutos, garantindo o contato uniforme com o agente alcalino. Após esse período, as fibras foram transferidas para um recipiente apropriado, onde foram lavadas em água corrente para a completa remoção do excesso de reagente.

A Figura 8, apresenta os frascos com  $\text{Ca(OH)}_2$  e as fibras durante o seu tratamento.

Figura 8 - Tratamento das fibras de palha de milho com  $\text{Ca(OH)}_2$ .



Fonte: Autor (2025).

Por fim, as fibras foram colocadas em estufa para secagem em temperatura controlada de 40 °C por 24 horas, pois de acordo com Bledzeki e Gassan (1999), temperaturas acima de 100°C podem levar a degradação térmica de componentes celulósicos, comprometendo as propriedades mecânicas da fibra e colapso das paredes celulares.

A Figura 9, apresenta o processo de recorte e tratamento das fibras, as quais foram recortadas manualmente com uma tesoura e tratadas conforme roteiro já apresentado.

Figura 9 - Preparação das fibras

(a) Fibra fatiada em tiras; (b) Fibra após recorte e (c) Fibra após tratamento.



(a)

(b)

(c)

Fonte: Autor (2025).

Após a conclusão dos processos descritos, foi realizada a caracterização da massa específica das fibras tratadas e segregadas, utilizando uma balança de precisão e um frasco de Le Chatelier.

O ensaio consiste na pesagem do frasco com água e marcação de uma medida em mililitros apresentada no frasco, após, é inserido uma quantidade de fibras com massa conhecida, de modo com que fiquem imersas na água em sua totalidade.

Foi necessário aguardar em torno de 24h para realizar a medição final, pois as bolhas de ar existentes na fibra e no frasco, pode apresentar discrepância entre os valores medidos.

Os procedimentos estão apresentados na Figura 10.

Figura 10 - Ensaio da massa específica da fibra



Fonte: Autor (2025).

A partir do ensaio, é possível obter o volume de fibras inserido, representado pela quantidade de mililitros movimentados no frasco em razão da massa (já conhecida através de pesagem anterior).

Os valores de massa específica obtidos foram calculados com base na Equação 1:

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

Onde:

$\rho$  = Massa específica da fibra, em gramas por centímetros cúbicos ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$V$  = Volume deslocado pela massa, em centímetros cúbicos ( $\text{cm}^3$ );

$m$  = Massa da amostra de fibra, em gramas (g).

A partir deste ensaio, foi possível determinar o valor da massa específica da fibra natural da palha de milho coletada, cujo valor obtido foi de aproximadamente  $0,78 \text{ g}/\text{cm}^3$ , como demonstra a Tabela 8.

Tabela 8 - Massa específica da fibra de palha de milho

Medição	Fibra (g)	Marcação inicial do frasco (cm <sup>3</sup> )	Marcação final do frasco (cm <sup>3</sup> )	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
1	1,3	18	19,7	<b>0,765</b>
2	1,5	18	19,9	<b>0,789</b>
<b>Média</b>				<b>0,777</b>
<b>Desvio padrão</b>				<b>0,018</b>

Fonte: Autor (2025).

### 3.2.7. Fibra sintética

A fibra sintética escolhida para ser utilizada no compósito foi a ADFIL SINTA®PP 12, uma microfibrila de polipropileno que melhora a resistência do compósito cimentício, evitando fissuras e dilatações.

Suas características principais são a resistência a flexões e impactos, proporcionando maior durabilidade e impermeabilização.

A fibra sintética em questão está ilustrada na Figura 11.

Figura 11 - Fibra sintética de polipropileno



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 9 apresenta as especificações do material de acordo com o fabricante.

Tabela 9 - Propriedades físicas da fibra de polipropileno

<b>Propriedades físicas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Resultado</b>
Diâmetro do filamento	µm	18
Comprimento	mm	12
Resistência à tração	MPa	544
Aspecto/cor	-	Incolor
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	0,91
Título	dtex	3

Fonte: Adaptado de Saint-Gobain (2025).

### 3.3. MÉTODOS

A metodologia adotada nesta pesquisa foi estruturada para possibilitar uma análise comparativa de um compósito cimentício com adição de fibras da palha do milho tratadas com soluções alcalinas combinadas com fibras sintéticas de polipropileno. O foco principal é avaliar o comportamento mecânico e a trabalhabilidade das misturas, considerando diferentes dosagens e tipos de fibra.

#### 3.3.1. Compósitos cimentícios

Os compósitos cimentícios produzidos neste estudo foram formulados com base em proporções usuais para concretos, tendo como referência traços apresentados em referências bibliográficas de estudos semelhantes afim de aprimorar estudos já realizados.

Os traços utilizados foram escolhidos de modo a manter uma consistência adequada para utilização, com proporções fixas de aglomerante, agregado miúdo e água, sendo a variável principal as diferentes dosagens das fibras.

Os ensaios priorizarão a busca por melhores resultados visando seu aproveitamento em concretos e à exigência de propriedades como adesão, trabalhabilidade e resistência à fissuração.

### 3.3.2. Composição das misturas

Serão testados compósitos cimentícios com a incorporação de fibras de palha de milho tratadas com  $\text{Ca(OH)}_2$  e fibras sintéticas de polipropileno em concentração de 1% em relação ao volume do compósito.

A concentração de fibras total do compósito permanecerá sempre em 1% (com exceção do traço de referência), variando de 0 à 1% as proporções de fibras naturais e sintéticas para que se possa avaliar a variação dos resultados a partir da adição e subtração de diferentes tipos de fibras.

A Tabela 10 apresenta as combinações a serem ensaiadas. As fibras naturais de palha de milho foram intituladas “fibras M” enquanto as fibras sintéticas de polipropileno foram chamadas de “fibras PP” para facilitar a catalogação.

Tabela 10 - Combinações a serem ensaiadas

<b>Tipo de fibra</b>	<b>Concentração de fibras M</b>	<b>Concentração de fibras PP</b>	<b>Código do traço</b>
Palha de milho	1,00%	0,00%	1M
Palha de milho + Polipropileno	0,75%	0,25%	0,75M x 0,25PP
Palha de milho + Polipropileno	0,50%	0,50%	0,5M x 0,5PP
Palha de milho + Polipropileno	0,25%	0,75%	0,25M x 0,75PP
Polipropileno	0,00%	1,00%	1PP
Sem fibra	-	-	REF

Fonte: Autor (2025).

Para realizar a escolha do traço abordado nesta pesquisa, foram reunidos os parâmetros e resultados obtidos por autores referenciados ao longo deste trabalho, para que se possa selecionar um traço que condiz com os objetivos buscados pelo autor.

Os traços referenciados foram reunidos na Tabela 11.

Tabela 11 - Traços de Referência

<b>Autor</b>	<b>Materiais</b>	<b>Proporção em massa</b>	<b>Traço</b>
Aquino <i>et al.</i> (2022)	Cimento	1	1:1:6:1,55
	Cal	1	
	Agregado miúdo	6	
	Água	1,55	
Caixeta Silva <i>et al.</i> (2024)	Cimento	1	1:1:6:1,55
	Cal	1	
	Agregado miúdo	6	
	Água	1,55	
Azevedo (2021)	Cimento	1	1:3:0,35:0,3
	Agregado miúdo	3	
	Água	0,35	
	Superpastificante	0,3	
Fidelis (2024)	Cimento	1	1:1:0,4
	Agregado miúdo	1	
	Água	0,4	
Cecconello (2024)	Cimento	1	1:1:0,35:0,69
	Agregado miúdo	1	
	Água	0,35	
	Superpastificante	0,69	
Pinto (2019)	Cimento	1	1:3:0,61:0,9
	Agregado miúdo	3	
	Água	0,61	
	Superpastificante	0,9	

Fonte: Autor (2025).

A partir da análise dos traços utilizados pelos autores citados na Tabela 11, foi escolhido um traço semelhante ao de Pinto (2019), o qual pode ser observado na Tabela 12.

É válido ressaltar que a proporção de cimento utilizada por Pinto (2019) será apresentada como “aglomerante” na Tabela 12 devido a substituição parcial

do cimento por cinza da casca de arroz (substituição equivalente a 30% da massa total de cimento).

Tabela 12 - Traço utilizado na pesquisa

<b>Materiais</b>	<b>Proporções em massa</b>	<b>Traço</b>
Aglomerante	1	1:3:0,61:0,21
Agregado miúdo	3	
Água	0,61	
Superplastificante	0,21	

Fonte: Autor (2025).

O traço de Pinto (2019) foi escolhido a partir da verificação de resultados positivos obtidos pela autora, com o objetivo de avaliar o desempenho do compósito com outro tipo de fibra natural.

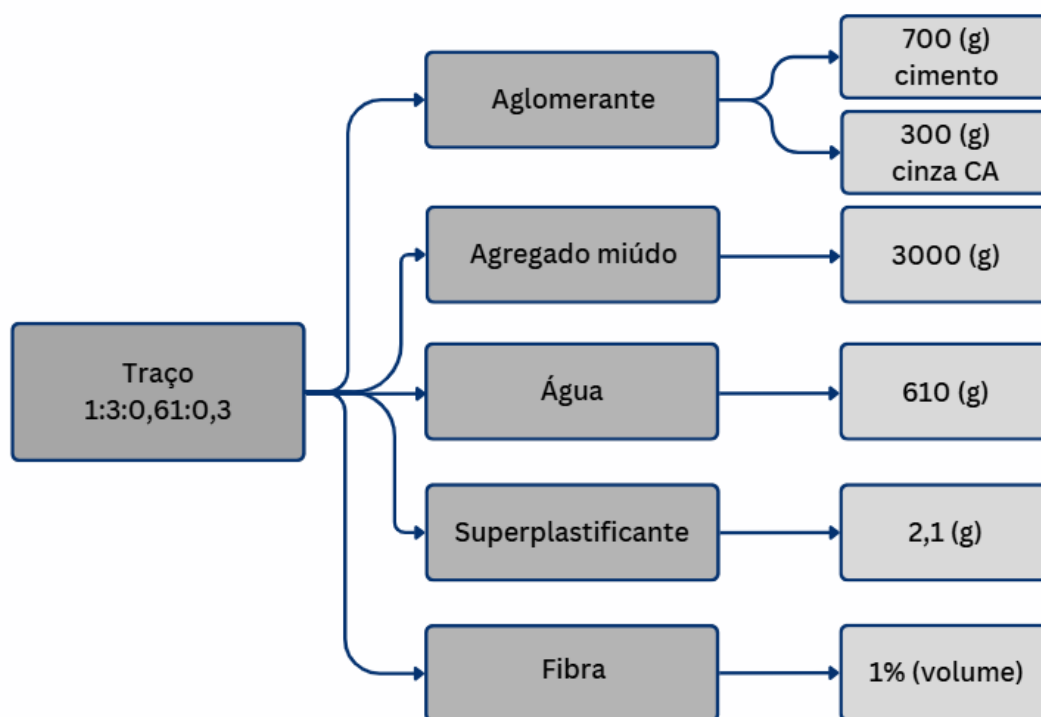
Optou-se por fixar a quantidade de aditivo em 0,21% em relação ao aglomerante com o objetivo de obter-se um índice de consistência entre  $270 \pm 10$  mm para o traço de referência.

Segundo Cecconello (2024), a relação água/aglomerante (a/a) e o teor de aditivo superplastificante devem ser estabelecidos na mistura de referência, tendo como critério principal a trabalhabilidade do traço.

A quantidade de água da mistura foi dosada em relação ao aglomerante (cimento + cinza da casca do arroz), bem quanto a quantidade de aditivo.

A Figura 12 apresenta a seleção dos materiais utilizados, bem como suas respectivas dosagens, exemplificando uma produção com 3 quilos de materiais secos. A ilustração visa demonstrar de forma clara a quantificação de materiais para a dosagem da mistura.

Figura 12 - Dosagem para um compósito cimentício com adição de fibras



Fonte: Autor (2025).

### 3.3.3. Ensaios de composição do compósito cimentício no estado fresco

Os ensaios realizados no estado fresco abrangem desde a caracterização dos materiais que compõem o compósito cimentício até a análise de sua trabalhabilidade e homogeneidade. Para essa etapa, foram conduzidos dois ensaios principais: o ensaio de consistência, por meio do índice de consistência, e o ensaio de densidade no estado fresco.

Durante a realização dos ensaios, será realizada a listagem de materiais necessários para a realização dos ensaios nos estados fresco e endurecido, de modo a facilitar a manipulação dos mesmos durante o período

#### 3.3.3.1 Ensaio de índice de consistência

Os ensaios de índice de consistência foram realizados conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 13276 (ABNT, 2016), abrangendo tanto a traço de referência, quanto compósitos com incorporação de fibras naturais.

O índice de consistência de cada composição foi determinado a partir da média aritmética das medições dos diâmetros de espalhamento, obtidas por meio do ensaio de mesa de consistência.

O molde troncônico foi posicionado no centro da mesa de índice de consistência e preenchido com a mistura, formando três camadas iguais, realizando golpes com o soquete metálico da seguinte forma: primeira camada, 15 golpes, segunda camada, 10 golpes e terceira camada, 5 golpes.

Após a retirada do cone, foram realizadas 30 quedas da mesa de índice de consistência em 30 segundos, e realizadas três medidas diametrais do espalhamento do compósito cimentício com uma régua metálica, para obter-se o índice do espalhamento através de uma média dos valores obtidos.

A Figura 13 representa alguns passos do ensaio de consistência do compósito cimentício.

Figura 13 - Ensaio de índice de consistência



Fonte: Autor (2025).

### 3.3.3.2 Ensaio de densidade no estado fresco

A densidade no estado fresco permite avaliar a homogeneidade da mistura e o controle da proporção entre os materiais. É um parâmetro útil para determinar a massa por unidade de volume do compósito cimentício, indicando sua compactidade. Valores consistentes indicam boa repetibilidade e eficiência

na produção. O procedimento é realizado conforme a NBR 13278 (ABNT, 2022) para compósitos cimentícios.

Para a realização do ensaio, foi medido e pesado um recipiente cilíndrico com volume conhecido e preenchido com a mistura fresca e tampado com uma chapa acrílica, garantindo que não haja bolhas de ar em sua superfície, assim, é realizada uma nova pesagem.

A Figura 14, demonstra a execução do ensaio.

Figura 14 - Ensaio de densidade no estado fresco



Fonte: Autor (2025).

Realizado o procedimento, a determinação da densidade do compósito cimentício no estado fresco, pode ser obtido através da Equação 2.

$$d = \frac{mc - mv}{vr} \quad (2)$$

Onde:

$d$  = densidade no estado fresco, em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$mc$  = massa do recipiente cilíndrico, em gramas (g);

$m_v$  = massa do recipiente cilíndrico vazio, em gramas (g);

$v_r$  = volume do recipiente cilíndrico, em centímetros cúbicos (cm<sup>3</sup>).

### **3.3.4. Ensaio de composição do compósito cimentício no estado endurecido**

Os ensaios realizados no estado endurecido têm como objetivo avaliar o desempenho e as propriedades mecânicas e físicas do compósito cimentício após o processo de cura.

Nessa etapa, são analisadas características como resistência, densidade e absorção de água, que indicam a qualidade e durabilidade do material. Para essa fase, foram conduzidos os seguintes ensaios: resistência à compressão, resistência à flexão, determinação da densidade no estado endurecido e absorção por capilaridade.

#### **3.3.4.1 Ensaio de absorção de água por capilaridade**

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado com o objetivo de avaliar a porosidade e o comportamento do compósito cimentício frente à penetração de umidade aos 28 dias, conforme orientações da NBR 9779 (ABNT, 2012).

A metodologia consiste na imersão parcial dos corpos de prova em água, com a superfície de base em contato direto com o líquido, permitindo a ascensão capilar por um período determinado. A quantidade de água absorvida é calculada a partir da variação de massa em intervalos regulares, sendo esse parâmetro fundamental para a análise da durabilidade e da permeabilidade do compósito.

Os corpos-de-prova foram posicionados sobre uma grelha dentro de um recipiente com água, de modo com que o nível de água permanecesse constante ( $5 \pm 1$ ) mm, acima da face inferior, evitando a molhagem de outras superfícies e forçando a ascensão da água por capilaridade entre os vazios.

Durante os ensaios, foi determinada a massa do corpo-de-prova seco, permanecer durante 24h em estufa e posteriormente, realizadas pesagens nos

intervalos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas, para que fosse determinada a quantidade de água aderida pelo compósito cimentício.

A Figura 15 apresenta o procedimento do ensaio realizado para determinação da absorção de água por capilaridade.

Figura 15 - Ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Autor (2025).

#### 3.3.4.2 Ensaio de densidade no estado endurecido

A densidade no estado endurecido está relacionada à compacidade do material e à presença de vazios, influenciando diretamente a resistência e a durabilidade. Esse ensaio permite verificar a qualidade do adensamento, sendo um indicativo do desempenho final após o endurecimento. A metodologia empregada segue os critérios estabelecidos pela NBR 9778 (ABNT, 2020) e será realizado aos 28 dias.

Para a realização do ensaio, foram registradas duas medições em cada face do corpo de prova prismático e calculada uma média para cada dimensão (base, altura e comprimento) com a finalidade de obter-se o volume médio do prisma.

Após a medição do corpo-de-prova, foi realizada a sua pesagem e calculada a massa específica do compósito cimentício no estado endurecido a partir da Equação 3:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3)$$

Onde:

$\rho$  = Massa específica, em gramas por centímetro cúbico (g/cm<sup>3</sup>);

$m$  = Massa, em gramas (g);

$v$  = Volume, em centímetros cúbicos (cm<sup>3</sup>).

A Figura 16 ilustra o procedimento de medição do corpo de prova para a execução do ensaio de densidade no estado endurecido

Figura 16 - Ensaio de densidade no estado endurecido



Fonte: Autor (2025).

### 3.3.4.3 Ensaio de resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi conduzido conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005), utilizando o método de carregamento em três pontos para corpos de prova prismáticos. O objetivo é mensurar a capacidade do compósito cimentício em resistir à tração indireta, analisando o comportamento do material frente à formação e propagação de fissuras nas idades de 7, 28 e 42 dias.

Esse ensaio é particularmente relevante para compósitos com adição de fibras, uma vez que a presença das fibras pode contribuir para a redistribuição dos esforços e o aumento da tenacidade, especialmente após o surgimento de microfissuras na matriz cimentícia.

O ensaio consiste no posicionamento dos corpos-de-prova em dois apoios no equipamento, de modo com que a face rasada não fique em contato com os dispositivos de apoio, nem com o dispositivo de carga, sendo assim aplicada uma carga de  $(50 \pm 10)$  N/s até a ruptura do corpo de prova.

A resistência a tração na flexão é calculada segundo a Equação 4:

$$Rf = \frac{1,5 \times Ff \times L}{40^3} \quad (4)$$

Onde:

Rf = Resistência à tração na flexão, em mega Pascals (MPa);

Ff = Carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em Newtons (N);

L = Distância entre os apoios, em milímetros (mm).

Os corpos-de-prova foram submetidos a uma carga crescente em sua parte central, enquanto era apoiado em ambas as extremidades inferiores, realizando uma carga de tração em sua região inferior.

A Figura 17 demonstra o procedimento de realização do ensaio de tração na flexão.

Figura 17 - Ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Autor (2025).

#### 3.3.4.4 Ensaio de resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios foi determinada com base na NBR 13279 (ABNT, 2005), utilizando corpos de prova prismáticos moldados e curados conforme os critérios estabelecidos. O ensaio consiste na aplicação de carga crescente até a ruptura dos corpos de prova, sendo os valores de resistência registrados em diferentes idades: 7, 28 e 42 dias. Esse procedimento permite avaliar o desempenho mecânico do compósito cimentício ao longo do tempo, possibilitando a comparação entre a mistura de referência e as composições com fibras, bem como a influência dos diferentes tratamentos aplicados à fibra da palha do milho.

A norma recomenda que sejam utilizadas as metades das amostras obtidas após o ensaio de tração na flexão, no qual resulta na divisão dos corpos-de-prova em duas partes após o seu rompimento.

O ensaio consiste no posicionamento do corpo-de-prova sob o equipamento de ensaio, de modo que a face rasada não fique em contato com os dispositivos de apoio nem com o dispositivo de carga, aplicando cargas de  $(500 \pm 50)$  N/s até a ruptura do CP.

A resistência a compressão é calculada conforme a Equação 5:

$$Rc = \frac{Fc}{1600} \quad (5)$$

Onde:

Rc = Resistência à compressão, em mega Pascals (MPa);

Fc = Carga máxima aplicada, em Newtons (N).

Após a realização do ensaio de resistência a flexão, os corpos-de-prova foram preparados de modo que não reste nenhum vestígio de material solto proveniente do ensaio anterior e posicionados na prensa para que seja aplicada a carga crescente até seu rompimento.

A Figura 18 apresenta o procedimento de ruptura sendo realizado e um dos corpos-de-prova após o ensaio.

Figura 18 - Ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Autor (2025).

### 3.3.5. Quantitativos de ensaios

A Tabela 13 representa a quantidade corpos de prova prismáticos para os ensaios realizados em compósitos cimentícios no estado endurecido, totalizando 72 moldes.

Tabela 13 - Quantificativo de ensaios realizados

Ensaio Realizado	Compósitos cimentícios com fibras	Compósitos cimentícios sem fibras
Aborção de água por capilaridade (28 dias)	15	3
Resistência à compressão (7, 28 e 42 dias)	45	9
Resistência à tração na flexão (7, 28 e 42 dias)	45	9
Densidade no estado endurecido (28 dias)	15	3
<b>Total</b>	<b>72 CPs</b>	

Fonte: Autor (2025).

Como recomendação da NBR 13279, os ensaios de resistência a flexão e resistência a compressão podem ser realizados utilizando o mesmo corpo de prova, bem como os ensaios de densidade e absorção de água por capilaridade, reduzindo significativamente a quantidade total de corpos de prova necessários.

### **3.3.6. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

A análise microestrutural foi feita utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV), um equipamento bastante utilizado para investigar a superfície de materiais com grande nível de detalhe, permitindo observar aspectos fundamentais a respeito de compósitos com fibras como a dimensão da zona de transição entre agregados e fibras e como esses componentes interagem entre si.

De acordo com Silveira (2007), a resolução elevada proporcionada pelo MEV é fundamental para analisar a estrutura interna de materiais, ajudando a interpretar o comportamento físico e mecânico dos compósitos com mais precisão.

No contexto deste trabalho, foram analisadas amostras dos traços 1M e 1PP, afim de visualizar a diferença de comportamento entre ambas as fibras e possíveis efeitos de degradação provenientes do meio alcalino do compósito.

As micrografias foram obtidas no Laboratório Central de Microscopia (LCMIC) da Universidade de Caxias do Sul (UCS).

### **3.3.7. Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS)**

A Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) é uma técnica utilizada junto ao microscópio eletrônico de varredura para identificar os elementos químicos presentes em materiais, como as fibras e a matriz de cimento.

No escopo do trabalho, foram analisados os traços 1M e 1PP, com o objetivo de analisar diferentes elementos químicos presentes nos traços com maior teor de cada tipo de fibra.

Segundo Silveira (2007), no estudo de compósitos com fibras, a EDS é especialmente útil para analisar a interface entre a fibra e a matriz, observando se há produtos de hidratação aderidos à superfície da fibra ou indícios de reações químicas entre os materiais, principalmente em relação às fibras naturais.

## 4. RESULTADOS

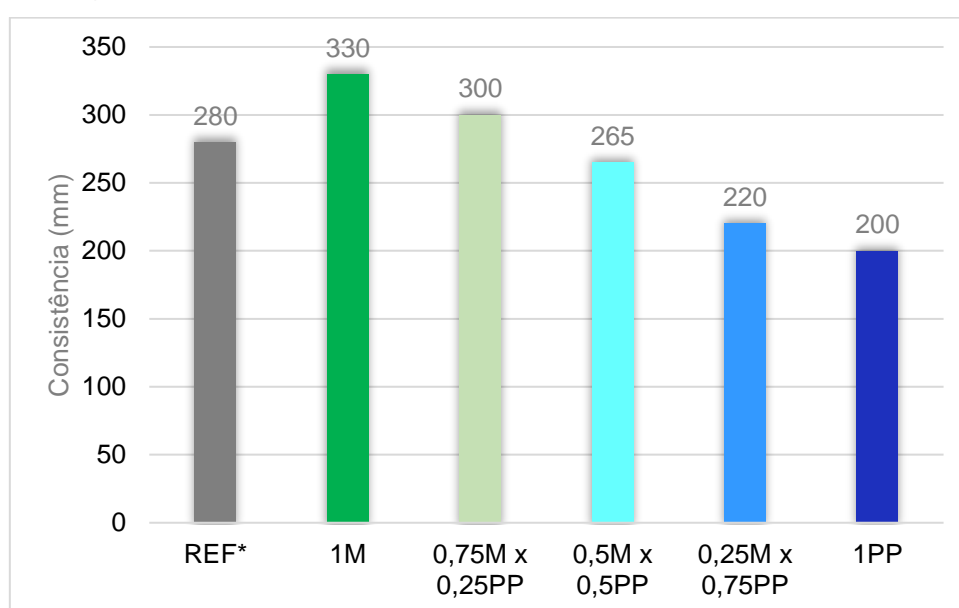
Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios, com o objetivo de avaliar o comportamento dos compósitos cimentícios com fibras com adição de fibras de palha de milho e de polipropileno em diferentes propriedades mecânicas e físicas, analisando parâmetros já citados durante a metodologia.

Os resultados serão apresentados de forma a facilitar a interpretação e correlação com as propriedades esperadas para compósitos cimentícios com fibras reforçadas com fibras.

### 4.1. ENSAIO DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

O ensaio avaliou o espalhamento do compósito cimentício na mesa de consistência, permitindo analisar a fluidez do material com diferentes dosagens de fibras naturais e sintéticas, com o objetivo de avaliar a trabalhabilidade do compósito antes do endurecimento. A Figura 19, aponta os resultados obtidos através do ensaio de índice de consistência.

Figura 19 – Resultados do ensaio de índices de consistência



Fonte: Autor (2025).

É possível observar uma perda na trabalhabilidade do compósito cimentício conforme se aumenta a dosagem de fibra de polipropileno e se diminui a dosagem da fibra de palha de milho, mostrando que essa fibra sintética tende a prejudicar a fluidez do compósito.

Para o traço de referência, optou-se por utilizar 0,21% de aditivo, uma quantidade baixa para que não desempenhasse grande influência no desempenho do compósito cimentício e de modo a obter-se um índice de consistência de  $270 \pm 10$  mm.

A partir da tentativa de moldagem do traço 0,5M x 0,5PP com 0,21% de superplastificante, notou-se que a quantidade de aditivo se mostrou insuficiente, apresentando uma amostra com alto índice de vazios, fazendo com que o resultado não apresentasse a confiabilidade desejada.

Para isso, optou-se por aumentar a quantidade para 0,5% de aditivo em relação a quantidade de aglomerante, de modo com que o traço ficasse dentro do índice de consistência obtido para o traço de referência ( $270 \pm 10$  mm), sendo assim, o teor de 0,5% foi padronizado para os demais traços, de modo com que todos apresentassem uma trabalhabilidade entre 200 mm à 330 mm.

O fato do traço com maior teor de fibra de palha de milho possuir um índice de consistência maior do que o traço de referência, reforça as propriedades do aditivo superplastificante, o qual foi utilizado em maior quantidade para todos os traços que demandaram a utilização de fibras.

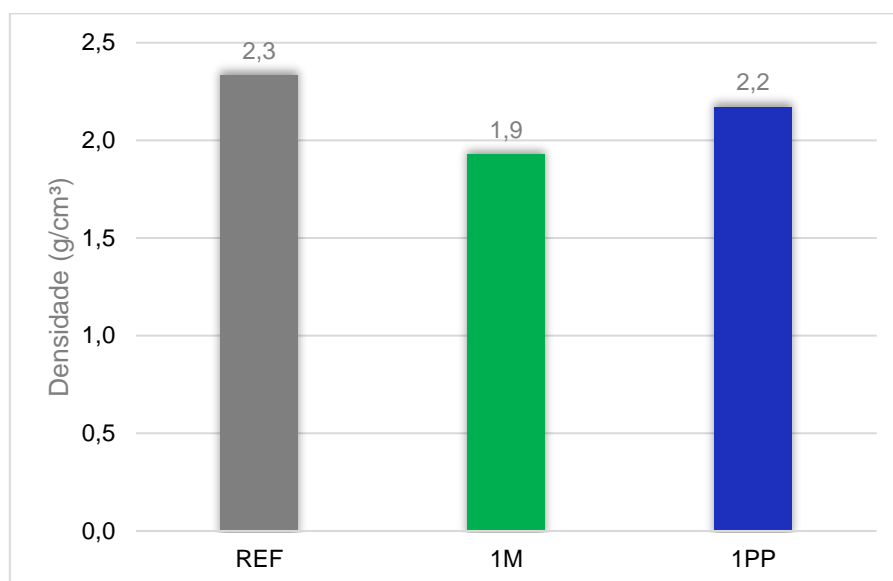
A perda na trabalhabilidade era um resultado esperado, pois conforme Figueiredo e Ceccato (2015), apesar das diversas melhorias nas propriedades mecânicas do concreto endurecido, o uso de fibras reduz a fluidez do material, o que tende a causar um impacto negativo na trabalhabilidade de concretos e argamassas.

As diferentes propriedades geométricas entre as duas fibras utilizadas, explica a variação dos índices de consistência entre os traços com fibras de polipropileno e palha de milho, apesar a quantidade em volume ser igual, já que devido as menores dimensões da fibra de polipropileno, é gerada uma área de superfície maior, causando mais atrito na interface fibra-matriz (Turk, *et. al*, 2018).

## 4.2. ENSAIO DE DENSIDADE NO ESTADO FRESCO

Foi realizado o ensaio de densidade no estado fresco, possibilitando analisar a influência das fibras na densidade do compósito com adições no estado fresco, conforme ilustra a Figura 20.

Figura 20 - Resultados do ensaio de densidade no estado fresco



Fonte: Autor (2025).

A redução de densidade de compósitos reforçados com fibras, é proveniente de um aumento no número de vazios devido a uma propriedade da fibra que tende a permitir bolhas de ar na interface entre a fibra e a matriz.

Devido a maior dimensão da fibra de palha de milho, embora em menores quantidades, os espaços vazios na interface fibra-matriz possibilitam uma maior quantidade de ar acumulado e possibilidade de absorção de água pela própria mistura, facilitando a segregação de partículas.

De acordo com Niu e Kim (2022), a densidade aparente da palha de milho é menor do que a da pasta de cimento; portanto, quando misturadas, se resulta em uma distribuição de massa não uniforme, permitindo a formação de mais bolhas de ar que o traço com fibra de polipropileno.

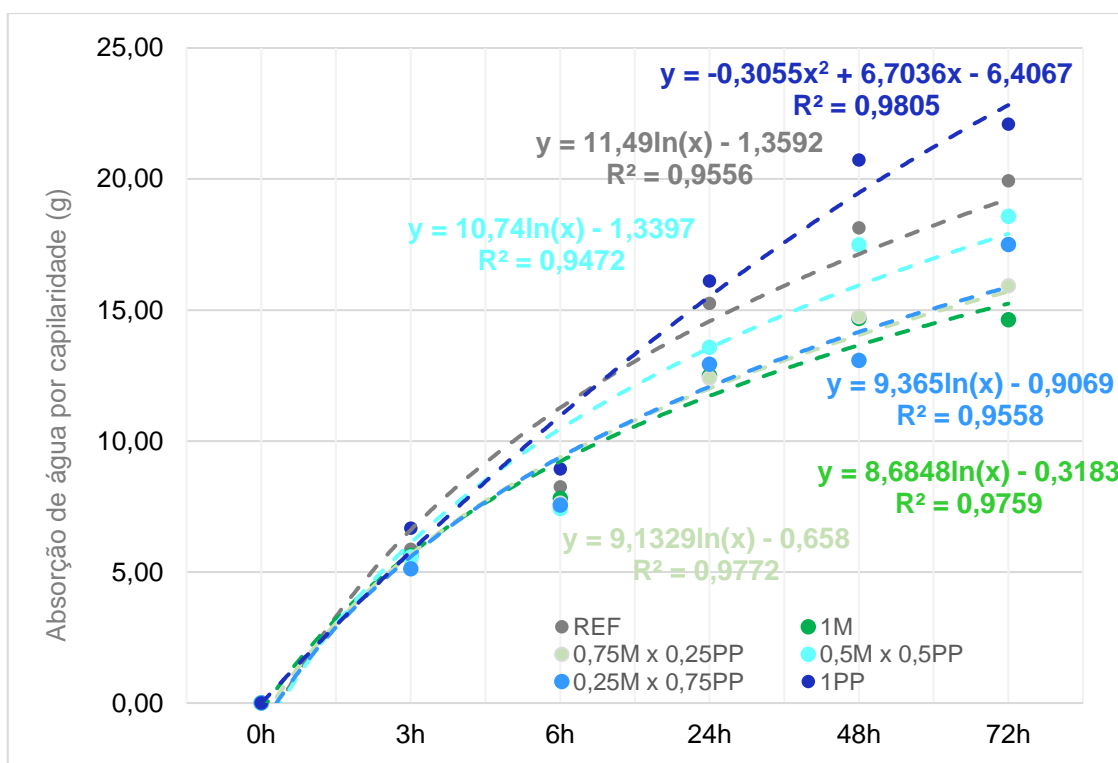
É possível também, observar um comportamento esperado, visto que, conforme já visto ao longo do trabalho, as fibras de palha de milho e

polipropileno, possuem uma densidade mais baixa que o compósito cimentício (0,78 g/cm<sup>3</sup> e 0,91 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente).

#### 4.3. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O Apêndice A aponta os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade, os quais estão representados na Figura 21 para melhor visualização.

Figura 21 - Ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Autor (2025).

Os traços 1PP e REF, obtiveram a maior taxa de absorção de água entre os traços, com 22,1 g e 19,9 g, respectivamente, enquanto o traço 1M, apresentou uma absorção de 14,6 g, seguido dos traços com maior teor de palha de milho.

Os resultados apontam para uma menor taxa de absorção de água por capilaridade para o traço de referência em relação aos traços com maior teor de

fibras de polipropileno, possivelmente devido ao maior número de vazios presentes no traço 1PP e conseqüentemente, levando a incorporação de ar (Oliveira, 2001).

Durante a elaboração dos resultados, foi levantada a hipótese dos traços com maior teor de fibras de palha de milho não estarem completamente secos durante a elaboração dos ensaios, mesmo com o mesmo período de ressecamento dos demais.

Essa hipótese surgiu a partir da observação de que, durante os rompimentos do traço 1M, os corpos de prova possuíam uma quantidade de água superior aos demais traços, devido ao processo de cura submersa e a capacidade de absorção de água pela própria fibra, fazendo com que o tempo de secagem para os traços com maior teor de fibras de palha de milho, devesse ser maior.

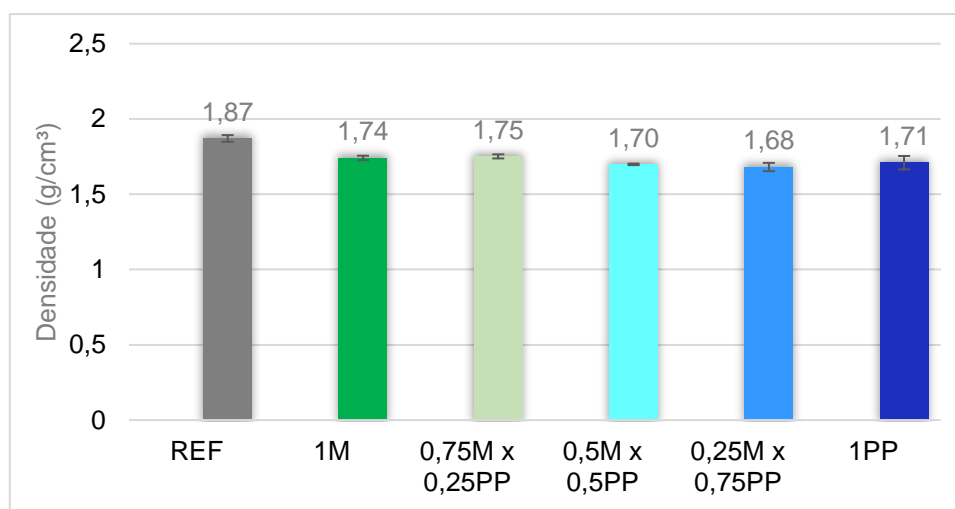
Essa ação, possivelmente faria com que os resultados fossem mais confiáveis, levando a real absorção de água para todos os traços.

#### 4.4. ENSAIO DE DENSIDADE NO ESTADO ENDURECIDO

O ensaio de densidade no estado endurecido foi realizado com o objetivo de analisar a compactação do material e a presença de vazios após o processo de cura.

Os resultados obtidos após o ensaio estão expostos no Apêndice B e estão ilustrados na Figura 22 para melhor visualização dos resultados.

Figura 22 - Ensaio de densidade no estado endurecido



Fonte: Autor (2025).

Os valores de densidade no estado endurecido obtiveram uma variação pouco considerável, principalmente se tratando dos traços com presença de fibras.

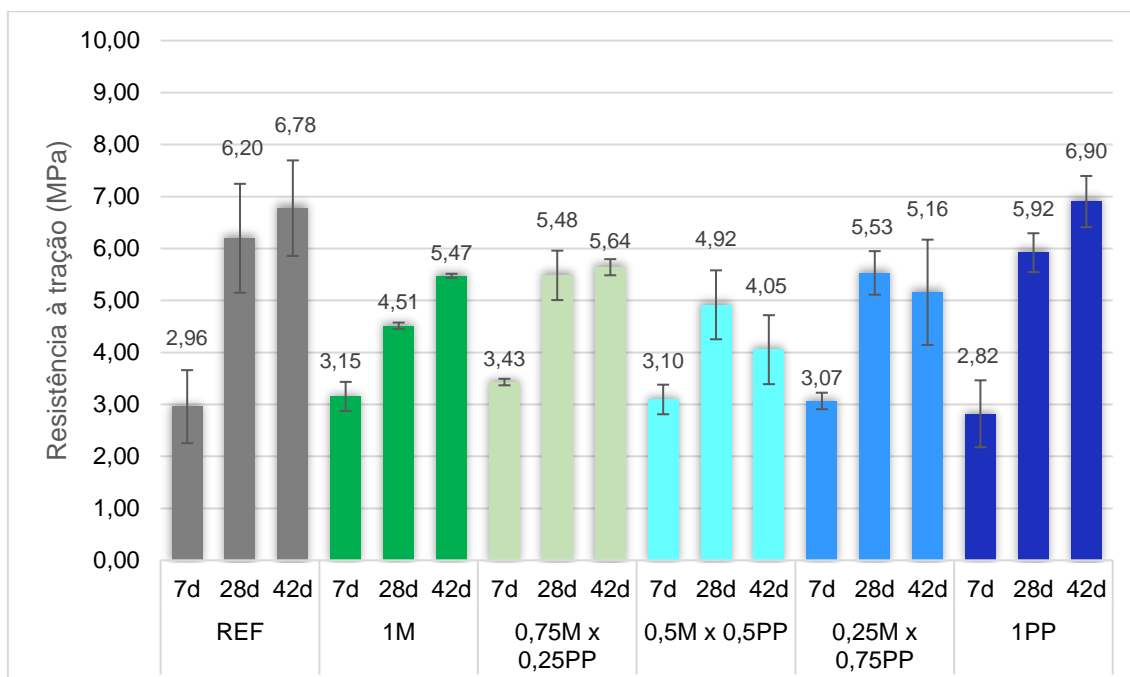
A baixa taxa de variação, indica que todos os traços obtiveram condições de cura uniformes, independentemente do tipo de fibra utilizada, sem perda de umidade e ações de retração, mostrando um bom resultado quando ao processo de cura.

A redução geral de densidade quando comparados os traços no estado fresco e endurecido, é proveniente do processo de hidratação do cimento durante a cura, levando a formação de bolhas de ar, fato que se mostra mais evidente nos traços com a utilização de fibras (Oliveira, 2001).

#### 4.5. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

O Apêndice C, apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão. Para melhor visualização dos resultados, os valores do ensaio de resistência à tração aos 7, 28 e 42 dias podem ser observados na Figura 23.

Figura 23 - Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão aos 7, 28 e 42 dias



Fonte: Autor (2025).

Conforme aponta a Figura 23, é possível observar valores satisfatórios da maioria dos traços com adição de fibras quanto à resistência a tração aos 7 dias em comparação ao traço de referência.

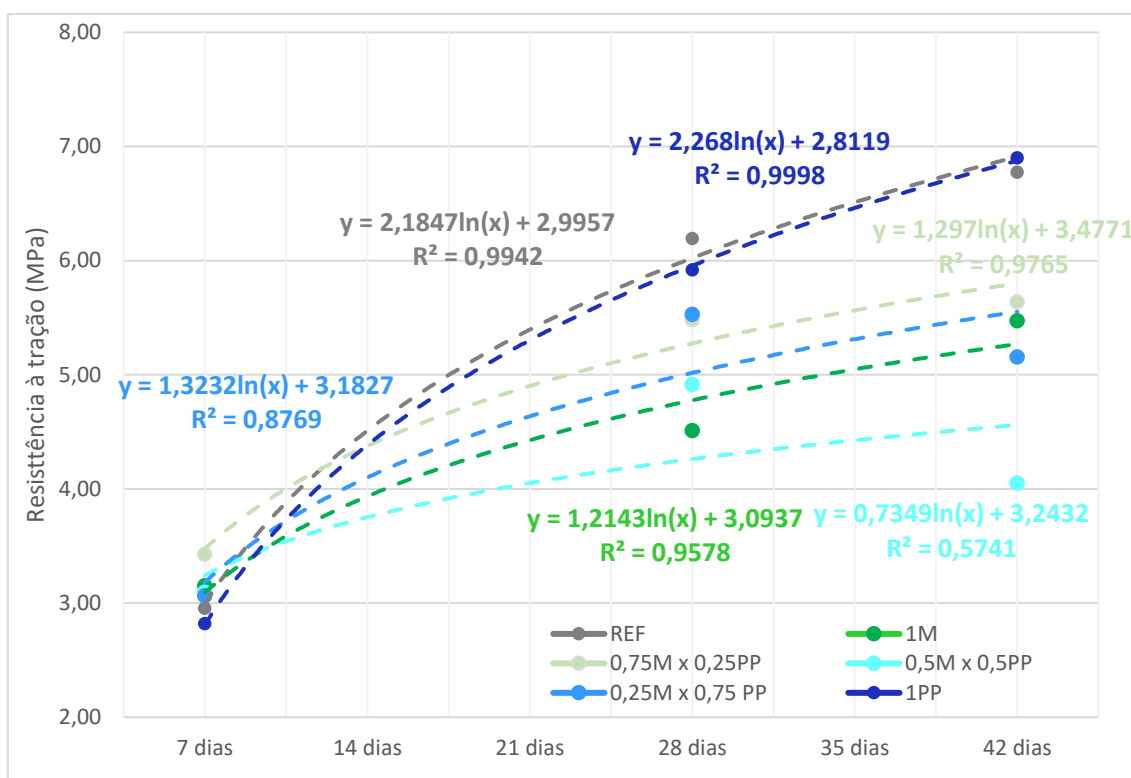
Durante o período de mistura e moldagem, foi possível observar uma dificuldade em chegar a uma consistência próxima ao traço de referência, apresentando uma trabalhabilidade baixa

Apesar do volume de fibras de polipropileno e palha de milho ser o mesmo, as fibras de polipropileno representam um valor maior em quantidade, formando uma mistura com menor fluidez devido a maior área de contato com o compósito cimentício, podendo gerar resultados baixos quanto a resistência à tração na flexão nas primeiras idades.

Embora o traço 1PP tenha apresentado valores mais baixos que os demais aos 7 dias, ele obteve uma evolução consistente ao longo dos dias e apresentando os melhores resultados na idade de 48 dias.

Na Figura 24, os resultados são apresentados em forma de linha de tendência, para melhor visualização de seus resultados à longo prazo.

Figura 24 - Tendência de resultados do ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Autor (2025).

Analisando as linhas de tendência e os valores absolutos, é possível observar que o traço 0,5M x 0,5PP apresentou uma resistência à tração de 4,05 MPa, valores abaixo dos demais traços apresentados, com um desvio considerável em relação as linhas de tendência dos traços 0,75M x 0,25PP, 0,25M x 0,75PP e 1M.

Esse comportamento aponta para uma possível fraca interação entre os dois tipos de fibra, devido a variação de dimensões entre elas, formando pontos de fragilidade no compósito.

Observou-se uma inversão no desempenho das fibras de palha de milho e de polipropileno aos 28 e 42 dias, de modo que o traço 1PP, com maior teor de polipropileno, deixou de apresentar a menor resistência à tração e passou a registrar os maiores valores.

Enquanto isso, os traços com fibras de palha de milho que haviam apresentado resultados melhores que o traço REF, passaram a ter resultados inferiores nas idades de 28 e 42 dias.

Em relação ao arrancamento das fibras, quando as estruturas estavam recebendo tensões próximas ao seu limite, os traços com maior teor de fibras de polipropileno obtiveram uma característica distinta aos traços com maior teor de fibra de palha de milho.

Os traços apresentaram um comportamento interessante quanto à sua ancoragem junto ao compósito, uma vez que, durante os ensaios de resistência à tração, é possível observar a atuação do efeito de ponteamto de fissuras (*crack bridging*), no qual as fibras resistem à separação das partes momentos antes do colapso do corpo de prova (Li, Stang e Krenchel, 1993).

O fenômeno citado pode ser observado na Figura 25, bem como a diferença de comportamento entre as fibras de palha de milho e polipropileno.

Figura 25 - Efeito do ponteamto de fissuras.



Fonte: Autor, 2025.

Esse mecanismo impede que o material frature de forma instantânea, permitindo a percepção da falha antes do completo rompimento, o que é na prática é importante, pois pode evitar acidentes mais graves como o colapso imediato de estruturas ou deslocamento.

O comportamento hidrofóbico da fibra de polipropileno está relacionado à sua estrutura química apolar, formada por cadeias de carbono e hidrogênio. Como consequência, sua superfície tende a rejeitar a água, dificultando a

formação de uma ligação forte com a matriz cimentícia, provocando o escorregamento da fibra quando submetido a tensões de flexão.

Em contrapartida, os traços com maior teor de fibra de palha de milho, não apresentaram esse comportamento de *crack bridging*, levando os corpos de prova a colapsarem de forma instantânea, não sendo possível perceber sua proximidade ao estado limite último (ELU).

O fato de ocorrer o rompimento da fibra da palha de milho ao invés do seu arrancamento, demonstra uma boa interação entre a fibra e a matriz cimentícia, mostrando que o tratamento alcalino com  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  foi bem sucedido, criando a rugosidade esperada na fibra para que sua ancoragem com o compósito cimentício fosse satisfatória.

Na Figura 26, fica evidente a diferença de comportamento entre ambas as fibras.

Figura 26 - Comportamento das fibras quanto ao arrancamento

(a) Traço 1PP



(b) Traço 1M



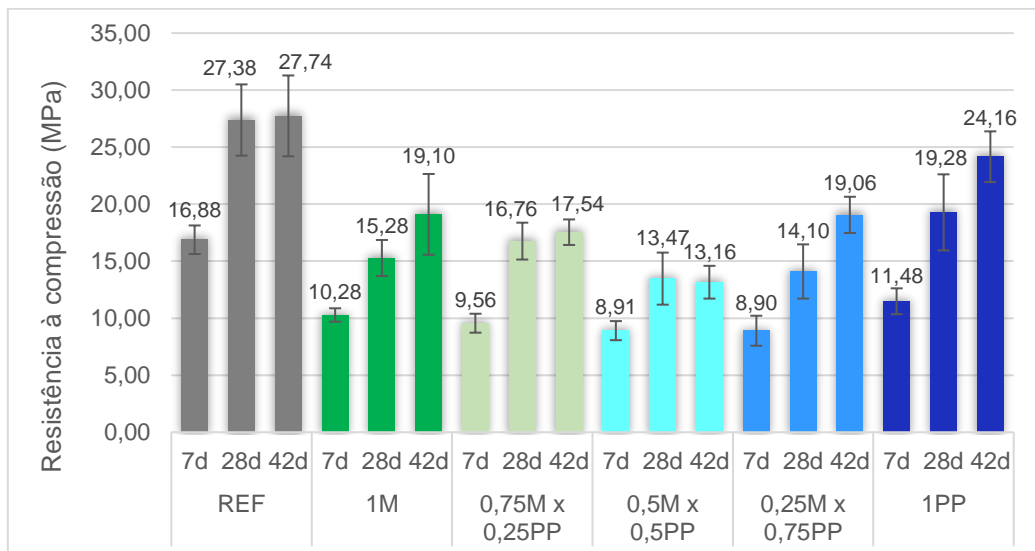
Fonte: Autor (2025).

#### 4.6. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado com o intuito de verificar essa característica importante para compósitos cimentícios, para compreender a influência das fibras quando adicionadas à mistura.

O Apêndice D, apresenta os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão axial, os quais podem ser melhores visualizados na Figura 27.

Figura 27 - Resultados de resistência à compressão axial aos 7, 28 e 42 dias



Fonte: Autor (2025).

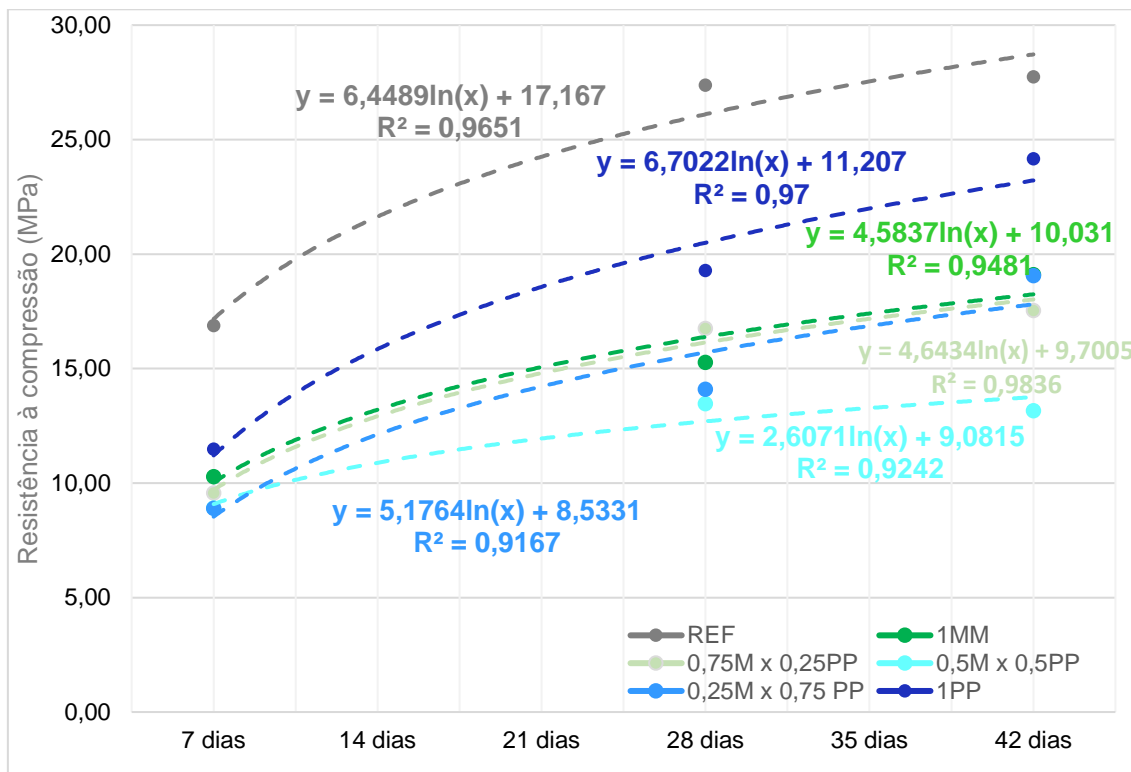
É possível notar, que houve uma redução de resistência à compressão dos traços com fibras quando se comparado o traço REF, aos demais traços na idade de 7 dias. Essa diminuição representa aproximadamente 41,9% em relação ao traço de referência com a média dos demais com composição de fibras.

Em todos os traços, houve um ganho de resistência consistente dos 7 para os 28 dias, apresentando uma característica do CP II - F, que proporciona resistências em todas as idades, com ganhos consistentes até os 28 dias.

Aos 42 dias, o traço REF apresentou uma resistência à compressão superior aos 27 MPa, enquanto todos os traços com fibra de palha de milho obtiveram valores inferiores à 20 MPa.

Na Figura 28, os resultados são apresentados em forma de linha de tendência, para melhor visualização de seus resultados à longo prazo.

Figura 28 - Tendência de resultados do ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Autor (2025).

É possível observar um comportamento estável quando a evolução dos traços dos 7 para os 42 dias, mostrando que todos os traços evoluem de forma similar.

Os traços híbridos foram os que apresentaram menores valores em relação a resistência à compressão, mostrando que a interação entre fibras de diferentes formatos pode ter criado maiores áreas de porosidade, gerando vazios e pontos de fragilidade que prejudicam o desempenho do compósito cimentício.

A diminuição na resistência à compressão é um resultado esperado em relação a compósitos cimentícios reforçados com fibras, já que segundo Bentur e Mindess (2007), a adição de fibras pode aumentar a porosidade do compósito cimentício, uma vez que a presença das fibras dificulta o adensamento e favorece a formação de vazios, resultando em uma leve redução na resistência à compressão.

#### 4.7. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

No presente estudo, foi realizado o MEV, o qual permite analisar com maior detalhamento as características morfológicas da fibra e sua interação com a matriz cimentícia.

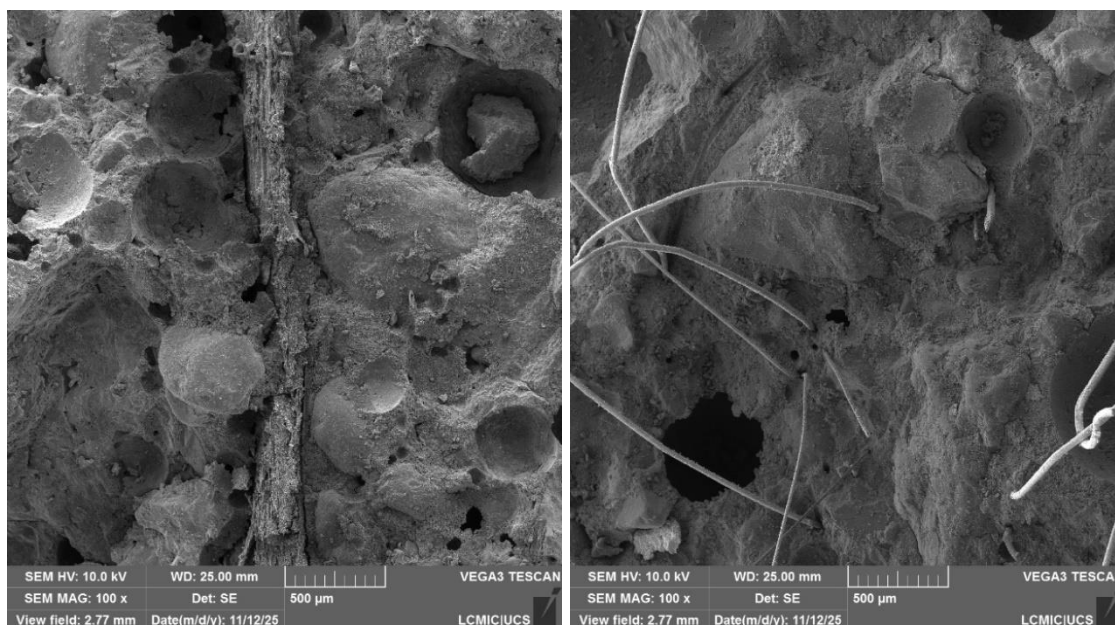
O ensaio foi realizado aos 28 dias para os traços 1M e 1PP, afim de analisar os dois traços com maior presença de cada tipo de fibra, de modo a observar de forma comparativa, sua interação e comportamento com o compósito cimentício.

A Figura 29 ilustra a interação das fibras de palha de milho e polipropileno com a matriz cimentícia a partir das micrografias, com uma ampliação de 100x.

Figura 29 – Análise do MEV traços 1M e 1 PP (100x)

(a) Traço 1M

(b) Traço 1PP



Fonte: Autor (2025).

Como já analisado anteriormente, a diferença de dimensões entre a fibra de palha de milho e polipropileno fica evidente nas micrografias, levando a impactos importantes em relação ao seu comportamento entre elas.

Em ambos os traços, fica perceptível uma interação da pasta com o agregado miúdo utilizado, provenientes de uma mistura homogênea dos materiais.

Na fibra de palha de milho, é possível observar uma superfície rugosa, proveniente da própria característica da fibra, em conjunto com o tratamento alcalino com hidróxido de cálcio, proporcionando uma maior adesão fibra-matriz.

Os microporos presentes no traço 1M são atribuídos à ação de borbulhamento que ocorre entre as fibras e a água durante a mistura, podendo levar à redução da resistência mecânica e da durabilidade geral do material de compósito cimentício (Hasan, *et al.*, 2025).

No traço 1PP, é possível observar alguns vazios provenientes da aglomeração de fibras em um mesmo local, levando a uma má homogeneidade da mistura devido ao alto teor de fibras.

Na Figura 30, é possível observar com mais clareza as propriedades geométricas da fibra de palha de milho e o processo de arrancamento das fibras de polipropileno da matriz, com uma ampliação de 1000x.

Figura 30 - Análise do MEV traços 1M e 1 PP (1000x)

(a) Traço 1M

(b) Traço 1PP



Fonte: Autor (2025).

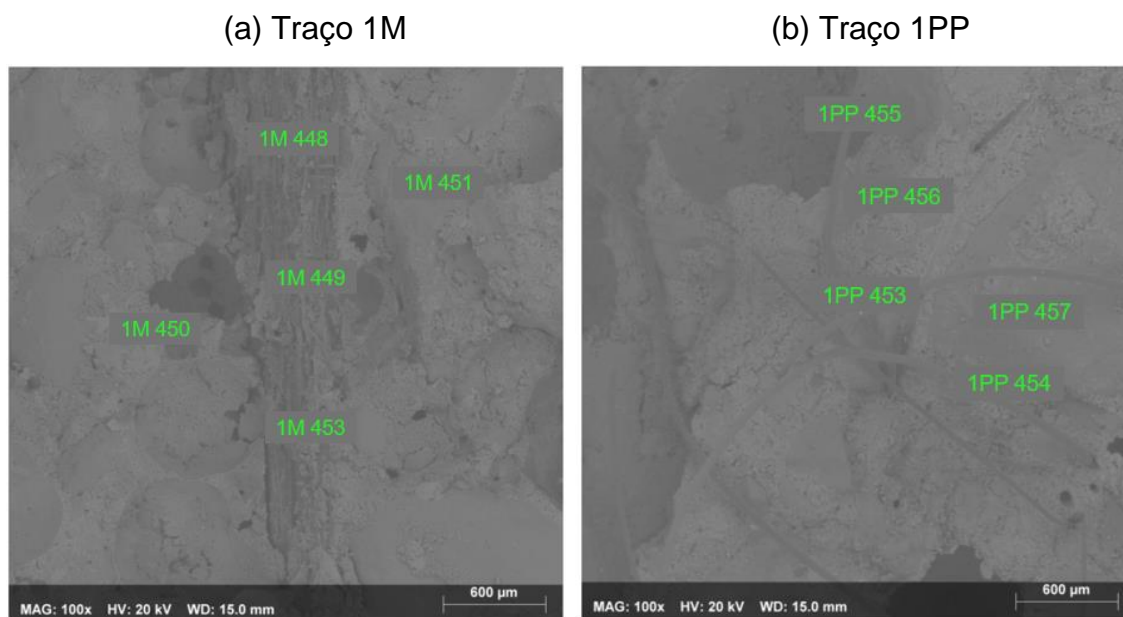
Devido as maiores dimensões da fibra de palha de milho, a ampliação de 1000x da imagem do MEV acaba por realçar a fibra em si, ofuscando sua interação sobre a matriz no traço 1M, destacando seus pontos de ancoragem.

No traço 1PP é possível observar os vazios provenientes do arrancamento da fibra de polipropileno e das tensões de tração as quais o corpo de prova foi submetido, gerando tensões ao longo da amostra fazendo com que o traço apresentasse maior resistência à tração na flexão.

#### 4.8. ESPECTROSCOPIA DE DISPERSÃO DE ENERGIA (EDS)

A Figura 31 apresenta os locais de coleta das amostras utilizadas para analisar as condições dos traços 1M e 1PP. Essas informações são complementadas pelos Apêndice E e F, que detalham as captações obtidas através do ensaio de espectroscopia de dispersão de energia, sendo possível observar os elementos químicos presentes em cada local identificado nas imagens.

Figura 31 - Espectroscopia de dispersão de energia do traço 1M e 1PP



Fonte: Autor (2025).

Um ponto importante a ser analisado, é a presença de cálcio na superfície da fibra de palha de milho, provavelmente em função do tratamento com o hidróxido de cálcio, que se manteve presente após a mistura e cura do compósito.

Em determinados pontos da fibra no traço 1M, ainda são identificados elementos característicos da palha de milho, como carbono, hidrogênio e oxigênio, associados à presença de celulose e lignina. A detecção desses polímeros orgânicos indica que o tratamento alcalino não foi totalmente eficaz em cobrir toda a superfície da fibra, ainda que em alguns pontos a presença de cálcio seja superior a tais elementos.

O traço 1M, apresentou picos de sílica mais elevados quanto aos pontos de análise da matriz cimentícia em comparação com o traço 1PP. Esse aumento no teor de sílica pode contribuir para uma reação pozolânica favorável no compósito, além de picos de potássio que podem estar associados à possíveis reações químicas entre a fibra de palha de milho e a matriz cimentícia, fortalecendo a ligação entre os elementos. (Hasan *et al.*, 2025).

Em ambas as amostras, é possível observar forte presença de cálcio, devido as propriedades químicas do CP II-F-40, o qual é composto por 60,8% de CaO (óxido de cálcio) de acordo com o fabricante, elementos importantes para contribuir com as propriedades mecânicas do compósito (Houankpo, Ma, Zhao e Tian, 2025).

## 5. CONCLUSÕES

O presente estudo analisou de forma comparativa o desempenho de compósitos cimentícios reforçados com fibras de palha de milho e polipropileno e diferentes dosagens, avaliando suas propriedades no estado fresco, por meio de ensaios de índice de consistência e densidade e no estado endurecido, por meio de ensaios de resistência à tração na flexão e compressão, nas idades de 7, 28 e 42 dias e ensaios de absorção de água por capilaridade e densidade aos 28 dias.

O uso da fibra de palha de milho, nas dimensões utilizadas ao longo desse trabalho, se mostrou vantajoso quanto ao índice de consistência de compósitos cimentícios, apresentando uma perda de trabalhabilidade menor do que a fibra de polipropileno, podendo-se reduzir a quantidade de aditivo utilizada no compósito cimentício, diminuindo a porosidade da mistura.

O tratamento com  $\text{Ca(OH)}_2$  se mostrou eficaz quanto à beneficiação da fibra de palha de milho, apresentando boa adesão entre a fibra e a matriz, permitindo a ancoragem da fibra de forma com que sua falha se desse a partir do rompimento da própria fibra e não do seu arrancamento.

Apesar de apresentar bons resultados aos 7 dias, os traços com maior teor de fibra de palha de milho mostraram uma menor evolução quanto a resistência à tração na flexão, aos 28 e 42 dias, quando comparados com o traço de referência e com os traços de maior teor de fibras de polipropileno.

Essa restrição na evolução aos 28 dias e até mesmo a redução de resistência em alguns traços aos 48 dias, apontam para uma possível degradação da fibra, principalmente devido ao meio alcalino criado pelo cimento e a cura submersa dos corpos de prova, já que o tanque também se torna um meio alcalino devido a presença de íons hidroxila, provenientes da própria hidratação do cimento.

A utilização da fibra de palha de milho não apresentou resultados adequados para sua utilização dentro as condições apresentadas ao longo do trabalho, porém demonstrou condições de melhora interessantes para que a partir de diferentes soluções, possa-se obter uma fibra natural com capacidade de utilização em escala.

## 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de contribuir para pesquisas futuras e ampliar a compreensão sobre o comportamento dos compósitos cimentícios com adição de fibras de palha de milho e de fibras naturais de modo geral, apresentam-se as seguintes sugestões:

- a) aplicação do processo de cura ao ar dos corpos de prova, de modo a avaliar os resultados aos 28 e 42 dias, analisando se houve degradação da fibra;
- b) utilização de diferentes tipos de tratamento para a fibra de palha de milho, como por exemplo, o hidróxido de sódio (NaOH), mencionado ao longo da pesquisa, avaliando se a adesão fibra-matriz mantém resultados positivos e se haverá um incremento quando à resistência à degradação;
- c) utilização da fibra de palha de milho em diferentes dimensões, com formatos mais esbeltos e cilíndricos, avaliando seu comportamento quanto ao arrancamento ou rompimento, ao utilizar uma fibra mais resistente;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:**

**Agregados para concreto.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778:2020 –**

**Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779:**

**Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276:**

**Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação da consistência e da retenção de água.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278:**

**Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279:**

**Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento**

**Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054:**

**Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2022.

ALENCAR, KRISHANA DE *et al.* **Influência do comprimento e proporção do fio de fibras de juta na resistência mecânica à tração de compósitos poliméricos.** *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.7, n.12, p.116381-116389. dec. 2021

AQUINO *et al.* **Agro-industrial waste from corn straw fiber: Perspectives of application in mortars for coating and laying blocks based on Ordinary Portland cement and hydrated lime.** *Construction and Building Materials*, [S.l.], v. 353, 129111, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822001646>. Acesso em: 6 abr. 2025.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites.** 2. ed. London: Taylor & Francis, 2007.

BLEDZKI, A. K., & GASSAN, J. **Composites reinforced with cellulose-based fibres.** *Progress in Polymer Science*, 24(2), 221–274. 1999.

BENTUR, A.; KOVLER, K. **Evaluation of early age cracking characteristics in cementitious systems.** *Materials and Structures*, v. 36, n. 3, p. 183-190, 2003.

BRAZ, M. C. D. A.; NASCIMENTO, F. B. C. D. **Concreto Reforçado com Fibras de Aço.** Ciências exatas e tecnológicas. Maceió, 2015.

CAIXETA SILVA, T.R.; Silva de Aquino, L.A.; Mesquita, L.C.; Marques, M.G.; de Azevedo, A.R.G.; Marvila, M.T. **Innovative Cementitious Composites Produced with Corn Straw Fiber: Effect of the Alkaline Treatments.** *Appl. Sci.* 2024, 14, 11117. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app142311117>. Acesso em 21 abr. 2025.

CECCONELLO, Vinício. **Avaliação de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto e cinza de casca de arroz, com ênfase na retração**. 2013. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

CECCONELLO, Vinício. **Avaliação do uso de óxido de grafeno como tratamento superficial em fibras sintéticas para utilização em concretos reforçados com fibra**. Programa de pós-graduação em engenharia de processos e tecnologias (PPGEPT). Caxias do Sul, 2024.

FIDELIS, Maria Ernestina Alves. **Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

FIGUEIREDO, A. D.; **Concreto reforçado com fibras**. [s.l.] Universidade de São Paulo, Agencia USP de Gestão da Informação Acadêmica (AGUIA), 2011.

FIGUEIREDO, A. D.; CECCATO, M. R. **Workability analysis of steel fiber reinforced concrete using slump and Ve-Be test**. *Materials Research*, São Paulo, 2015.

FIGUEIREDO, A. D.; MONTE, R.; BITENCOURT JR., L.A.G. Capítulo 36 - **Concreto com Fibras**. In: IBRACON. – Instituto Brasileiro do Concreto (Org.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 3ªed. São Paulo: Arte Interativa, 2022, v.2, p. 1523-1560.

HASAN, N. M. S; *et al.* **Performance of fiber reinforced low-carbon concrete: role of corn cob ash and corn husk fiber**. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, Nov. 2025.

HODZIC, Alma; SHANKS, Robert. **Natural fibre composites: materials, processes and properties**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2014.

HOUANKPO, T. O. N., MA, Z., ZHAO, Z., TIAN, G. **Performance of cementitious high-pressure mixtures with wheat and corn straw fiber and straw ashes.** *Case Studies in Construction Materials*, 2025.

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

LI, V., STANG, H., KRENCHER, H. **Micromechanics of Crack Bridging in Fiber Reinforced Concrete.** *Materials and Structures*, 1993.

LISBOA, E. S.; ALVES, E. S.; MELO, G. H. A. G. **Materiais de construção: concreto e argamassa.** 2.ed. Porto Alegre: SAGAH, 2017.

M.T. MARVILA, A.R.G. DE AZEVEDO, B.A. TAYEH, D. CECCHIN, A.C. PEREIRA, S. N. MONTEIRO, **Technological performance of açai natural fibre reinforced cement-based mortars**, *J. Build. Eng.* 33, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101675>. Acesso em 26 abr. 2025

MARVILA, MARKSSUEL TEIXEIRA et al. **Use of natural vegetable fibers in cementitious composites: concepts and applications.** *Innovative Infrastructure Solutions*, [S. l.], v. 6, n. 180, p. 1–18, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00551-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41062-021-00551-8>. Acesso em: 24 maio 2025.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Ibracon, 2014.

NAAMAN, A. E.; NAJM, H. S. **Bond-slip mechanisms of steel fibers in concrete.** *ACI Materials Journal*, v. 88, n. 2, p.135-145, 1991.

NIU, B.; KIM, B.H. **Method for Manufacturing Corn Straw Cement-Based Composite and Its Physical Properties**. *Materials* 2022, 15, 3199. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15093199>. Acesso em 21 abr. 2025.

OLIVEIRA, Maria Luiza Lopes de. **Influência da adição de fibras de polipropileno em argamassas**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. 2001.

PARRE, A.; KARTHIKEYAN B.; BALAJI A.; UDHAYASANKAR R. **Investigation of chemical, thermal and morphological properties of untreated and NaOH treated banana fiber**. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.655>. Acesso em 26 abr. 2025

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 Gestão da Informação Acadêmica (AGUIA), 2002.

PINTO, Renata Godinho. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá (*Ananas erectifolius*) impregnadas com sílica ativa**. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

RAMADEVI P., SAMPATHKUMAR D., SRINIVASA C., BENNEHALLI B. **Effect of alkali treatment on water absorption of single cellulosic abaca fiber**. Biosources.com, 2012.

RAMALINGAM S., MURUGASAN R., NAGABHUSHANA M.N. **Laboratory performance evaluation of environmentally sustainable sisal fibre reinforced bituminous mixes**. *Constr. Build. Mater.*, 148 (2017).

SAINT-GOBAIN. **ADFIL SINTA®PP 12**. Sorocaba, SP, 2025.

SALEEM, Shahzad et al. ***Evaluating natural and synthetic fibers in strengthening concrete column specimens with varying corner radii and aspect ratios***. *Journal of Building Engineering*, [S.l.], v. 103, art. 112095, 1 jun. 2025. ISSN 2352-7102. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112095>. Acesso em: 21 abr. 2025.

SANTIAGO, C. **Argamassas tradicionais de cal** [online]. Salvador: EDUFBA, 2007. 202 p. ISBN 978-85-232-0471-6. Available from SciELO Books.

SAVASTANO, H. J. **Zona de transição entre fibras e pasta de cimento Portland: Caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas do compósito. Tese de doutorado**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica Universidade de São Paulo. 1992.

SIDDIQUE, R.; KHAN, M. I. Rice Husk Ash. ***Supplementary Cementing Materials. Chemistry and Materials Science***. *Engineering Materials*. v. 37, p. 231-281, 2011.

TURK, Kazim; OZTEKIN, Erol; KINA, Ceren. ***Effect of Micro Fiber Content on Workability of Self-compacting Concrete***. *Department of Civil Engineering, Inonu University, Malatya, Turkey*, 2018.

XIE, X.; GOU, G.; WEI, X.; ZHOU, Z.; JIANG, M.; XU, X.; WANG, Z.; HUI, D. ***Influence of pretreatment of rice straw on of straw fiber filled cement-based composites***. *Constr. Build. Mater.* 2016, 113, 449–455.

ZUKOWSKI, B.; DOS SANTOS, E.R.F.; dos Santos Mendonça, Y.G.; de Andrade Silva, F.; Toledo Filho, R.D. ***The Durability of SHCC with Alkali Treated Curauá Fiber Exposed to Natural Weathering***. *Cement and Concrete Composites*. 2018.

## APÊNDICE A – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

REF						
Massa (g)	Seco (g)	3h (g)	6h (g)	24h (g)	48h (g)	72h (g)
CP 1	481,8	488,28	490,44	497,37	500,2	502,1
CP 2	486,8	492,14	494,5	501,4	504,7	506,7
CP 3	485,3	491,1	493,7	500,9	503,4	504,9

1M						
Massa (g)	Seco (g)	3h (g)	6h (g)	24h (g)	48h (g)	72h (g)
CP 1	439,21	445,57	447,53	452,72	454,77	454,82
CP 2	450,3	455,32	457,51	462,2	464,5	464,64
CP 3	446,66	452,14	454,57	458,72	460,92	460,61

0,75M x 0,25PP						
Massa (g)	Seco (g)	3h (g)	6h (g)	24h (g)	48h (g)	72h (g)
CP 1	455,19	460,09	462,22	466,89	469,43	470,7
CP 2	473,82	479,69	481,99	486,98	489,14	490,32
CP 3	456,66	462,21	464,33	469,01	471,34	472,43

0,5M x 0,5PP						
Massa (g)	Seco (g)	3h (g)	6h (g)	24h (g)	48h (g)	72h (g)
CP 1	453,15	458,6	460,46	466,5	470,39	471,36
CP 2	456,6	462,47	464,32	470,74	474,99	476,35
CP 3	457,38	462,77	464,62	470,62	474,2	475,13

0,25M x 0,75PP						
Massa (g)	Seco (g)	3h (g)	6h (g)	24h (g)	48h (g)	72h (g)
CP 1	449,77	454,28	456,52	461,76	456,13	466,23
CP 2	448,97	454,43	457,11	462,94	466,04	467,62
CP 3	446,53	451,94	454,3	459,34	462,33	463,9

1PP						
Massa (g)	Seco (g)	3h (g)	6h (g)	24h (g)	48h (g)	72h (g)
CP 1	468,14	475,63	477,85	485,09	489,55	490,74
CP 2	464,24	470,39	472,8	479,88	484,67	486,47
CP 3	459,43	465,82	467,96	475,17	479,76	480,88

Fonte: Autor (2025).

## APÊNDICE B – DENSIDADE NO ESTADO ENDURECIDO

REF						
CP	B (cm)	H (cm)	L (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa (g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
CP 1	40,26	40,53	159,97	261,00	481,80	1,85
CP 2	40,23	40,08	159,80	257,66	486,80	1,89
CP 3	40,20	40,21	159,98	258,60	485,30	1,88

1M						
CP	B (cm)	H (cm)	L (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa (g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
CP 1	39,10	40,05	160,40	251,18	439,21	1,75
CP 2	40,25	39,90	160,15	257,20	450,30	1,75
CP 3	40,00	40,30	160,75	259,13	446,66	1,72

0,75M x 0,25PP						
CP	B (cm)	H (cm)	L (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa (g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
CP 1	40,09	40,43	161,13	261,13	455,19	1,74
CP 2	41,37	40,75	161,20	271,71	473,82	1,74
CP 3	39,88	40,30	160,82	258,42	456,66	1,77

0,5M x 0,5PP						
CP	B (cm)	H (cm)	L (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa (g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
CP 1	40,60	40,70	160,90	265,87	453,15	1,70
CP 2	41,40	40,50	160,60	269,28	456,60	1,70
CP 3	40,60	41,35	160,70	269,78	457,38	1,70

0,25M x 0,75PP						
CP	B (cm)	H (cm)	L (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa (g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
CP 1	40,35	40,56	160,56	262,73	449,77	1,71
CP 2	40,42	41,44	160,40	268,64	448,97	1,67
CP 3	40,35	41,56	160,51	269,16	446,53	1,66

1PP						
CP	B (cm)	H (cm)	L (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa (g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
CP 1	41,35	41,00	160,40	271,93	468,14	1,72
CP 2	40,60	40,75	160,60	265,70	464,24	1,75
CP 3	41,40	41,70	160,30	276,74	459,43	1,66

Fonte: Autor (2025).

## APÊNDICE C – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

7 Dias					
Traço	CP1	CP2	CP3	Média	Desvio P
REF	2,22	3,03	3,62	2,96	0,70
1M	3,38	2,84	3,24	3,15	0,28
0,75M x 0,25PP	3,38	3,41	3,50	3,43	0,06
0,5M x 0,5PP	3,10	2,81	3,38	3,10	0,29
0,25M x 0,75PP	3,03	2,93	3,24	3,07	0,16
1PP	2,74	3,50	2,22	2,82	0,64

28 Dias					
Traço	CP1	CP2	CP3	Média	Desvio P
REF	5,20	7,29	6,10	6,20	1,05
1M	4,46	4,50	4,58	4,51	0,06
0,75M x 0,25PP	4,96	5,60	5,89	5,48	0,48
0,5M x 0,5PP	5,55	3,77	5,43	4,92	0,99
0,25M x 0,75PP	5,91	5,08	5,60	5,53	0,42
1PP	5,58	6,32	5,86	5,92	0,37

42 Dias					
Traço	CP1	CP2	CP3	Média	Desvio P
REF	7,22	7,39	5,72	6,78	0,92
1M	5,43	5,48	5,51	5,47	0,04
0,75M x 0,25PP	5,79	5,65	5,48	5,64	0,16
0,5M x 0,5PP	4,77	3,93	3,46	4,05	0,66
0,25M x 0,75PP	5,89	4,00	5,58	5,16	1,01
1PP	7,03	6,36	7,32	6,90	0,49

Fonte: Autor (2025).

## APÊNDICE D – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

7 Dias								
Traço	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Média	Desvio P
REF	15,08	18,15	15,67	17,45	17,97	16,96	16,88	1,25
1M	10,59	10,11	11,01	9,32	10,59	10,07	10,28	0,59
0,75M x 0,25PP	10,03	9,10	9,01	9,57	10,96	8,69	9,56	0,83
0,5M x 0,5PP	9,16	8,75	10,25	9,21	7,98	8,09	8,91	0,84
0,25M x 0,75PP	8,59	9,55	9,65	8,15	6,86	10,59	8,90	1,32
1PP	11,38	12,37	13,22	10,07	10,89	10,97	11,48	1,13

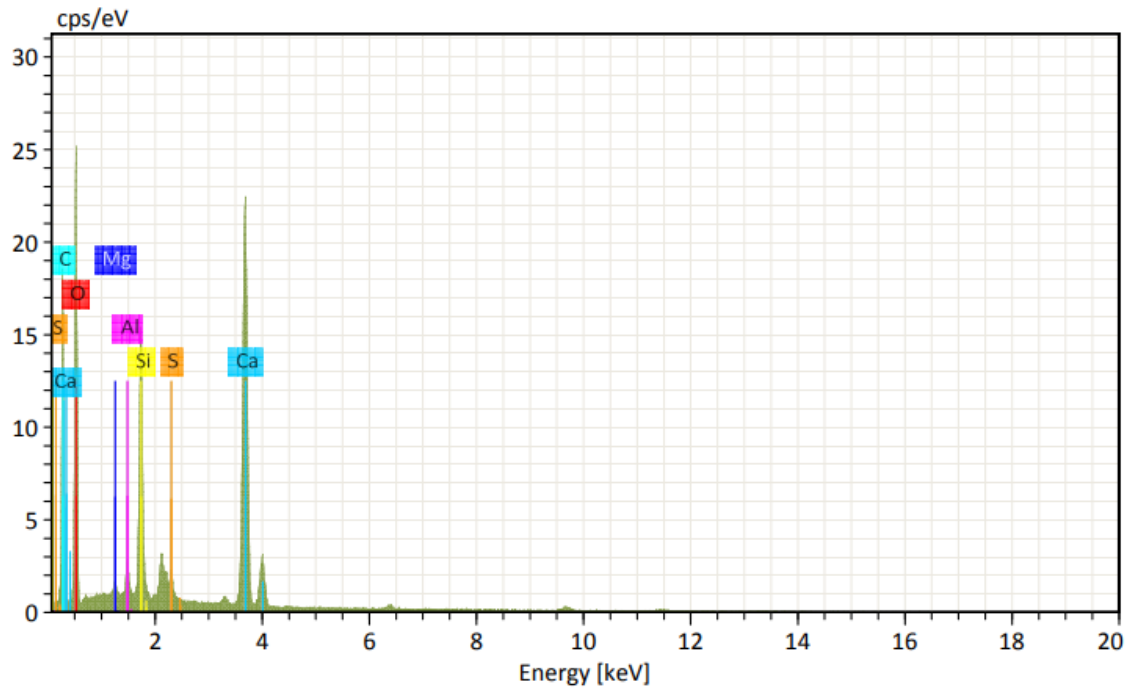
28 Dias								
Traço	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Média	Desvio P
REF	31,17	24,90	29,67	26,09	23,16	29,27	27,38	3,12
1M	15,63	16,80	15,91	12,48	14,46	16,37	15,28	1,58
0,75M x 0,25PP	17,10	16,61	16,89	17,72	18,48	13,75	16,76	1,62
0,5M x 0,5PP	13,40	10,27	16,21	13,78	11,55	15,60	13,47	2,28
0,25M x 0,75PP	16,48	12,36	12,37	11,65	14,37	17,34	14,10	2,38
1PP	22,44	22,05	19,96	14,47	17,47		19,28	3,34

42 Dias								
Traço	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Média	Desvio P
REF	31,58	30,84	26,53	23,57	29,99	23,93	27,74	3,54
1M	20,88	19,47	18,78	17,24	19,14		19,10	1,31
0,75M x 0,25PP	18,18	17,67	18,99	16,51	16,35		17,54	1,12
0,5M x 0,5PP	13,01	11,98	12,32	15,98	12,94	12,70	13,16	1,44
0,25M x 0,75PP	19,72	17,28	18,52	20,41	17,35	21,06	19,06	1,59
1PP	23,41	27,79	25,47	21,43	22,82	24,04	24,16	2,22

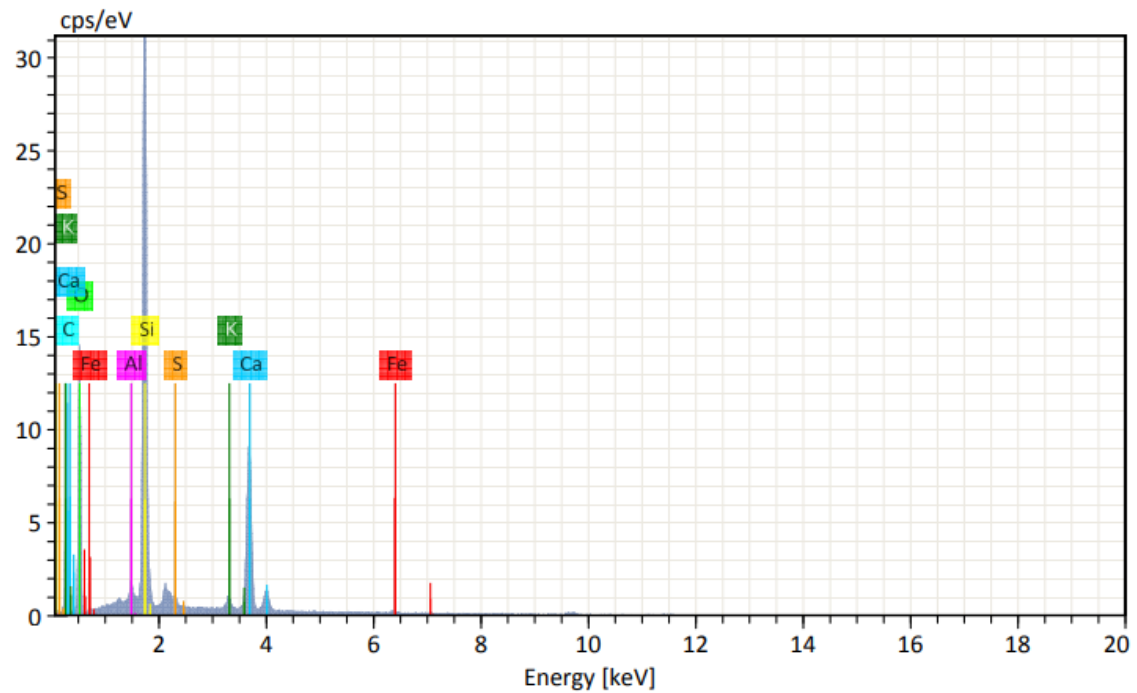
Fonte: Autor (2025).

## APÊNDICE E – GRÁFICO DA ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE DISPERSÃO DE ENERGIA DO TRAÇO 1M

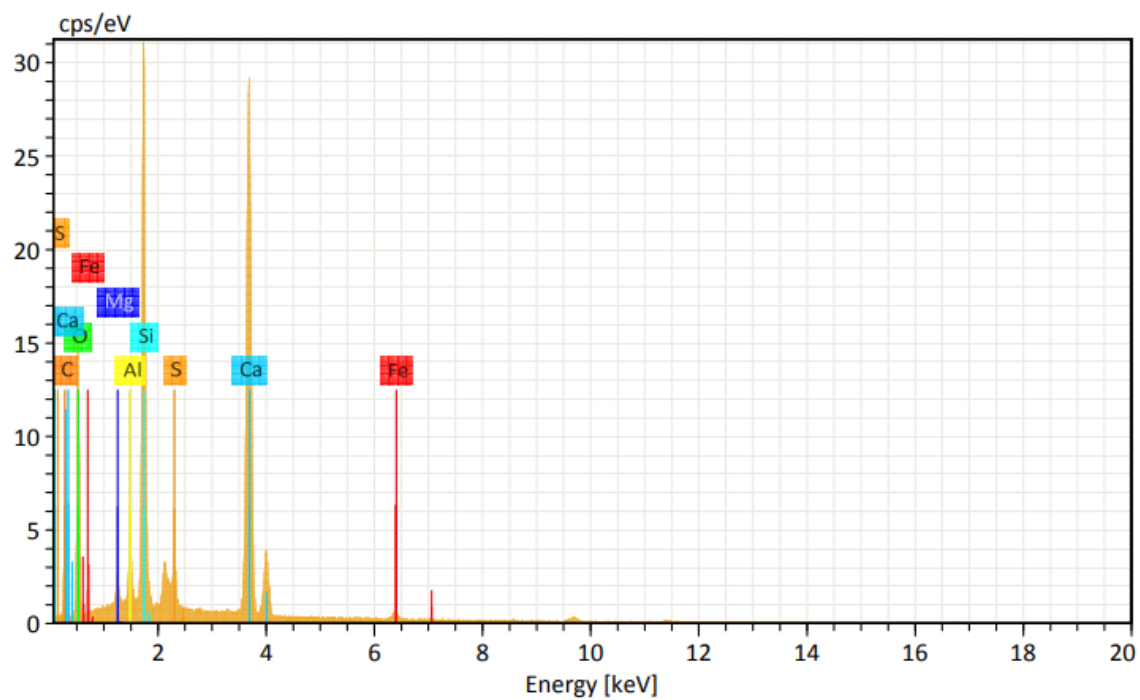
1M 448



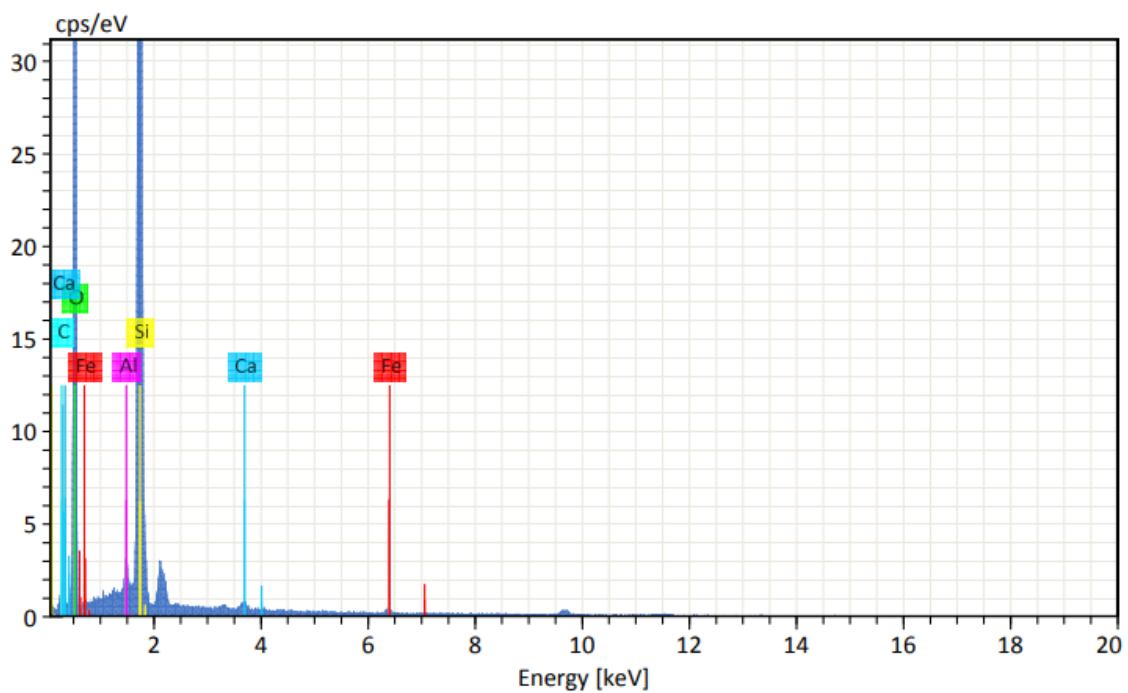
1M 449



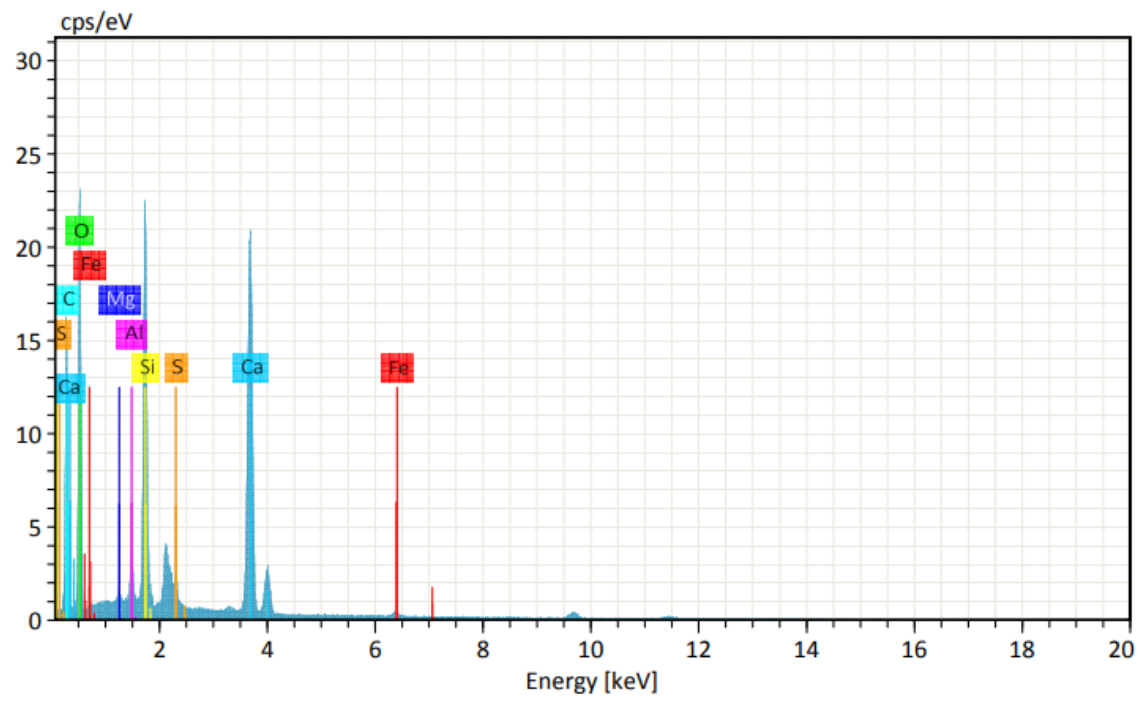
1M 450



1M 451



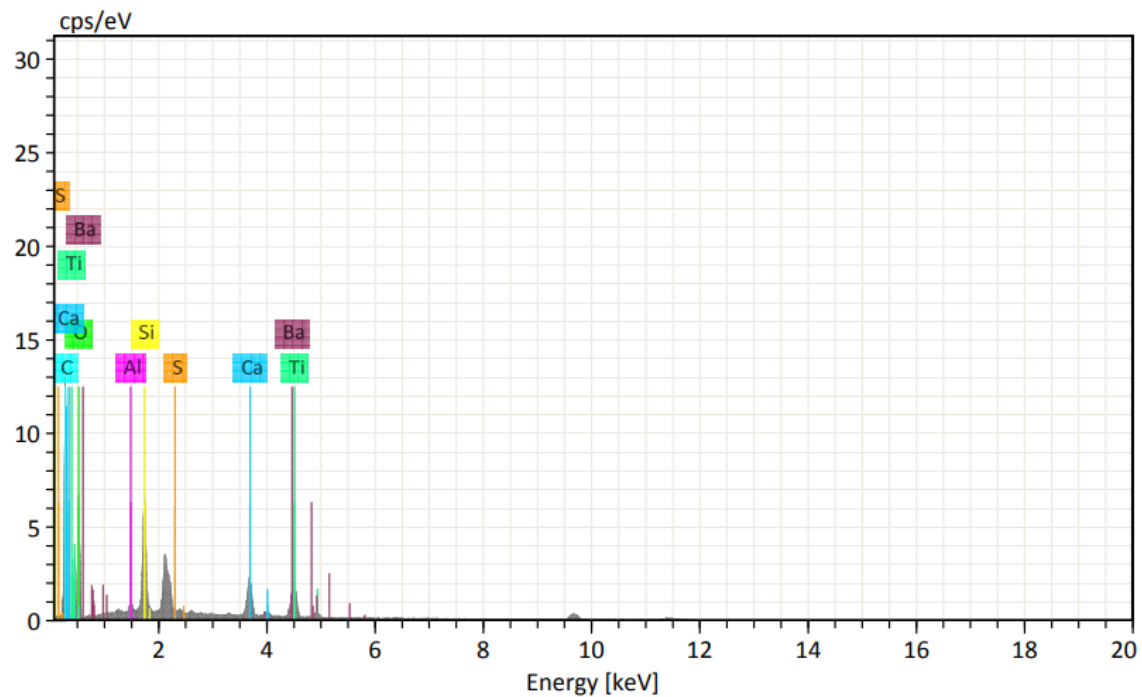
1M 453



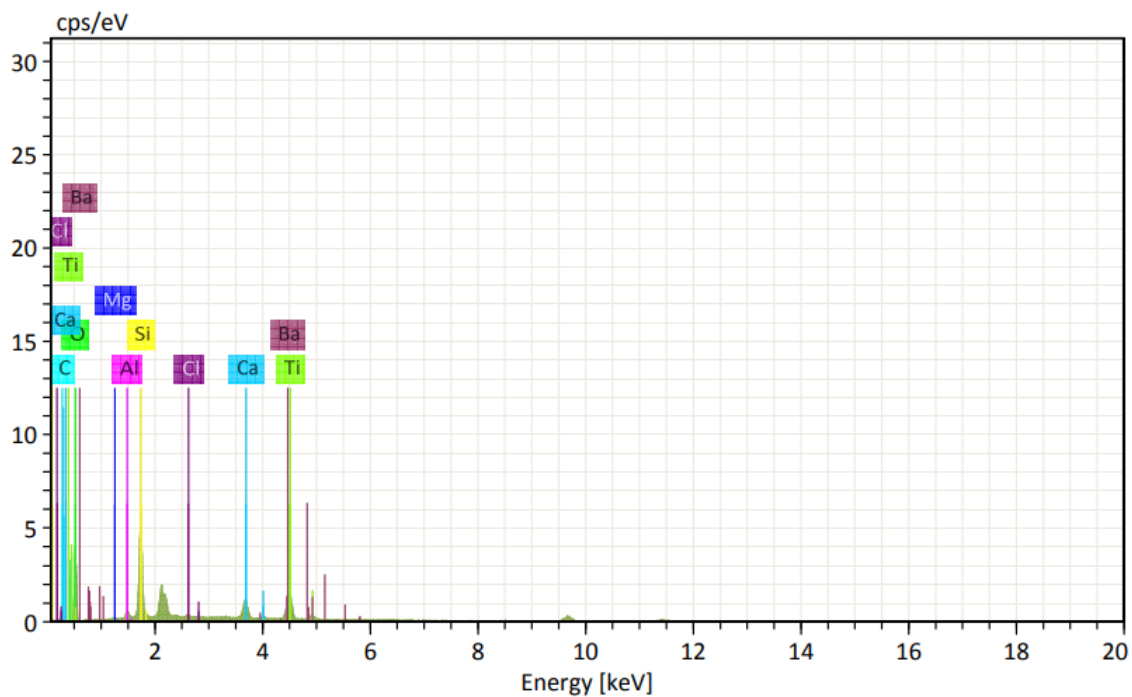
Fonte: Autor (2025).

## APÊNDICE F – GRÁFICO DA ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE DISPERSÃO DE ENERGIA DO TRAÇO 1PP

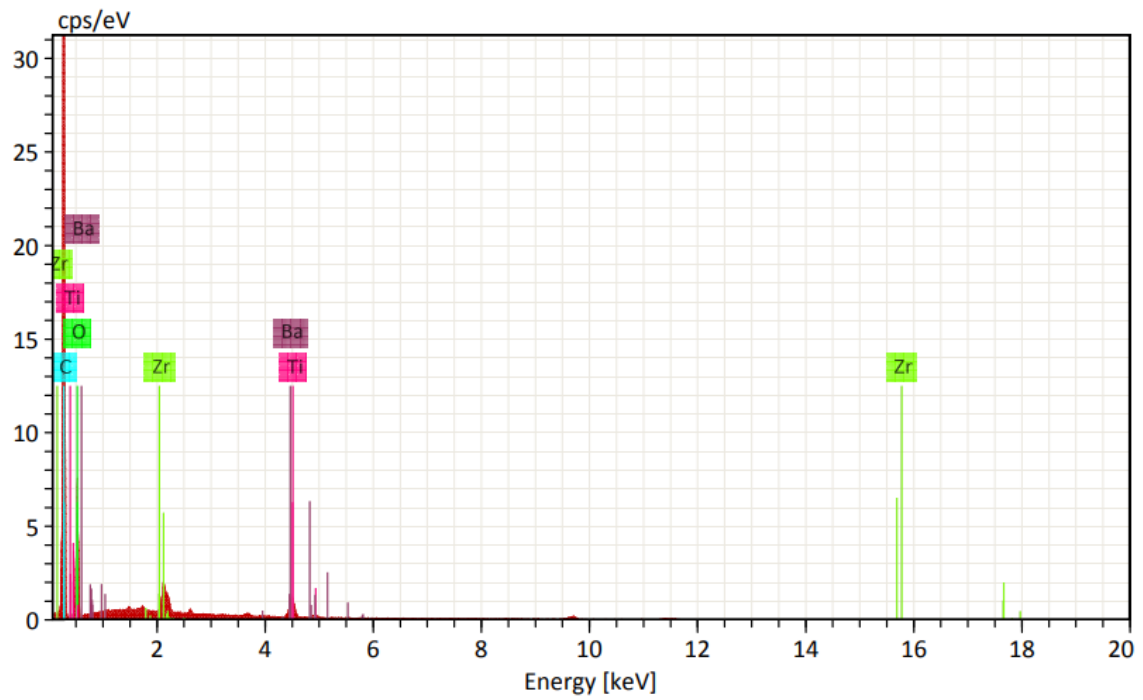
1PP 453



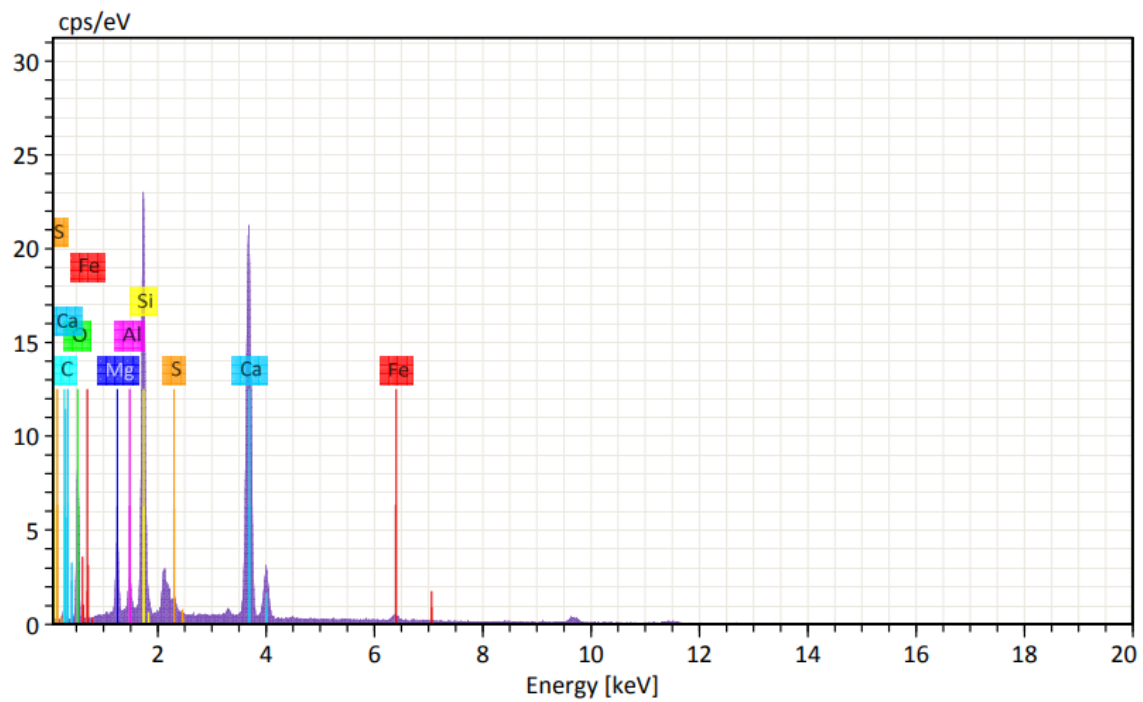
1PP 454



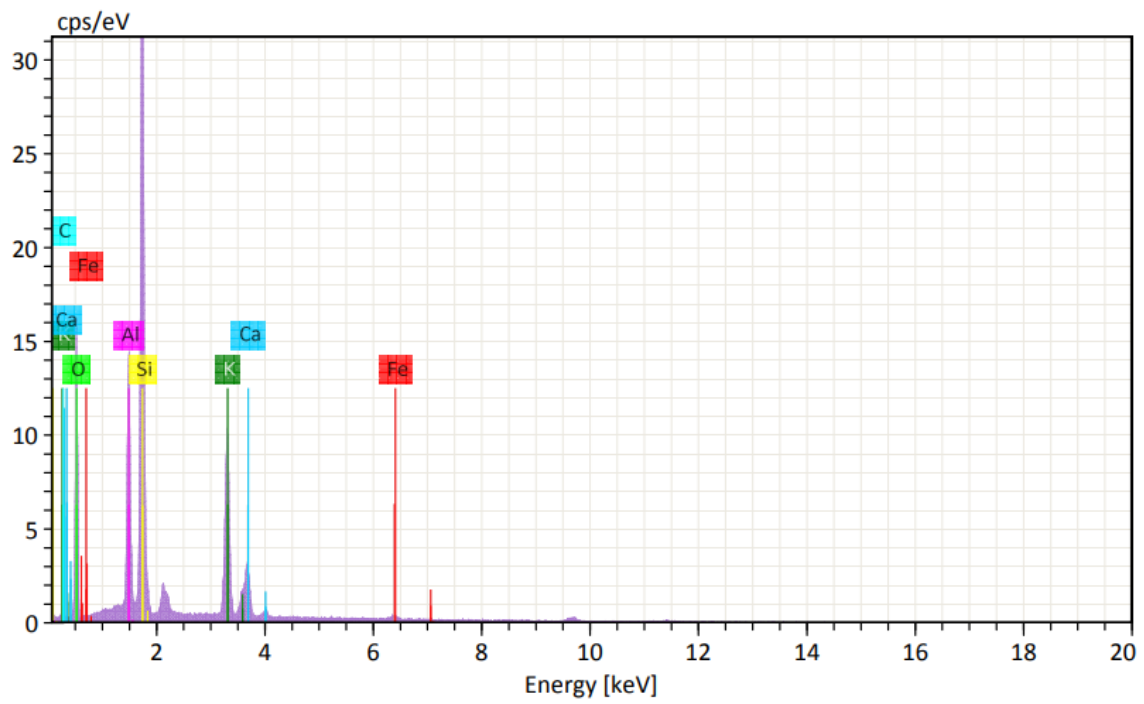
1PP 455



1PP 456



1PP 457



Fonte: Autor (2025).