

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MELINA DEGREGORI MENEZES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS HÍBRIDAS DE JUTA E DE
PROLIPROPILENO**

CAXIAS DO SUL

2025

MELINA DEGREGORI MENEZES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS HÍBRIDAS DE JUTA E DE
PROLIPROPILENO**

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

MELINA DEGREGORI MENEZES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS HÍBRIDAS DE JUTA E DE
PROLIPROPILENO**

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

Aprovado em: 04/12/2025

Banca Examinadora

Prof. Dr. Vinício Ceconello

Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Maurício Schafer

Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Matheus Poletto

Universidade de Caxias do Sul

RESUMO

MENEZES, MELINA. **Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras híbridas de juta e de polipropileno.** Caxias do Sul, 2025. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2025.

A incorporação de fibras naturais hibridizadas com fibras sintéticas em compósitos cimentícios tem se destacado como uma estratégia relevante para desenvolver materiais mais sustentáveis, com desempenho mecânico e maior durabilidade, especialmente quando associada a tratamentos capazes de aprimorar essas propriedades. Assim, este trabalho investiga a eficácia da hibridização de microfibras de juta e polipropileno nas propriedades mecânicas de compósitos cimentícios. Foram elaborados cinco compósitos reforçados com um total de 0,8% de fibras em relação ao volume do compósito, além de um compósito de referência sem fibras, variando-se apenas a proporção entre juta e polipropileno. As fibras de juta foram tratadas com hidróxido de cálcio para melhorar a interação com a matriz e reduzir sua degradação no meio altamente alcalino. Além disso, adotou-se a substituição parcial do cimento com o intuito de minimizar o ataque alcalino às fibras. Para avaliar a eficácia da hibridização, foram realizados ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão nos compósitos contendo 0,8% juta; 0,8% polipropileno; 0,6% juta + 0,2% polipropileno; 0,4% juta + 0,4% polipropileno; e 0,2% juta + 0,6% polipropileno. Os resultados mostraram que, aos 7 e 28 dias, o compósito com 0,4% juta + 0,4% polipropileno apresentou o melhor desempenho mecânico, evidenciando uma sinergia entre as fibras: a juta, mais rígida, contribuiu para resistir aos esforços iniciais, enquanto o polipropileno atuou nos estágios posteriores, conferindo maior ductilidade e tenacidade ao material. Entretanto, aos 42 dias, o compósito com 0,8% polipropileno apresentou os melhores resultados, sugerindo que os compósitos contendo juta atingiram um limite de ganho de resistência devido às características intrínsecas da fibra. A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) confirmou a melhoria da área superficial das fibras de juta tratadas, favorecendo sua interação com a matriz cimentícia. A Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) identificou alterações químicas nas fibras após o tratamento, com destaque para a maior presença de cálcio, indicando a efetividade do processo aplicado.

Palavras-chave: Compósitos cimentícios; fibras de juta; fibra de polipropileno; fibras híbridas; tratamento alcalino; propriedades mecânicas; durabilidade.

ABSTRACT

MENEZES, MELINA. **Evaluation of the Mechanical Properties of Cementitious Composites Reinforced with Hybrid Jute and Polypropylene Fibers.** Caxias do Sul, 2025. Undergraduate Thesis in Civil Engineering, University of Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2025.

The incorporation of natural fibers hybridized with synthetic counterparts in cementitious composites has emerged as a relevant strategy to develop more sustainable materials with improved mechanical performance and enhanced durability, especially when combined with treatments capable of optimizing these properties. Thus, this study investigates the effectiveness of hybridizing jute microfibers and polypropylene fibers on the mechanical properties of cementitious composites. Five fiber-reinforced composites were produced, each containing a total fiber content of 0.8% by volume, in addition to a reference composite without fibers, varying only the proportion between jute and polypropylene. The jute fibers were treated with calcium hydroxide to improve their interaction with the matrix and reduce their degradation in the highly alkaline environment. Furthermore, partial cement replacement was adopted to minimize the alkaline attack on the fibers. To evaluate the effectiveness of the hybridization, flexural tensile strength and compressive strength tests were performed on the composites containing 0.8% jute; 0.8% polypropylene; 0.6% jute + 0.2% polypropylene; 0.4% jute + 0.4% polypropylene; and 0.2% jute + 0.6% polypropylene. The results showed that, at 7 and 28 days, the composite with 0.4% jute + 0.4% polypropylene presented the best mechanical performance, evidencing a synergistic behavior between the fibers: initially, the stiffer jute fibers contributed to resisting early loads, while the polypropylene acted at later stages, conferring greater ductility and toughness to the material. However, at 42 days, the composite with 0.8% polypropylene exhibited the highest strength, suggesting that the composites containing jute reached a limit in strength gain due to the intrinsic characteristics of the fiber. Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis confirmed the improvement in the surface morphology of the treated jute fibers, favoring their interaction with the cementitious matrix. Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) identified chemical alterations in the fibers after the treatment, with emphasis on the greater presence of calcium, indicating the effectiveness of the applied process.

Keywords: Cementitious composites; jute fibers; polypropylene fiber; hybrid fibers; alkaline treatment; mechanical properties; durability.

Dedico esse trabalho aos meus avós, Antônio de Menezes e Rosina de Menezes, que hoje não estão mais presentes. Que sempre me apoiaram, incentivaram e sempre tiveram muito orgulho de mim e da trajetória que eu estava traçando. Que este trabalho seja um reflexo do carinho, da dedicação e dos valores que me ensinaram, a força da memória de vocês sempre esteve presente.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço meus pais, Silvio Menezes e Janete Degregori, por todo o apoio incondicional, amor, incentivo e paciência demonstrados ao longo de toda a minha jornada acadêmica e nos momentos mais desafiadores desta pesquisa. E ainda, por terem me proporcionado essa formação.

Ao meu orientador, Professor Dr. Vinício Ceconello, meu agradecimento mais sincero. Obrigada pela dedicação em me orientar, proporcionando todo o suporte e apoio necessários para a realização deste projeto. Sou grata por todos os ensinamentos que me proporcionou, não somente durante o desenvolvimento desta pesquisa, mas durante todo o meu período de graduação.

À Universidade de Caxias do Sul (UCS), pelo suporte com laboratórios e equipamentos que possibilitaram a execução prática desta pesquisa. Aos laboratoristas, Matheus e Mara, pela disposição e paciência para fornecer ajuda necessária durante a fase experimental desse trabalho.

Por fim, agradeço de modo geral, a todos os amigos e colegas da faculdade que participaram desta trajetória, pelos momentos de descontração, pela troca de conhecimento e pelo apoio mútuo que tornaram a caminhada mais leve e motivadora. Aos professores do Curso de Engenharia Civil da UCS, por todos os ensinamentos e contribuições que formaram o meu conhecimento técnico e a minha visão profissional.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Micrografias das fibras de coco e juta, respectivamente	18
Figura 2 – Planta de onde é extraída a fibra de juta (a) e fibra de juta após a extração	21
Figura 3 - Fibras de polipropileno do tipo fibrilado (a) e do tipo monofilamento (b)	23
Figura 4 - Macrofibras de polipropileno.....	23
Figura 5 - Material compósito	24
Figura 6 - Formação das microfissurasções	25
Figura 7 - Comportamento de compósitos reforçados com fibras submetidos a ensaios de tração direta (esquerda) e flexão (direita)	27
Figura 8 - Zona de transição	28
Figura 9 - Formas de distribuição da fibra	29
Figura 10 - Quatro etapas progressivas no processo de degradação de fibras naturais	33
Figura 11 - Fluxograma do programa experimental.....	38
Figura 12 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	45
Figura 13 - Fibra de juta	47
Figura 14 - Massa específica fibra de juta.....	48
Figura 15 – Tratamento alcalino com hidróxido de cálcio	50
Figura 16 - Procedimento de cada traço	51
Figura 17 - Separação dos materiais.....	52
Figura 18 - Processo de mistura dos materiais	53
Figura 19 - Ensaio do índice de consistência	54
Figura 20 - Ensaio da densidade no estado fresco.....	55
Figura 21 - Processo de moldagem e desmoldagem dos compósitos.....	57
Figura 22 - Dispositivo de carga para determinação da resistência à tração na flexão	59
Figura 23 - Dispositivo de carga típico para ensaios de resistência à compressão ..	60
Figura 24 - Índice de consistência	64
Figura 25 - Densidade no estado fresco	66
Figura 26 - MEV fibra de juta (a) e fibra de polipropileno (b) ampliada em 1000x	68

Figura 27 - MEV compósito de fibra de juta (a) e compósito de fibra de polipropileno (b) ampliada em 250x.....	70
Figura 28 - EDS fibra de Juta.....	72
Figura 29 - EDS fibra PP.....	74
Figura 30 - Resistência a tração na flexão.....	75
Figura 31 - Resistência à compressão.....	79
Figura 32 - Absorção de água por capilaridade.....	82
Figura 33 - Densidade no estado endurecido.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de fibras vegetais	17
Tabela 2 - Área e diâmetro de lumens em tipos de fibras vegetais	18
Tabela 3 - Resultados do ensaio à tração para as fibras de curauá, juta e sisal	19
Tabela 4 – Traços de referências	31
Tabela 5 - Traço utilizado na pesquisa	39
Tabela 6 – Especificações químicas do fabricante para o CPII F-40	41
Tabela 7 - Especificações físicas do fabricante para o CPII F-40	41
Tabela 8 – Quantidade retirada em massa e em porcentagem das amostras	43
Tabela 9 - Resultados granulométricos agregado miúdo.....	43
Tabela 10 - Caracterização do agregado miúdo	45
Tabela 11 - Características da microfibrila de polipropileno	46
Tabela 12 - Resultados do ensaio de massa específica.....	48
Tabela 13 - Consumo dos materiais por m ³ de compósito	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fatores que influenciam nas propriedades da fibra.....	19
Quadro 2 - Codificações para os traços	40
Quadro 3 - Metodologia dos ensaios e suas normativas.....	42

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos específicos	15
1.2 LIMITAÇÕES	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 FIBRAS NATURAIS	17
2.1.1 Fibra de Juta	20
2.2 FIBRAS SINTÉTICAS.....	21
2.2.1 Fibra de polipropileno	22
2.3 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS.....	23
2.3.1 Dosagem de compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais	30
2.4 TRATAMENTOS SUPERFICIAIS EM FIBRAS NATURAIS	32
2.4.1 Tratamento físico	34
2.4.2 Tratamento químico	35
2.4.3 Modificação da matriz	36
3. METODOLOGIA.....	38
3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	38
3.1.1 Compósito cimentício	39
3.2 MATERIAIS.....	40
3.2.1 Aglomerante	40
3.2.2 Adição mineral	41
3.2.3 Agregado miúdo	42
3.2.4 Água	46
3.2.5 Fibra de polipropileno	46
3.2.6 Fibra de juta	47

3.2.7	Hidróxido de cálcio.....	49
3.2.8	Aditivo Superplastificante	49
3.3	MÉTODOS	49
3.3.1	Tratamento das fibras.....	49
3.3.2	Procedimento de dosagem e mistura dos materiais	51
3.3.3	Ensaio da determinação do índice de consistência.....	53
3.3.4	Determinação da densidade no estado fresco	55
3.3.5	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	57
3.3.6	Ensaio de tração na flexão	58
3.3.7	Ensaio de compressão axial	60
3.3.8	Absorção de água, índice de vazios e densidade no estado endurecido.	61
4.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	63
4.1	PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO	63
4.1.1	Índice de consistência.....	63
4.1.2	Densidade no estado fresco.....	65
4.2	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	67
4.2.1	Análise microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos compósitos ..	67
4.2.2	Análise espectroscopia por dispersão de energia (EDS) das fibras	71
4.2.3	Ensaio de tração na flexão	75
4.2.4	Ensaio de compressão axial	79
4.2.5	Absorção de água por capilaridade e densidade no estado endurecido	81
5.	CONCLUSÃO.....	84
	REFERÊNCIAS	86
	APÊNDICE A – RESULTADOS ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO NAS 3 IDADES	90
	APÊNDICE B – RESULTADOS ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NAS 3 IDADES.....	91

APÊNDICE C – RESULTADOS ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	92
--	-----------

1. INTRODUÇÃO

Embora o concreto apresente uma elevada resistência à compressão, é considerado propenso a fissuras quando submetido a esforços devidos à tensão de tração. Em estruturas convencionais, normalmente essas tensões são absorvidas por barras de aço. Porém, ao longo do tempo observou-se que a adição de fibras como reforço a esses concretos melhorou suas propriedades de resistência a tração (Pinto, 2019).

A inclusão de fibras fortalece mecanicamente o concreto, ajudando a reduzir e controlar a propagação de fissuras. O concreto reforçado com fibras e o concreto armado pertencem a uma categoria de materiais compósitos, caracterizados pela combinação de uma matriz frágil com algum tipo de elemento de reforço (Figueiredo, 2011).

A adição de fibras à matriz cimentícia proporciona ao material cimentício um aumento na tenacidade à flexão, bem como maior resistência à fadiga e ao impacto. Após o surgimento das primeiras fissuras, os concretos com fibras se tornam mais eficazes, pois as fibras atuam como pontes que transferem esforços entre as faces da trinca, o que contribui para uma maior capacidade de absorção de energia e limita a abertura e o avanço das fissuras (Castoldi, 2018).

À medida que a carga é aumentada, as tensões adicionais são transferidas para a matriz, e, quando a tensão de adesão é ultrapassada, novas fissuras se formam. Esse processo de formação de múltiplas fissuras continua até que a fibra se rompa ou seja arrancada (Mehta e Monteiro, 1994).

Quando se analisam compósitos reforçados com fibras vegetais, observa-se que a incidência de arrancamento das fibras é maior do que a ruptura. A microestrutura revela que a adesão entre a matriz e a fibra exerce um impacto significativo na tenacidade do material compósito (Savastano, 2000).

No entanto, a utilização de compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais apresenta desafios significativos, sendo o principal a garantia de sua durabilidade a longo prazo (Lopes et al., 2011). Essa limitação está diretamente relacionada a diversos mecanismos de degradação que afetam as fibras quando inseridas na matriz cimentícia. Os mecanismos de maior impacto são o ataque alcalino da matriz e a mineralização das fibras, ambos impulsionados pela alta alcalinidade do cimento e pela composição rica em minerais das próprias fibras (Wei, Meyer, 2015).

Para sanar a questão da durabilidade, duas estratégias principais têm sido amplamente investigadas. A primeira é a substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos, com o objetivo de consumir o hidróxido de cálcio e reduzir a alcalinidade da matriz. A segunda envolve a aplicação de tratamentos alcalinos às fibras, visando modificar sua superfície para melhorar a resistência e a compatibilidade com a matriz cimentícia (Fidelis, 2014).

O uso de fibras têxteis, como a juta, vem sendo ampliado na engenharia, especialmente quando é necessário alcançar produtos com desempenho superior (Lucena, 2017). Além disso, o baixo custo e fácil disponibilidade dessa fibra são vantajosos (Castoldi, 2018).

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de compósitos cimentícios reforçados com fibras híbridas, combinando fibras naturais e sintéticas, de modo a explorar os benefícios complementares de cada tipo de reforço. Para isso, serão elaborados compósitos com variações na hibridização dessas fibras, a fim de verificar os efeitos positivos proporcionados por diferentes proporções de juta e polipropileno no desempenho mecânico, na durabilidade e na microestrutura do material.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da adição de fibras de juta e de fibras de polipropileno nas propriedades frescas e endurecidas de compósitos cimentícios, bem como nas propriedades mecânicas, considerando diferentes teores de hibridização.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Analisar o efeito da hibridização das fibras de juta e polipropileno, avaliando diferentes teores de adição, quanto ao estado fresco quanto ao estado endurecido;
- b) Comparar os resultados mecânicos obtidos entre os compósitos com fibras híbridas, fibras isoladas (100% juta ou 100% polipropileno) e matriz sem fibras, por meio de ensaios de tração na flexão e compressão.

- c) Análise por MEV de compósitos cimentícios reforçados com 100% de fibra de juta e com 100% de fibra de polipropileno, para avaliar a distribuição e interação das fibras na matriz.
- d) Analisar a eficácia técnica da combinação entre a fibra de juta e a fibra de polipropileno na melhoria do comportamento pós-fissuração.

1.2 LIMITAÇÕES

Este trabalho se delimita à análise do comportamento mecânico de compósitos cimentícios com adição de fibras híbridas de juta e fibra de polipropileno, com ênfase nos tratamentos de hornificação em água e imersão em hidróxido de cálcio. Os ensaios realizados se restringem à resistência à compressão axial e à resistência à tração na flexão, em ambiente laboratorial. Todos os corpos de prova serão moldados com um único tipo de traço, mantendo-se constante a dosagem ao longo do estudo

Não serão abordados aspectos relacionados à análise econômica ou aplicação em estruturas reais, tampouco o uso de outros tipos de fibras ou aditivos além dos mencionados.

O trabalho conta com um número reduzido de composições testadas, o que limita a análise dos efeitos das fibras híbridas em diferentes dosagens. Também devido ao tempo disponível para a realização dos ensaios, os resultados serão avaliados apenas aos 7, 28 e 42 dias de cura, sem a possibilidade de acompanhar o comportamento do concreto em idades mais avançadas, o que poderia complementar melhor a análise do desempenho ao longo do tempo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos e pesquisas sobre compósitos cimentícios reforçados com fibras, abordando tanto fibras sintéticas quanto naturais. Também são discutidos os principais tratamentos aplicados às fibras, visando melhorar a adesão à matriz e o desempenho mecânico dos compósitos.

2.1 FIBRAS NATURAIS

As fibras naturais são por si mesmas materiais compósitos naturais, derivados de fontes biológicas, como plantas, animais e minerais. Apresentam diversas vantagens, como a sustentabilidade, a biodegradabilidade, além de serem renováveis e causarem menor impacto ambiental em comparação às fibras sintéticas (John e Thomas, 2008).

As fibras vegetais são um subgrupo importante das fibras naturais e podem ser obtidas de diferentes partes de uma determinada planta. Podem ser provenientes do caule, folha e sementes ou frutos das plantas. Defoirdt et al. (2010) discutem a classificação das fibras vegetais conforme a parte da planta de origem: caule (como juta e linho), folha (como sisal, banana e curauá), fruto (como coco) e gramíneas (como bambu).

Possuem uma estrutura orgânica formada por paredes celulares espessas, que envolvem cavidades internas chamadas lúmens. Essas paredes são constituídas principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, enquanto o lúmen representa o espaço vazio que percorre o interior da fibra (Fidelis, 2014). Thomas et al. (2011) descrevem a celulose como principal responsável pela resistência mecânica da fibra, enquanto a hemicelulose e a lignina atuam como agentes de ligação e conferem a rigidez, influenciando a flexibilidade e a resistência à degradação.

A Tabela 1 apresenta a composição química de algumas fibras vegetais.

Tabela 1 - Composição química de fibras vegetais

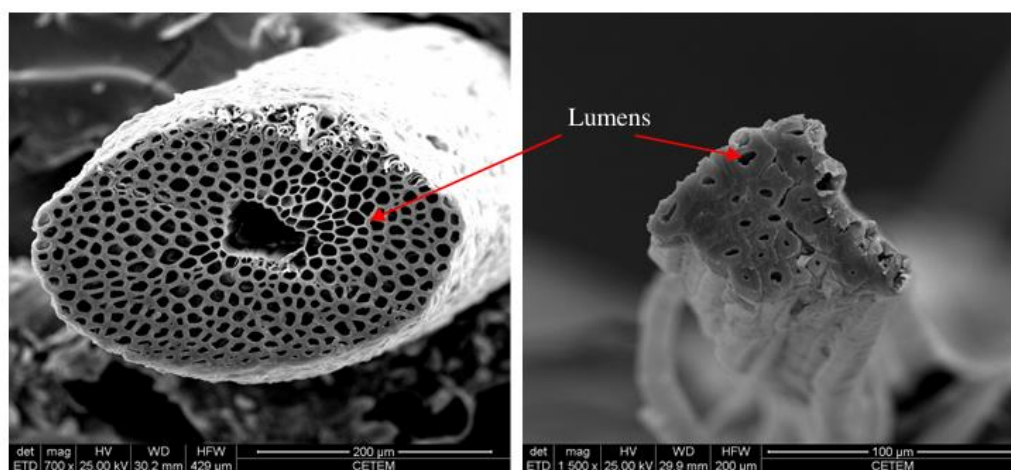
Fibras	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
Sisal	59,5	18,4	11,9
Juta	72,0	12,8	8,1
Curauá	59,4	19,1	14,4

Fonte: Fidelis (2014) apud Mendonça (2018).

Do ponto de vista físico, apresentam uma estrutura celular formada por camadas de microfibrilas de celulose, organizadas de maneira a conferir resistência à tração e durabilidade. A disposição dessas microfibrilas e o nível de cristalinidade da celulose são fatores cruciais que influenciam as propriedades mecânicas das fibras (Mendonça, 2018).

Embora as fibras naturais possuam uma estrutura celular padrão, elas apresentam variações em alguns aspectos, como a área total e real da seção transversal, levando em conta a subtração da área dos lúmens (cavidade interna ou o espaço vazio na célula, como representa a Figura 1), o número de fibras e a espessura das paredes celulares (Fidelis, 2014). Além disso, propriedades mecânicas, como resistência à tração, alongamento e módulo de elasticidade podem variar de acordo com a parte da planta de origem que a fibra é extraída, bem como dos tratamentos que podem ser aplicados a ela (Defoirdt et al., 2010). A Tabela 2 apresenta valores para comparação de algumas características de três diferentes fibras naturais.

Figura 1 - Micrografias das fibras de coco e juta, respectivamente



Fonte: Fidelis (2014).

Tabela 2 - Área e diâmetro de lúmens em tipos de fibras vegetais

Fibras (40mm)	Área lumens	Espessura da parede fibrocelular (µm)	Diâmetro dos lumens (µm)	Quantidade de fibrocélulas	Área Real (mm²)	Área total (mm²)
Curauá	162,2	3,5	4	12	0,003838	0,004
Juta	1014,1	2,5	6,7	26	0,002986	0,004
Sisal	5796,9	2,6	8,2	144	0,017203	0,023

Fonte: Fidelis (2014)

Observando os dados apresentados na Tabela 2 e Tabela 3, é possível perceber que a fibra de sisal apresentou maior área total e número de lúmens em comparação às fibras de curauá e juta, além de paredes celulares mais espessas que as do curauá. Apesar disso, o curauá teve a maior resistência à tração, atribuída à sua menor área de lúmens e maior espessura de parede celular. Já sisal e juta, embora com paredes celulares semelhantes, diferem no desempenho mecânico devido à composição química, sendo que o sisal apresentou resistência à tração cerca de duas vezes maior que a juta (Fidelis, 2014).

Tabela 3 - Resultados do ensaio à tração para as fibras de curauá, juta e sisal

Fibras (40mm)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação (%)	Área (mm²)
Curauá	543 (260)	63,7 (32,5)	1,0 (0,2)	0004 (0,002)
Juta	249 (89)	43,9 (12,3)	0,6 (0,2)	0,004 (0,001)
Sisal	484 (135)	19,5 (4,5)	3,3 (1,6)	0,023 (0,007)

Fonte: Fidelis (2014)

Além disso, é válido ressaltar que diversos fatores podem afetar a qualidade das fibras vegetais, conforme apresentado no Quadro 1, podendo ocasionar em variações nas propriedades das fibras de mesma espécie.

Quadro 1 - Fatores que influenciam nas propriedades da fibra

Estágio	Fatores que influenciam nas propriedades da fibra
Crescimento das plantas	Espécie da planta
	Cultivo
	Localização do plantio
	Localização da fibra na planta
	Clima local
Colheita	Maturação da fibra
Extração da fibra	Processo de decortificação
Fornecimento	Condições de transporte e de armazenamento
	Idade da fibra

Fonte: Adaptado de Dittenber e Gangarão (2012).

As fibras vegetais apresentam algumas limitações quando utilizadas em matrizes de cimento. Entre elas, destaca-se a baixa aderência com a matriz e a fragilidade

intrínseca. Outra desvantagem apontada na literatura é a diminuição da capacidade de reforço estrutural ao longo do tempo, causada pela reação dos componentes das fibras naturais, como lignina e hemicelulose, com o hidróxido de cálcio presente no concreto (Tolêdo Filho et al., 2000).

Apesar destes obstáculos, as fibras vegetais são consideradas uma alternativa promissora para reforço em compósitos devido à sua sustentabilidade, baixo custo e as propriedades mecânicas (Castoldi, 2018). Ainda, segundo Zukowski (2017), as fibras naturais apresentam vantagens ambientais e podem substituir fibras sintéticas em diversas aplicações, desde que submetidas a tratamentos adequados para melhorar sua durabilidade e desempenho. Além disso, sua biodegradabilidade e leveza contribuem para a redução do impacto ambiental e do peso das estruturas, tornando-as cada vez mais valorizadas na engenharia de materiais.

Entre as fibras vegetais, a juta se destaca por ser a mais econômica e acessível, apresentando também uma resistência à tração e ao fogo, além de ser reutilizável e sustentável (Song et al., 2021).

Enquanto as fibras naturais se destacam pela sustentabilidade, baixo custo e por serem uma alternativa renovável, as fibras sintéticas, como o polipropileno, são amplamente utilizadas devido à sua regularidade dimensional, elevada durabilidade e bom desempenho em ambientes agressivos. As fibras sintéticas vêm sendo amplamente utilizadas em compósitos cimentícios devido às suas propriedades mecânicas favoráveis, durabilidade e viabilidade econômica (Quinino, 2015).

2.1.1 Fibra de Juta

A juta é uma fibra natural extraída de plantas do gênero *Corchorus*, pertencentes à família Tiliaceae. No Brasil, seu cultivo ocorre predominantemente às margens dos rios Solimões e Amazonas, onde o plantio acompanha o ciclo das marés. A obtenção da fibra envolve etapas como corte, maceração, trituração, secagem, enfardamento e classificação (Rahman, 2010 apud Mendonça, 2018). A Figura 2 demonstra a planta a qual é extraída a fibra de juta (a) e a fibra de juta após a extração (b)

Figura 2 – Planta de onde é extraída a fibra de juta (a) e fibra de juta após a extração



Fonte: Sarkar (2020).

Tradicionalmente, a juta é amplamente empregada na fabricação de embalagens, revestimentos e peças artesanais. Contudo, suas propriedades mecânicas e sua biodegradabilidade também a tornam um material de interesse para aplicações técnicas, como isolamentos, revestimento de pavimentos, proteção de taludes e utilização como geotêxtil para estabilização de solos e controle de erosão (GRAUPNER; MÜSSIG, 2010 apud. Fidelis, 2014).

2.2 FIBRAS SINTÉTICAS

As fibras poliméricas são compostas por polímeros, que são macromoléculas formadas pela repetição de unidades estruturais menores chamadas monômeros. Esses monômeros podem ser obtidos de diversas fontes, como petróleo, madeira, álcool, gás natural, e até mesmo fontes renováveis, como biopolímeros derivados de plantas. Dentre elas, destacam-se as fibras de polipropileno, poliéster e vidro (Dias, 2019).

De acordo com Bentur e Mindess (2007), o uso de fibras sintéticas em compósitos cimentícios não tem como foco principal o aumento da resistência à compressão, mas sim a melhora na ductilidade e no desempenho do material após o surgimento de fissuras. Essas fibras também apresentam vantagens como leveza, facilidade de manuseio e adaptação aos métodos tradicionais de mistura e aplicação do concreto, sendo aplicadas tanto em elementos estruturais quanto não estruturais.

Diferentemente das fibras vegetais, as fibras sintéticas apresentam maior estabilidade química em ambientes alcalinos, o que favorece a durabilidade e a adesão à matriz cimentícia (Figueiredo, 2011). A busca por alternativas sustentáveis dentro dessa categoria tem incentivado o uso de fibras sintéticas recicladas. Mo et al. (2018) estudaram

a incorporação de fibras de poliéster recicladas provenientes de garrafas PET no concreto e observaram aumento da resistência à tração na flexão e da tenacidade após a fissuração, além de redução na permeabilidade e absorção de água. Já Spadea et al. (2014) analisaram fibras de náilon recicladas de redes de pesca descartadas e identificaram ganhos expressivos em tração (até 35%) e tenacidade (até 13 vezes), mesmo com uma leve redução na resistência à compressão em misturas com fibras curtas. Apesar dessas contribuições, o uso de fibras sintéticas está associado a impactos ambientais mais elevados, principalmente em função do alto consumo energético e das emissões de gases de efeito estufa.

Dentre as opções de fibras sintéticas, a fibra de polipropileno (PP) é uma das mais comuns na construção civil. A fibra de PP, além da compatibilidade com a matriz cimentícia e estabilidade em ambientes alcalinos, contribui significativamente para a durabilidade dos compósitos. Segundo Silva et al. (2010), o uso de fibras de polipropileno em materiais cimentícios melhora o desempenho frente à formação e propagação de fissuras, reduz a permeabilidade e minimiza os efeitos de retrações, o que reforça seu potencial como alternativa técnica e sustentável para o reforço de materiais cimentícios, especialmente em contextos que exigem controle de fissuração e maior vida útil das estruturas.

2.2.1 Fibra de polipropileno

As fibras de polipropileno podem ser classificadas em dois tipos principais: microfibras e macrofibras. As microfibras, por sua vez, subdividem-se em monofilamento e fibriladas, como ilustrado na Figura 3. As fibras monofilamento consistem em fios contínuos cortados em comprimentos padronizados, enquanto as fibriladas apresentam uma estrutura em malha formada por finos filamentos com seção retangular. Essa configuração em rede favorece a aderência à matriz de cimento por meio do efeito de intertravamento mecânico, melhorando a transferência de esforços (Bentur; Mindess, 1990; Figueiredo, 2011).

Figura 3 - Fibras de polipropileno do tipo fibrilado (a) e do tipo monofilamento (b)



Fonte: Figueiredo (2011).

Já as macrofibras são fibras mais espessas e longas, como mostra a Figura 4, desenvolvidas para atuar como reforço estrutural, de maneira similar às fibras de aço. Essas fibras têm como objetivo proporcionar um controle mais eficaz da fissuração nas fases iniciais do concreto para pavimentos, além de contribuir com o reforço mecânico quando o material está endurecido. São aplicadas principalmente em concretos destinados a estruturas que requerem resistência à tração e maior capacidade de absorção de impactos (Almeida et al., 2017).

Figura 4 - Macrofibras de polipropileno



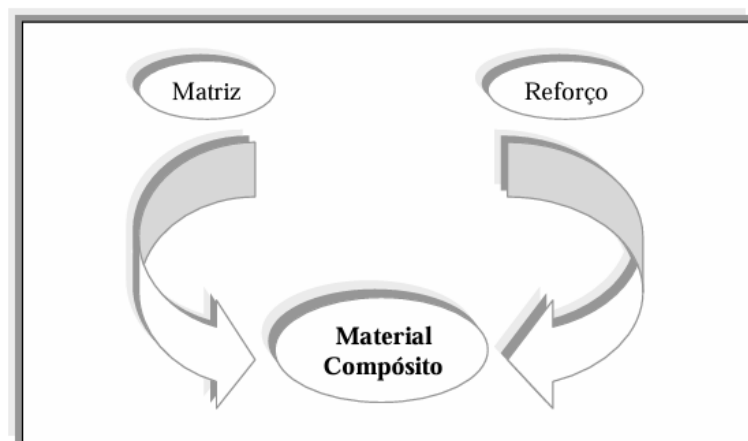
Fonte: Figueiredo (2010)

2.3 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS

O compósito é definido como um material multifásicos que apresentam propriedades distintas das de seus constituintes (ASTM D3878, 2023). São formados pela combinação de dois ou mais materiais, como demonstrado na Figura 5, que são insolúveis

entre si. Esses materiais são unidos com o objetivo de criar um novo material de engenharia com propriedades que não seriam alcançadas por seus componentes individualmente. Embora os compósitos sejam inerentemente heterogêneos em uma escala microscópica, é possível que, em uma escala macroscópica, eles se assemelhem a um material homogêneo.

Figura 5 - Material compósito



Fonte: Callister (2002)

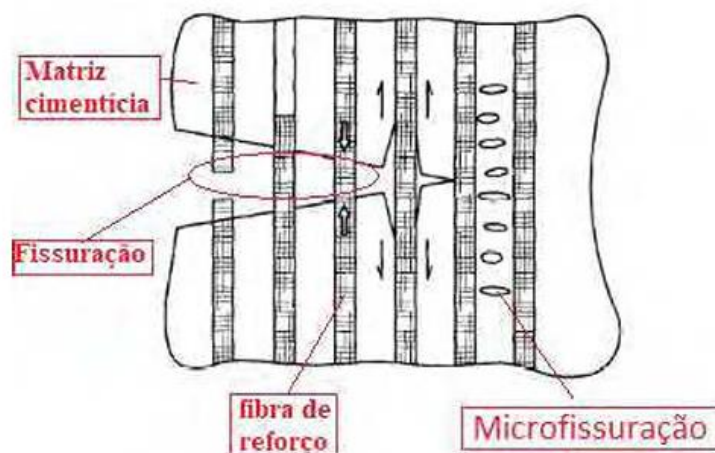
O uso de fibras como reforço em matrizes remonta às civilizações antigas, quando palha e capim eram incorporados à produção de tijolos de barro cru, conhecidos como adobe (Tessaro et al., 2015).

As fibras utilizadas como reforço são classificadas de duas maneiras: macrofibras e microfibras. As macrofibras são empregadas com a finalidade de reforçar mecanicamente o compósito, contribuindo para o aumento da resistência a esforços como tração e compressão. Em contrapartida, as microfibras atuam principalmente na prevenção de fissuras, geralmente associadas à retração do material durante a fase de endurecimento (Figueiredo, 2011).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), o concreto que incorpora fibras naturais ou sintéticas em sua composição é denominado concreto reforçado com fibras (CRF). Assim como o concreto armado tradicional, o CRF pertence à classe dos compósitos, caracterizados por uma matriz frágil (o concreto) reforçada por um elemento resistente à tração (barras de aço ou fibras). Enquanto o concreto convencional apresenta ruptura frágil sob tração, o CRF, após a primeira fissuração, é capaz de suportar esforços adicionais devido à atuação das fibras, mantendo carga residual e maior capacidade de deformação antes da ruptura final.

Sendo assim, possibilita ao material suportar deformações mais elevadas após a formação dessas fissuras, favorecendo o surgimento de múltiplas microfissuras em vez de uma ruptura frágil e repentina, como mostra a Figura 6, o que resulta em um aumento expressivo da tenacidade do compósito (Li, 2004).

Figura 6 - Formação das microfissurações



Fonte: Santos (2013).

Na década de 1960 iniciou-se os primeiros estudos sobre o comportamento de compósitos cimentícios com adição de fibras. Um dos trabalhos pioneiros foi conduzido por Romualdi e Mandel (1964), que analisaram o efeito da inserção aleatória de fibras metálicas curtas em amostras de concreto submetidas a esforços de tração indireta e flexão. O estudo permitiu estabelecer correlações entre a resistência à tração e o espaçamento das fissuras, além de contribuir para a compreensão dos mecanismos de fissuração em materiais com fibras distribuídas de forma aleatória.

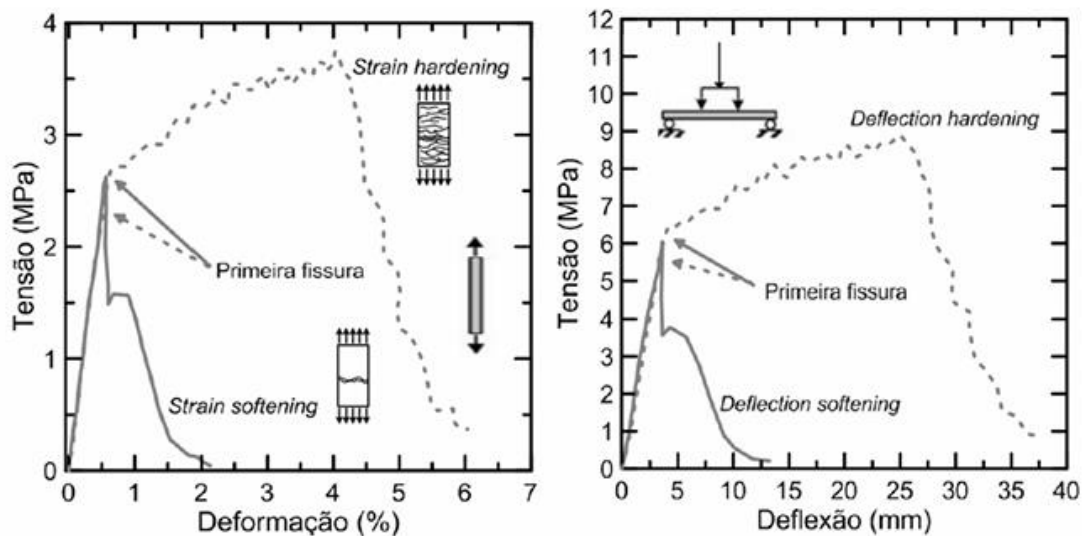
Com foco nas fibras sintéticas, Hannant (1978) destacou o potencial do polipropileno na melhora da resistência ao impacto e na mitigação de fissuras por retração plástica. Já Bentur e Mindess (1990) consolidaram grande parte do conhecimento sobre compósitos cimentícios, discutindo os mecanismos de fissuração, a contribuição das fibras para o aumento da tenacidade e os efeitos sobre a ductilidade do material. Zollo (1997) acrescenta que o desempenho do CRF está diretamente relacionado ao tipo de fibra utilizada, sua geometria, forma de distribuição e orientação no compósito, bem como o seu nível de concentração, além das propriedades intrínsecas da matriz cimentícia.

De acordo com Santos (2013), um dos principais desafios na produção de compósitos cimentícios é assegurar uma adesão eficaz entre a fibra de reforço e a matriz de cimento, pois essa ligação é fundamental para a transferência de tensões e, conseqüentemente, para o desempenho mecânico do compósito.

Em materiais compósitos, as tensões aplicadas são suportadas de forma conjunta pela matriz e pelas fibras, onde parte dessas tensões é resistida pela matriz e parte pelas fibras. A transferência de esforços entre esses dois componentes ocorre por meio da aderência na interface, caracterizada por tensões de cisalhamento que permitem a interação mecânica entre a fibra e a matriz que a reveste (Lima, 2004).

O comportamento dos compósitos cimentícios reforçados com fibras após a formação da primeira fissura pode ser classificado, nos ensaios de tração direta, como endurecimento por deformação (*strain hardening*) ou amolecimento por deformação (*strain softening*). No caso do endurecimento por deformação, mesmo após a primeira fissura, o material continua resistindo e pode até suportar tensões maiores, devido à atuação das fibras, que controlam a fissuração e permitem a formação de múltiplas microfissuras com aberturas inferiores a 100 micrômetros. Já nos compósitos com comportamento de amolecimento por deformação, após a fissura inicial, a resistência à tração diminui, indicando uma menor capacidade do material em manter sua integridade estrutural. Em ensaios de flexão, utiliza-se a classificação endurecimento por deflexão (*deflection hardening*) ou amolecimento por deflexão (*deflection softening*), com base no comportamento da curva tensão-deslocamento após a fissura. O endurecimento por deflexão ocorre quando o compósito continua resistindo mesmo com o aumento do deslocamento, enquanto no amolecimento por deflexão a resistência diminui progressivamente (Naaman e Reinhardt, 2006). Esse comportamento descrito pelos autores é retratado na Figura 7.

Figura 7 - Comportamento de compósitos reforçados com fibras submetidos a ensaios de tração direta (esquerda) e flexão (direita)

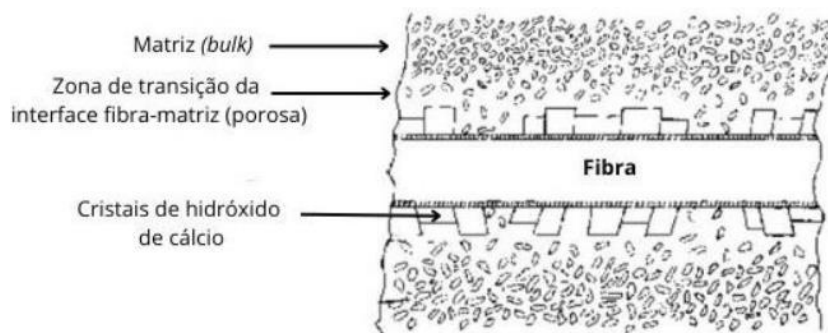


Fonte: Mendonça (2018).

A adesão entre a fibra e a matriz é essencial para o desempenho mecânico dos compósitos cimentícios reforçados com fibras, ocorrendo por três mecanismos principais: cisalhamento, tração e mecânico. O cisalhamento, mais comum, envolve transferência de tensões paralelas ao eixo da fibra, inicialmente por adesão físico-química e, depois da coesão, por atrito (Lima, 2004). O mecanismo por tração resiste a deslocamentos perpendiculares à interface, embora seja difícil de quantificar (Bentur; Mindess, 1990). Já o mecânico depende de irregularidades nas fibras, como rugosidades ou ganchos, que promovem o encaixe na matriz e aumentam a resistência ao arrancamento (Naaman; Najm, 1991). Esses três mecanismos atuam de forma conjunta e determinam a capacidade de transferência de carga entre a matriz e a fibra, influenciando diretamente a tenacidade e o comportamento pós-fissuração do compósito.

Em materiais compósitos à base de cimento, a aderência entre as fibras e a matriz é otimizada quando há uma interação eficaz entre ambas as fases. Essa interação é favorecida pela melhoria da zona de transição, também conhecida como zona interfacial (Savastano, 1992). A zona de transição apresenta propriedades distintas do restante da matriz, sendo geralmente mais porosa e contendo uma maior concentração de cristais de portlandita (hidróxido de cálcio), como é demonstrado na Figura 8.

Figura 8 - Zona de transição



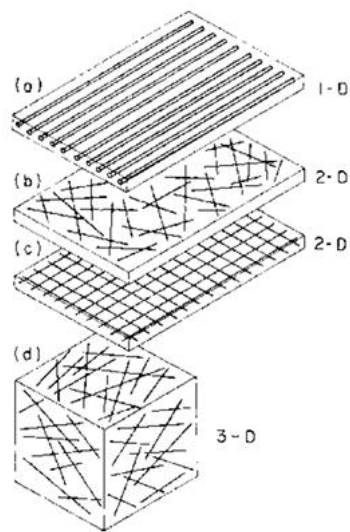
Fonte: Bentur e Mindness (2007).

Savastano Jr. e Agopyan (1999) destacam que essa porosidade elevada pode comprometer a aderência fibra-matriz, tornando a zona de transição um ponto vulnerável à propagação de fissuras. Para melhorar a adesão na interface fibra-matriz, é fundamental reduzir a porosidade e a concentração de portlandita na zona de transição. Isso pode ser alcançado por meio de práticas como a otimização da relação água/cimento e a aplicação de tratamentos superficiais nas fibras, visando à melhoria da compatibilidade físico-química entre as fases.

Os compósitos cimentícios podem ser reforçados por dois tipos principais de arranjos de fibras, classificados de acordo com o comprimento e a forma de incorporação das fibras na matriz (Bentur, Mindness, 2007). O primeiro tipo é o reforço contínuo, que utiliza fibras longas dispostas de maneira ordenada. Essas fibras podem ser aplicadas por técnicas como enrolamento filamentar, pultrusão ou laminação manual com sobreposição de mantas, permitindo uma orientação direcionada do reforço e, conseqüentemente, maior desempenho mecânico em direções específicas.

O segundo tipo é o reforço descontínuo, composto por fibras curtas e discretas, geralmente com comprimento inferior a 50 mm. Essas fibras são incorporadas à matriz por processos como mistura direta ao cimento ou pulverização simultânea com a pasta ou argamassa. Esse tipo de reforço promove uma dispersão mais aleatória, proporcionando resistência mais uniforme, embora menos direcionada, e é frequentemente utilizado em concretos reforçados com fibras. Além disso, os autores ainda afirmam que o arranjo das fibras na matriz pode ser classificado de acordo com a dimensionalidade da sua distribuição, como apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Formas de distribuição da fibra



Fonte: Bentur; Mindess (1990)

De acordo com Naaman (2003), para que as fibras sejam eficazes em conjunto com a matriz cimentícia, é desejável que apresentem resistência à tração e adesão superiores às da própria matriz. Além disso, um módulo de elasticidade mais elevado que o do concreto também é apontado como uma característica favorável. No entanto, fibras poliméricas, como o polipropileno, não atendem a esse critério, pois possuem módulo de elasticidade inferior ao da matriz.

Para superar essa limitação, as fibras poliméricas, têm sido submetidas a modificações e tratamentos que visam aprimorar propriedades essenciais, como o módulo de elasticidade e a aderência à matriz cimentícia (Bentur; Mindess, 2007).

Ainda assim, diversos estudos demonstram que, mesmo com essa limitação, essas fibras são capazes de promover melhorias nas propriedades mecânicas do compósito, especialmente no controle de fissuração (Caceres, 2016).

Salvador e Figueiredo (2013) destacam que diversas características intrínsecas das fibras influenciam diretamente as propriedades finais do compósito. Além do tipo de material utilizado, aspectos como a geometria das fibras, as características da superfície que afetam a interação fibra-matriz, e a dosagem volumétrica das fibras no concreto desempenham papel fundamental no desempenho do concreto reforçado. No caso das fibras vegetais, porém, há uma delicadeza adicional, pois fatores relacionados ao cultivo, processamento e origem, como mencionado no Quadro 1, podem causar variações significativas entre fibras da mesma espécie, resultando em diferenças nas propriedades.

Tonoli et al. (2011) investigaram compósitos cimentícios reforçados com sistemas híbridos de fibras. O estudo teve como objetivo avaliar o desempenho físico, mecânico e microestrutural de compósitos cimentícios produzidos pela técnica de desaguamento da pasta, seguidos de prensagem e cura ao ar. Os compósitos foram reforçados com sistemas híbridos de fibras, compostos por 2,8% em volume de polpa kraft de sisal e 2,6% em volume de fibras de polipropileno (PP), variando o grau de refino da polpa. Os compósitos foram analisados em diferentes idades, incluindo após 50 e 100 ciclos de envelhecimento acelerado e após 1 ano de envelhecimento natural.

Os resultados mostraram que o refino da polpa vegetal teve grande influência positiva na resistência mecânica dos compósitos. A tenacidade dos compósitos híbridos foi mantida ou aumentada após o envelhecimento, diferentemente do que ocorre em compósitos exclusivamente vegetais, nos quais há perda significativa de desempenho devido à mineralização das fibras. Esse comportamento foi atribuído à ação sinérgica entre as fibras: enquanto a polpa refinada melhora o empacotamento e a ancoragem na matriz, as fibras de PP contribuem para a absorção de energia por atrito no arrancamento, promovendo um comportamento pseudoplástico e maior resistência à fissuração.

2.3.1 Dosagem de compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais

Islam e Ahmed (2018) estudaram a influência da adição de fibras de juta nas propriedades frescas e endurecidas do concreto. Para isso, utilizaram fibras de juta, com dois comprimentos distintos, de 10 mm e 20 mm, e quatro frações volumétricas: 0,00%, 0,25%, 0,50% e 1,00%. Os resultados demonstraram que a incorporação de fibras de juta na fração volumétrica de 0,25% promoveu uma melhoria nas propriedades endurecidas do concreto, enquanto a dosagem de 0,50% foi identificada como a mais eficiente para aumentar a resistência à tração por compressão diametral, especialmente para fibras com comprimento de 20 mm. Contudo, verificou-se que dosagens superiores a 0,50% ocasionaram a redução do desempenho, atribuída à formação de vazios e má distribuição das fibras na matriz cimentícia.

O comprimento médio das fibras é um parâmetro fundamental na avaliação das propriedades mecânicas dos compósitos. Em geral, o comprimento das fibras varia entre 10 mm e 50 mm (Bernardi, 2003). O efeito do comprimento da fibra foi constatado por Berke e Dallaire (1994), os autores observaram reduções de até 80% na área de fissuras

para fibras com 50 mm de comprimento e de 39% para fibras com 13 mm, mantendo-se o mesmo teor de adição.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos em diferentes estudos para os ensaios de compressão, tração e flexão, juntamente com as dosagens de fibras utilizadas.

Tabela 4 – Traços de referências

Referência	Fibra	Traço	Comprimento da Fibra (mm)	Fração volumétrica de Fibra (%)
Fidelis (2014)	Juta	1: 1: 0,4	25	2; 6 e 10
Ferreira (2016)	Curauá, Juta e Sisal	1: 0,5: 0,4	5, 10, 25 e 50	
Melo Filho (2005)	Sisal	1: 1: 0,4	25	2; 6 e 10
Carmello (2021)	Coco verde	1: 0,43: 0,35	25	10
Lima et al. (2011)	Curauá	1: 3: 0,53	5, 10 e 15	0,4; 0,6 e 0,8
Pimentel et al. (2016)	Curauá	1: 1: 0,59	25 e 45	2 e 3

Fonte: Autor (2025).

Fidelis (2014) realizou um estudo com fibras de juta cortadas em 25 mm, incorporadas em compósitos cimentícios. O traço utilizado foi de 1:1:0,4 (cimento: areia: relação água/cimento), com frações volumétricas de fibra de 2%, 6% e 10%. O autor observou que a adição de 6% de fibras proporcionou o melhor equilíbrio entre resistência mecânica e tenacidade, reduzindo a propagação de fissuras e aumentando a ductilidade do compósito. Entretanto, a fração de 10% comprometeu a trabalhabilidade e resultou em elevada porosidade.

Ferreira (2016) utilizou fibras de curauá, juta e sisal com comprimentos de 5 mm, 10 mm, 25 mm e 50 mm, no traço de 1:0,5:0,4. A pesquisa evidenciou que as fibras de curauá com comprimento de 25 mm apresentaram o melhor desempenho mecânico, promovendo aumentos na resistência à tração e no módulo de elasticidade. Comprimentos

superiores a 25 mm resultaram em problemas de dispersão e aglomerados de fibras, prejudicando as propriedades do compósito.

Melo Filho (2005) conduziu experimentos com fibras de sisal tratadas quimicamente, cortadas em 25 mm e 50 mm, e inseridas em traços de 1:1:0,4 com frações volumétricas de 2%, 4% e 6%. Os resultados indicaram que a fração de 4% com fibras de 25 mm apresentou o melhor desempenho, com aumento da resistência à tração na flexão e significativa melhoria na ductilidade do material. Frações superiores comprometeram a coesão da matriz, enquanto comprimentos maiores dificultaram a dispersão homogênea.

Carmello (2021) investigou o uso de fibras de coco verde com comprimento médio de 25 mm em traço de 1:0,43:0,35, com teor de fibra de 10% em relação à massa de cimento. O estudo concluiu que essa proporção melhorou a resistência à tração na flexão e reduziu a propagação de fissuras. No entanto, a elevada quantidade de fibras também aumentou a absorção de água e reduziu a resistência à compressão, indicando a necessidade de equilíbrio entre o teor de fibra e as propriedades desejadas.

Lima et al. (2011) estudaram compósitos reforçados com fibras de curauá de 5 mm, 10 mm e 15 mm, utilizando o traço de 1:3:0,53 e frações volumétricas de 0,4%, 0,6% e 0,8%. O melhor desempenho foi obtido com fibras de 10 mm e fração volumétrica de 0,6%, resultando em maior resistência à tração e menor propagação de fissuras. Frações superiores de fibras aumentaram a porosidade e reduziram a resistência à compressão.

Pimentel et al. (2016) realizaram ensaios com fibras de curauá de 25 mm e 45 mm, no traço de 1:1:0,59, com frações volumétricas de 2% e 3%. O estudo demonstrou que a adição de 2% de fibras de 25 mm proporcionou os melhores resultados, com ganhos expressivos na resistência pós-fissura e na tenacidade do compósito. O aumento da fração volumétrica ou do comprimento das fibras resultou em maior dificuldade de homogeneização e queda no desempenho mecânico.

Assim, observa-se que o desempenho dos compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais depende fortemente da escolha adequada do comprimento e da fração volumétrica das fibras, sendo necessário um equilíbrio entre resistência mecânica, trabalhabilidade e durabilidade.

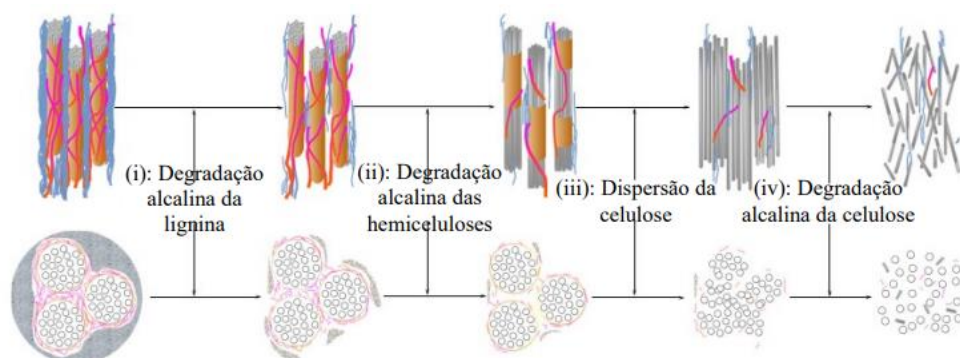
2.4 TRATAMENTOS SUPERFICIAIS EM FIBRAS NATURAIS

Com o objetivo de aumentar a durabilidade dos compósitos, diferentes tratamentos têm sido aplicados às fibras vegetais, visando à remoção de impurezas

superficiais, à melhoria da estabilidade dimensional e ao aprimoramento da transferência de tensões entre a fibra e a matriz (Silveira, 2018).

Wei e Meyer (2015) descreveram quatro etapas progressivas no processo de degradação de fibras naturais em matriz cimentícia, provocado pela alta alcalinidade do meio, como indicado na Figura 10. Inicialmente ocorre degradação da lignina e de parte das hemiceluloses, expondo a holocelulose (celulose e hemiceluloses). Em seguida, a perda da integridade da parede celular, permite a dispersão das microfibrilas nos poros da matriz. Na terceira fase, as microfibrilas de celulose se separam e se dispersam nos poros da matriz, acelerando sua degradação. Por fim, a hidrólise alcalina atinge as regiões amorfas da celulose, levando à falha das microfibrilas e à completa degradação da fibra.

Figura 10 - Quatro etapas progressivas no processo de degradação de fibras naturais



Fonte: Wei e Meyer (2015).

A lignina apresenta elevada solubilidade em meios alcalinos, e sua remoção constitui uma etapa fundamental no processo de polpação (Agopyan et al., 2005 apud. Machado, 2019).

Os tratamentos aplicados às fibras vegetais podem ser classificados como físicos ou químicos. Os tratamentos físicos, como ciclos de molhagem e secagem, têm como principal função promover alterações estruturais e melhorar a estabilidade dimensional das fibras. Já os tratamentos químicos visam proteger as fibras contra os efeitos do meio em que serão incorporadas, como a alcalinidade da matriz cimentícia, além de aprimorar a adesão entre a fibra e a matriz, favorecendo a transferência de tensões no compósito (Araujo, 2022).

O tratamento em meio alcalino melhora as propriedades das fibras naturais ao promover a remoção de componentes indesejados, como lignina, hemicelulose, ceras e outras impurezas presentes na superfície das fibras. Essa limpeza química aumenta a

rugosidade e a área de contato das fibras, favorecendo a adesão com a matriz cimentícia nos compósitos. Além disso, o meio alcalino provoca a exposição das microfibrilas de celulose, responsáveis pela resistência mecânica, o que contribui para um melhor desempenho estrutural do material reforçado. Dessa forma, o tratamento alcalino potencializa a compatibilidade entre fibra e matriz, resultando em compósitos com maior resistência e durabilidade.

2.4.1 Tratamento físico

A hornificação é um dos tratamentos físicos mais utilizados para o tratamento de fibras vegetais. Consiste em modificar permanente da estrutura de fibras vegetais através de ciclos de molhagem e secagem, resultando em menor absorção de água e maior estabilidade dimensional (Ferreira, 2016).

Segundo Luo et al. (2011), a hornificação fortalece as ligações entre as fibrilas por meio de ligações de hidrogênio, resultando em uma celulose de melhor qualidade. Esse processo causa encolhimento na estrutura da fibra, reduz a elasticidade da parede celular e modifica a distribuição do tamanho dos poros (Ballesteros et al., 2019).

Ferreira (2016) analisou o efeito de diferentes tratamentos superficiais em fibras de juta com 25 mm de comprimento. Um dos tratamentos consistiu em hornificação em água, através de ciclos de molhagem e secagem. Os resultados mostraram um aumento na capacidade de resistência à tração (543 MPa para 5 ciclos realizados, em comparação com 249 MPa sem tratamento), e na capacidade de deformação, mantendo o módulo de elasticidade praticamente inalterado.

Claramunt et al. (2011) estudaram o tratamento por hornificação, aplicando quatro ciclos de molhagem e secagem em fibras de polpa de celulose e algodão, com o objetivo de melhorar a durabilidade de compósitos cimentícios. Os compósitos produzidos com fibras tratadas apresentaram melhor desempenho mecânico, com aumento na resistência à flexão de 8% para celulose e 16% para algodão, além de uma maior energia de fratura. Após o envelhecimento, os compósitos tratados mantiveram resistência na pós-fissuração, ao contrário dos não tratados, que se comportaram como a matriz sem reforço, reduzindo a resistência.

2.4.2 Tratamento químico

Dentre os tratamentos químicos, o método alcalino é o mais utilizado para modificar a superfície das fibras e aprimorar suas propriedades (Moura, 2019).

O tratamento alcalino elimina componentes como lignina, hemicelulose e ceras das fibras naturais, aumentando a rugosidade e a área de contato da superfície. Isso favorece a adesão entre as fibras e a matriz cimentícia, além de expor as microfibrilas de celulose, que são responsáveis pela resistência mecânica. Como resultado, o compósito apresenta melhor desempenho estrutural, com maior resistência e durabilidade (Beltrami et. al, 2014).

Sedan et al. (2008) avaliaram tratamentos químicos em fibras de cânhamo para melhorar a adesão com a matriz cimentícia. O tratamento com NaOH aumentou a resistência à flexão em 39% ao remover ceras, impurezas e hemicelulose, enquanto o tratamento com cloreto de alumínio teve efeito modesto, com aumento de apenas 7%, pois removeu apenas ceras e impurezas sem alterar a estrutura química.

Ferreira realizou o tratamento alcalino em fibras de juta utilizando solução saturada de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) a 0,73%, com imersão por 50 minutos e posterior secagem a 40°C por 24 horas, avaliando os efeitos após 1, 5 e 10 ciclos. Ferreira observou que, após 1 ciclo, a resistência à tração das fibras aumentou significativamente, atingindo 687,16 MPa, em comparação aos 249,23 MPa das fibras sem tratamento. Após 5 ciclos, a resistência caiu para 416,54 Mpa, ainda 67% superior à das fibras naturais, enquanto que, com 10 ciclos, o valor reduziu-se para 362 MPa, aproximando-se dos valores das fibras não tratadas. O módulo de elasticidade também apresentou leve redução conforme o número de ciclos aumentou, passando de 48,3 GPa (1 ciclo) para 41,07 GPa (10 ciclos). Esses resultados mostram que o tratamento com hidróxido de cálcio é eficaz para melhorar as propriedades mecânicas da juta, mas que o excesso de ciclos compromete essa melhoria, evidenciando a necessidade de um controle adequado do processo. O autor ainda concluiu que o tratamento alcalino diminuiu a quantidade de hemicelulose presente na fibra, além de reduzir o pico relacionado à degradação da celulose.

Mendonça (2018) adotou o mesmo tratamento apresentado por Ferreira (2016), porém adotou apenas 1 ciclo de tratamento e testou em mais de um comprimento fibrilar (20,30 e 40cm). Após o tratamento, foram realizados ensaios de tração para avaliar o desempenho mecânico das fibras. Os resultados demonstraram que as fibras tratadas

apresentaram a maior resistência à tração entre os grupos analisados, com tensão máxima variando de 475 a 690 MPa e módulo de elasticidade superior a 35 GPa. Já as fibras de juta sem tratamento apresentaram tensões máximas inferiores a 307 MPa, com módulo de elasticidade acima de 22 GPa, evidenciando a eficácia do tratamento alcalino na melhoria das propriedades mecânicas das fibras. Na maioria dos grupos testados, os maiores valores de tensão foram obtidos para os menores comprimentos de fibra. Isso ocorre porque o aumento do comprimento eleva a probabilidade de ocorrência de danos na estrutura da fibra (Zukowski, 2017).

Osorio et al. (2010) investigaram fibras de bambu tratadas com soluções diluídas de hidróxido de sódio em concentrações de 1%, 3% e 5% por 20 minutos à temperatura ambiente. Os resultados mostraram que a resistência das fibras diminuiu à medida que a concentração do hidróxido de sódio aumentou.

Fidelis (2014) tratou fibras de juta com polímero estireno butadieno, formando uma barreira que protege as fibras dos produtos de hidratação da matriz. O tratamento aumentou a resistência à tração em filamentos (13%) e tecidos (22%), melhorando a resistência mecânica, mas reduziu em 16% a tensão no cordão isolado, possivelmente devido à interferência do polímero na sua estrutura.

2.4.3 Modificação da matriz

Com a finalidade de melhorar a durabilidade desses compósitos, além de modificação dos tratamentos realizados na fibra, utiliza-se de modificações na matriz com a intenção de reduzir a alcalinidade do meio. Como apontado por Silva et al. (2015), os produtos gerados na fase de hidratação do cimento, notadamente o hidróxido de cálcio e silicatos/aluminatos de cálcio hidratados, formam um meio que pode afetar os constituintes das fibras celulósicas, resultando na sua degradação ao longo do tempo.

Com o objetivo de minimizar este processo deletério, o emprego de uma matriz de baixo teor de Ca(OH)_2 é um requisito fundamental, conforme afirma Fidelis (2016). A estratégia mais eficaz para reduzir a alcalinidade da água dos poros é a substituição parcial do cimento Portland por materiais pozolânicos. Melo Filho, Silva e Toledo Filho (2013) relatam que este é o tratamento mais promissor para reduzir a degradação das fibras, pois o material pozolânico reage com o Ca(OH)_2 livre, consumindo-o e minimizando a alta alcalinidade do sistema. Diversos autores avaliaram a eficiência deste método, utilizando substituições com o metacaulim, a sílica ativa e outros materiais pozolânicos (Khorami,

Ganjian, 2013; Santos et al., 2014; Fidelis et al., 2016). De forma análoga, Bergström e Gram (1984) já haviam observado que a durabilidade de compósitos reforçados com fibras de sisal é aprimorada pela redução da alcalinidade, obtendo-se níveis de pH tão baixos (através da substituição de cimento por sílica ativa) que o compósito manteve resistência mesmo após envelhecimento acelerado.

Além da degradação química, o desempenho dos compósitos fibrosos é intrinsecamente ligado à qualidade da zona de transição. Mehta e Monteiro (2014) enfatizam que esta zona, onde ocorre a ligação entre a pasta de cimento e as fibras, possui características distintas do restante da matriz. Sendo uma região inerentemente mais porosa e os autores atribuem essa porosidade elevada como um dos principais efeitos causadores da má adesão entre fibra e matriz. Para combater essa fragilidade, o uso de um material pozolânico é capaz de melhorar significativamente a adesão interfacial. Ao reagir com o Ca(OH)_2 livre, o material pozolânico reduz a porosidade do meio e preenche os vazios da ZTI com C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado), criando uma interface mais densa, homogênea e, conseqüentemente, capaz de garantir maior transferência de tensões para as fibras.

3. METODOLOGIA

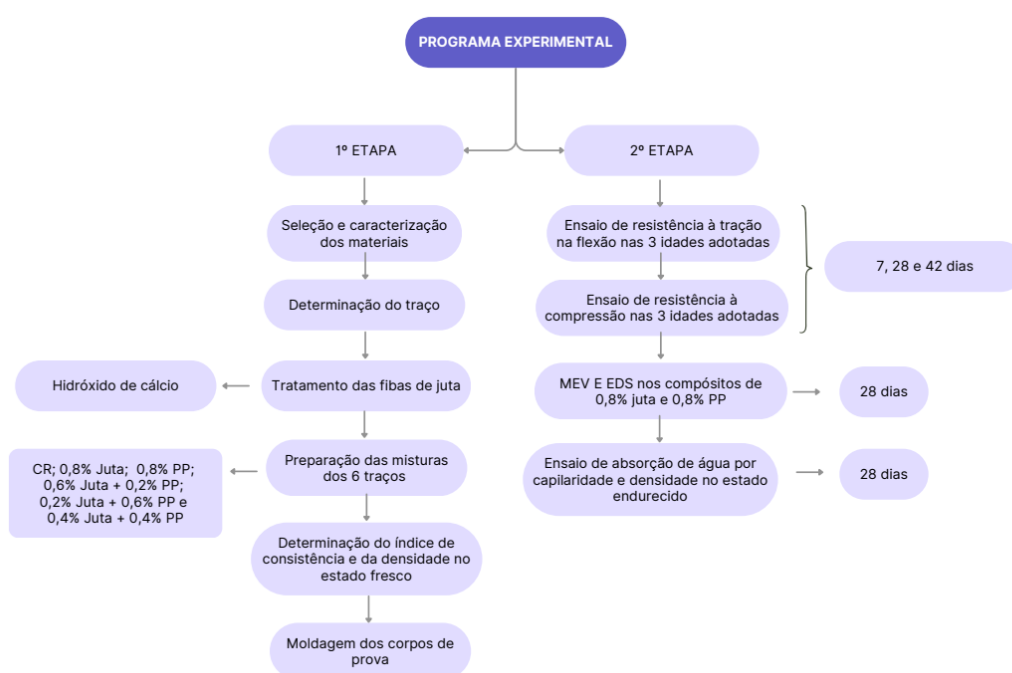
Este capítulo apresenta a metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa. São descritos os materiais utilizados, os procedimentos de preparação das fibras, a composição dos compósitos, bem como os ensaios realizados para a avaliação de suas propriedades.

3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

O estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras de juta e de polipropileno. Para a obtenção de resultados confiáveis necessita-se que uma metodologia específica e embasadas em normas seja seguida.

A metodologia adotada contempla as etapas de caracterização dos materiais, tratamento das fibras, preparo dos compósitos, moldagem dos corpos de prova e ensaios mecânicos. Para a execução dos procedimentos experimentais foi elaborado um fluxograma, como demonstra a Figura 11, que resume todas as etapas realizadas no desenvolvimento do trabalho.

Figura 11 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Autor (2025).

3.1.1 Compósito cimentício

Para este estudo, adotou-se o traço apresentado por Pinto (2019) e Chakraborty et al. (2013), conforme mostrado na Tabela 5, com substituição parcial de 30% do cimento por cinza da casca do arroz, conforme proposto por Rodrigues (2010). A escolha do traço baseou-se nos resultados satisfatórios obtidos por Pinto (2019), que utilizou fibras de curauá, visto que a fibra de curauá possui uma massa específica similar à da fibra de juta. Os resultados de Pinto (2019) demonstraram melhorias significativas nas propriedades mecânicas com a incorporação da fibra natural, especialmente na resistência à tração e à flexão. O intuito principal da substituição parcial do cimento, conforme proposto por Rodrigues (2010), foi o de reduzir a alcalinidade do meio cimentício, que é um fator conhecido por deteriorar a fibra, fazendo-a perder a resistência.

Tabela 5 - Traço utilizado na pesquisa

Materiais	Teores em massa
Aglomerantes	1
Agregado miúdo	3
Relação água/material cimentício	0,61

Fonte: Autor (2025).

Foram avaliados cinco teores diferentes de fibras, além do compósito de referência, com o objetivo de analisar o efeito da hibridização no compósito cimentício. Em todas as misturas reforçadas, manteve-se constante o teor total de fibras em 0,8% do volume do compósito, a variável de estudo foi a proporção relativa entre as fibras de Juta e Polipropileno para atingir esse total. A variação dos teores permitiu observar como a combinação das fibras influencia as propriedades físicas e mecânicas do material, tanto no estado fresco quando endurecido, possibilitando identificar a proporção mais eficiente para o desempenho desejado. O Quadro 2 apresenta as codificações adotadas para os traços dos compósitos, a fim de facilitar a identificação e análise comparativa entre os diferentes percentuais de fibra. Todos os traços foram analisados em 3 idades diferentes, aos 7, 28 e 42 dias.

Quadro 2 - Codificações para os traços

Código	Descrição do Traço
CR	Compósito de referência, sem incorporação de fibras
0,8J	Compósito com incorporação de 0,8% de fibra de juta
0,8P	Compósito com incorporação de 0,8% de fibra de polipropileno
0,6J+0,2P	Compósito com incorporação de 0,6% de fibra de juta e 0,2% de fibra de polipropileno
0,6P+0,2J	Compósito com incorporação de 0,6% de fibra de polipropileno e 0,2% de fibra de juta
0,4J+0,4P	Compósito com incorporação de 0,4% de fibra de juta e 0,4% de fibra de polipropileno

Fonte: Autor (2025).

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Aglomerante

O cimento utilizado neste estudo foi o CP II-F-40, que possui adição de filer calcário em sua composição. As especificações químicas e físicas estão indicadas nas Tabelas 6 e 7, respectivamente. A presença desse material contribui significativamente para a melhoria da trabalhabilidade da matriz cimentícia. O filer calcário tem partículas muito finas que preenchem os vazios entre os grãos maiores do cimento e dos agregados, funcionando como um lubrificante mineral. Isso aumenta a coesão do compósito e melhora a fluidez, facilitando a homogeneização da mistura e a dispersão das fibras, favorecendo a dispersão das fibras e reduzindo o risco de sua segregação.

Além disso, o CP II-F-40 apresenta uma reatividade moderada. A escassa atividade pozolânica do filer e sua menor alcalinidade resultam em uma hidratação menos agressiva em comparação aos outros CPs. Isso gera menos calor de hidratação, o que diminui o risco de fissuras térmicas ou por retração plástica.

Tabela 6 – Especificações químicas do fabricante para o CPII F-40

Químicos									
Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resíd. Insol.	Equiv. Alcal.
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
4,49	17,19	2,77	60,80	3,81	3,04	5,63	1,95	1,24	0,61

Fonte: Autor (2025).

Tabela 7 - Especificações físicas do fabricante para o CPII F-40

Físicos										
Exp Quente	Tempo de pega		Cons. Normal	Sup. Específica de Blaine	#200	#325	Resistência a compressão			
							1	3	7	28
mm	Início	Fim	%	cm ² /g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
0,30	197	246	28,3	4,498	0,06	0,53	25,7	39	44,4	51,3

Fonte: Autor (2025).

3.2.2 Adição mineral

A utilização de cinzas com baixo teor de carbono como substituição parcial do cimento contribui para a melhoria das propriedades mecânicas e da durabilidade dos compósitos cimentícios. Sua atividade pozolânica consome o hidróxido de cálcio, o principal álcali da matriz, e o converte em Silicato de Cálcio Hidratado. Esse processo de consumo alcalino reduzi o pH da matriz, o que é vital para favorecer a adesão interfacial entre fibras e matriz e diminuindo a suscetibilidade à deterioração das fibras. Além disso, as partículas de cinza não reagidas e os produtos de hidratação atuam no preenchimento dos poros, promovendo uma microestrutura mais densa, com menor porosidade total. Como resultado, os compósitos apresentam aumento da resistência mecânica e da estabilidade a longo prazo (Rodrigues et al, 2010). A cinza da casca do arroz utilizada nesse trabalho foi a da marca Silcca Nobre, cuja as características específicas estão indicadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades físicos químicas cinza da casca do arroz

Propriedades físicos químicas	Resultados
Umidade (%)	< 3
pH	Entre 8 e 10
Massa específica (g/cm ³)	Teor de SiO ₂
Superfície específica	15 à 20 m ² /g

Fonte: Autor (2025).

3.2.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado na matriz cimentícia desse estudo é a areia natural do leito de rio. Sua presença influencia diretamente na trabalhabilidade, coesão e resistência mecânica da argamassa. A função do agregado miúdo é preencher os vazios entre as partículas de cimento, proporcionando maior estabilidade dimensional e redução de retração, uma vez que limita a quantidade de pasta necessária e reduz a movimentação volumétrica associada ao processo de hidratação do cimento. A qualidade da areia, incluindo sua pureza e ausência de impurezas orgânicas ou argilosas, bem como sua distribuição granulométrica, é essencial para garantir um empacotamento adequado e uma matriz homogênea. De acordo com a NBR 7211 do ano de 2009, o agregado miúdo é constituído por partículas com diâmetro variando entre 0,075 mm e 4,8 mm. O Quadro 3 indica os ensaios indicados por norma para a caracterização do agregado miúdo.

Quadro 3 - Metodologia dos ensaios e suas normativas

Ensaio	Normativa
Massa Unitária dos Agregados	ABNT NBR NM 45
Massa Específica do Agregado Miúdo	ABNT NBR 9776
Diâmetro Máximo (mm)	ABNT NBR 17054
Módulo de Finura	

Fonte: Autor (2025).

A análise granulométrica tem como objetivo determinar a distribuição das partículas constituintes de um agregado, classificando-as conforme seus tamanhos. O procedimento foi realizado de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022). A Tabela 9 apresenta as quantidades retidas, em massa e em porcentagem, em cada peneira para as

duas amostras analisadas. A Tabela 10 informa a média retida e a retida acumulada do agregado miúdo.

Tabela 9 – Quantidade retida em massa e em porcentagem das amostras

Amostra	M1 (g)1:		M2 (g):		
	Abertura das peneiras (mm)	Determinação (%) Retida	Determinação (%) Retida		
	4,8	0,2	0	0,65	0
	2,36	9,01	3	12,2	4
	1,18	35,18	12	34,2	11
	0,6	91,3	31	85,49	29
	0,3	126,87	42	124,41	42
	0,15	34,06	11	39,9	13
	Fundo	3,5	1	2,84	1
	Total	300,12	100	299,69	100

Fonte: Autor (2025).

Tabela 10 - Resultados granulométricos agregado miúdo

Abertura das peneiras (mm)	Retida média (%)	(%) Retida acumulada média
4,8	0	0
2,36	3	3
1,18	12	15
0,6	30	45
0,3	42	87
0,15	12	99
Fundo	1	100
Total	100	

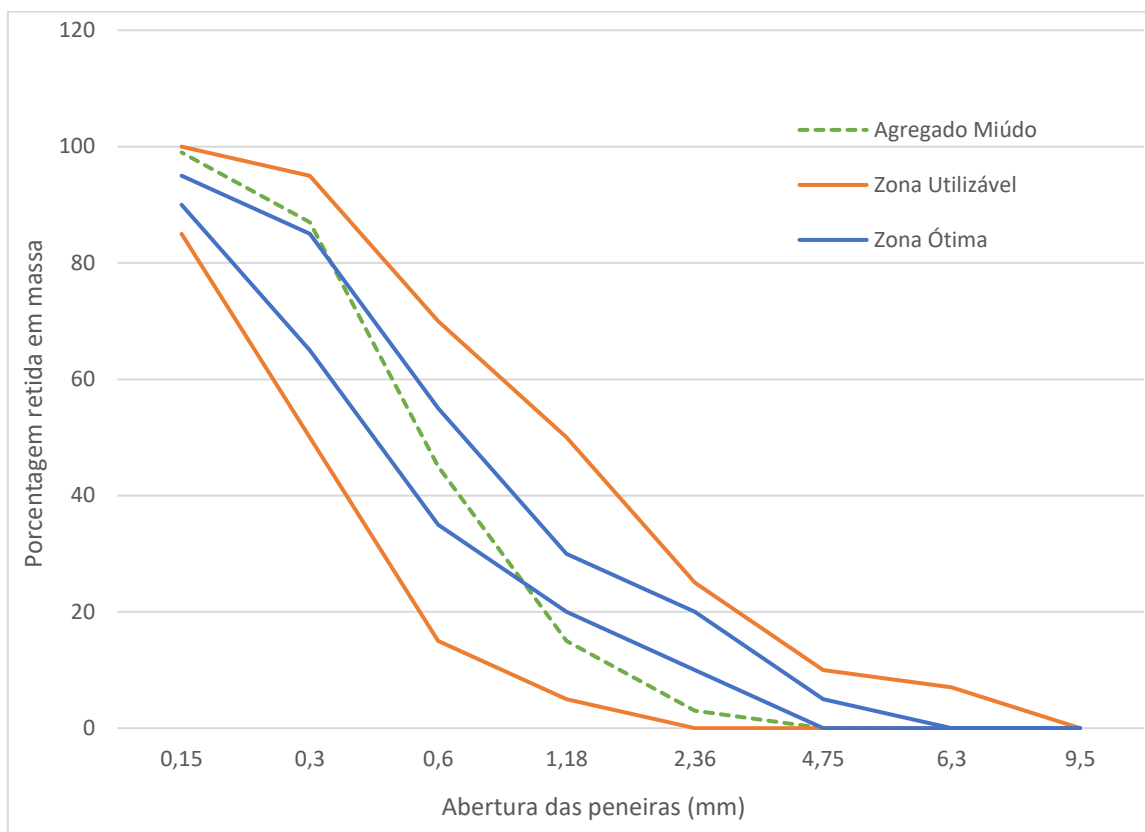
Fonte: Autor (2025).

A presença de partículas de diferentes tamanhos no agregado é fundamental para garantir uma boa compactação e homogeneidade do compósito cimentício, visto que promove uma distribuição mais uniforme das partículas, permitindo o preenchimento dos vazios do material. Essa característica favorece a trabalhabilidade da mistura e contribui para uma melhor resistência mecânica do compósito.

A caracterização granulométrica do agregado miúdo evidencia uma distribuição progressiva das partículas ao longo das diferentes aberturas de peneira. Observa-se que não há retenção nas peneiras de maior abertura, como a de 4,8 mm, mantendo-se em 0%, o que indica a ausência de partículas mais graúdas. Na peneira de 2,36 mm, registra-se uma retenção de 3%, a partir da peneira de 1,18 mm, nota-se um aumento mais perceptível, com 12% de material retido. O comportamento torna-se mais expressivo nas peneiras intermediárias. Na peneira de 0,6 mm, 30% do agregado é retido, alcançando um acumulado de 45%. Já na peneira de 0,3 mm ocorre o maior salto de distribuição, com 42% retidos e 87% acumulados, indicando forte predominância de partículas dessa faixa granulométrica. A peneira de 0,15 mm retém mais 12%, totalizando 99% antes do material passante, que representa apenas 1% do total.

A análise dos dados demonstra que o agregado apresenta uma gradação bem distribuída, com presença de partículas médias e finas, favorecendo uma compactação do conjunto. Essa distribuição contribui para o desempenho dos compósitos cimentícios, uma vez que reduz a quantidade de vazios e melhora a acomodação das partículas, fatores essenciais para propriedades como resistência mecânica e trabalhabilidade. Assim, a granulometria obtida confirma que o agregado miúdo utilizado é adequado para aplicações em compósitos cimentícios. Os resultados são apresentados graficamente por meio da curva granulométrica exibida na Figura 12.

Figura 12 - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autor (2025).

A caracterização dos agregados por meio dos ensaios de massa unitária, massa específica e granulometria é essencial para o controle de qualidade dos materiais utilizados. Esses parâmetros permitem definir proporções adequadas para o compósito, avaliar a densidade e compreender a distribuição do tamanho das partículas, prevenindo problemas como segregação, excesso de finos e descontinuidade granulométrica. A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos para o agregado miúdo empregado neste estudo.

Tabela 11 - Caracterização do agregado miúdo

Característica	Resultado
Massa unitária (g/cm ³)	1,76
Massa específica (g/cm ³)	2,30
Diâmetro máximo (mm)	2,36
Módulo de finura	2,49

Fonte: Autor (2025).

3.2.4 Água

A água exerce papel fundamental na hidratação dos materiais cimentícios e na obtenção da trabalhabilidade adequada da argamassa. No entanto, seu teor deve ser cuidadosamente controlado, uma vez que o excesso pode provocar segregação, exsudação e comprometer as propriedades mecânicas e a durabilidade da matriz. Neste estudo, foi utilizada a água potável fornecida pelo Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE) de Caxias do Sul.

3.2.5 Fibra de polipropileno

Optou-se por utilizar a microfibras de polipropileno como a fibra sintética neste trabalho. A mesma já é altamente empregada na construção civil, tanto em argamassas quanto em concretos, devido à sua eficácia no controle de fissuração.

A fibra de polipropileno se destaca por sua alta resistência à tração, baixa densidade e estabilidade em meios alcalinos. É eficaz no controle de fissuras por retração, aumenta a tenacidade e a resistência a impactos e fadiga, além de favorecer a ductilidade e tenacidade do compósito. Seu baixo custo e fácil incorporação tornam essa fibra uma opção eficiente e acessível no reforço de matrizes cimentícias.

As microfibras de polipropileno do tipo monofilamentos foram incorporadas ao compósito de forma integral e de forma parcial. Na Tabela 12 são apresentadas as propriedades das fibras pelo fabricante Chryso.

Tabela 12 - Características da microfibras de polipropileno

Característica	Resultado do fabricante
Comprimento (mm)	12
Diâmetro de filamento (μm)	18
Resistência à tração (MPa)	544
Faixa de uso (g/m^3)	300 a 600
Densidade (g/cm^3)	0,91

Fonte: Adaptado de Chryso (2025).

3.2.6 Fibra de juta

A partir dos aspectos analisados anteriormente com relação a utilização de fibras em concretos e argamassas, como o de que elas podem melhorar as propriedades mecânicas, optou-se por utilizar fibras de juta por meio da incorporação dispersas na matriz. Foi realizada a compra de um rolo de fibra de 100% juta da SisalSul e efetuado o corte das fibras para deixá-las com um comprimento de aproximadamente 20 mm, conforme Figura 13.

Figura 13 - Fibra de juta



Fonte: Autor (2025).

A caracterização da fibra de juta foi realizada após o tratamento alcalino, uma vez que essa é a condição em que a fibra foi inserida nos compósitos. Como o tratamento pode alterar propriedades químicas e físicas da fibra, como massa específica e absorção de água, a caracterização pós-tratamento se torna essencial para representar adequadamente o comportamento real do material no compósito.

3.2.6.1 Massa específica

A massa específica da fibra de juta foi determinada por meio de um ensaio adaptado utilizando o frasco de Le Chatelier, realizado por Pimentel et al., (2016), método tradicionalmente aplicado à medição da massa específica de aglomerantes. Para isso, utilizou-se um volume inicial conhecido de líquido não reativo no frasco e após a estabilização do volume inicial, a amostra de fibras secas foi cuidadosamente introduzida

no frasco, e a nova leitura de volume foi registrada após a estabilização do volume final. A Figura 14 apresenta as etapas desse ensaio e a Tabela 13 informa os resultados obtidos.

Figura 14 - Massa específica fibra de juta



Fonte: Autor (2025).

A partir da Equação 1 é possível calcular a massa específica da fibra de juta.

$$\rho = \frac{m}{L_f - L_i} \quad (1)$$

Onde:

ρ = Massa específica da fibra, em g/cm³

m = Massa da amostra de fibra, em gramas

L_f = Leitura do frasco com as fibras, em cm³

L_i = Leitura inicial do frasco, em cm³.

Tabela 13 - Resultados do ensaio de massa específica

Frasco	Fibra (g)	Volume inicial (cm ³)	Volume final (cm ³)	Massa específica (g/cm ³)
1	1,5	18,5	19,5	1,5
2	1,5	19,6	20,8	1,25
Média				1,375
Desvio Padrão				0,1768

Fonte: Autor (2025).

3.2.7 Hidróxido de cálcio

A partir dos aspectos analisados anteriormente com relação aos tratamentos alcalinos para as fibras naturais optou-se por utilizar devido à afinidade química da celulose com $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

3.2.8 Aditivo Superplastificante

Foi utilizado um aditivo superplastificante para melhorar a fluidez da mistura e, conseqüentemente, a trabalhabilidade, sem alterar a relação água/cimento do traço. Sua principal função é dispersar as partículas de cimento, reduzindo a tensão superficial e favorecendo o empacotamento das partículas, o que resulta em uma pasta mais homogênea e de melhor desempenho.

Foi utilizado o aditivo Sika ViscoCrete -100 HE, um superplastificante líquido de terceira geração com pega acelerada. Esse aditivo promove maior fluidez e resistência inicial, além de melhorar o tempo de trabalhabilidade da mistura. É especialmente adequado para cimentos com baixo teor de adição, como o CP II, utilizado no presente trabalho. A Tabela 14 apresenta as propriedades técnicas do aditivo utilizado, conforme fabricante.

Tabela 14 - Ficha técnica aditivo superplastificante

Propriedade	Resultado
Densidade	$1,09 \pm 0,02 \text{ kg/L}$
Valor do pH	$5,0 \pm 1,0$
Dosagem recomendada	0,3% à 2,0% sobre o peso do aglomerante

Fonte: Autor (2025).

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Tratamento das fibras

Para o tratamento superficial da fibra de juta, foi utilizado um processo descrito por Ferreira (2016), que consiste em tratar a fibra natural por meio de imersão alcalina.

As fibras naturais foram imersas em uma solução de 0,73% de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), por 50 minutos. Valido ressaltar que imersões entre 30 e 60 minutos em concentrações alcalinas baixas (0,5 a 1%) não causam degradação das fibras naturais

(SAHA et al, 2010 apud Mendonça, 2018). As fibras tratadas com álcalis não foram lavadas para preservar o excesso de alcalino na superfície. Posteriormente, as fibras foram secas a uma temperatura de 60 °C por 30 horas. De acordo com Araújo et al. (2008), a temperatura de 60°C não danifica a fibra, visto que a decomposição da hemicelulose e a degradação da celulose e da lignina, componentes da parede celular que influenciam diretamente a resistência e rigidez da fibra, ocorrem em temperaturas superiores, entre 200 e 300°C e 400 e 500°C, respectivamente. A Figura 15 apresenta o processo que tratamento da fibra, onde (a) demonstra a imersão das fibras em solução alcalina, (b) as fibras logo após os 50 minutos de imersão e (c) a fibra totalmente seca após permanecer na estufa por aproximadamente 30 horas.

Figura 15 – Tratamento alcalino com hidróxido de cálcio



Fonte: Autor (2025).

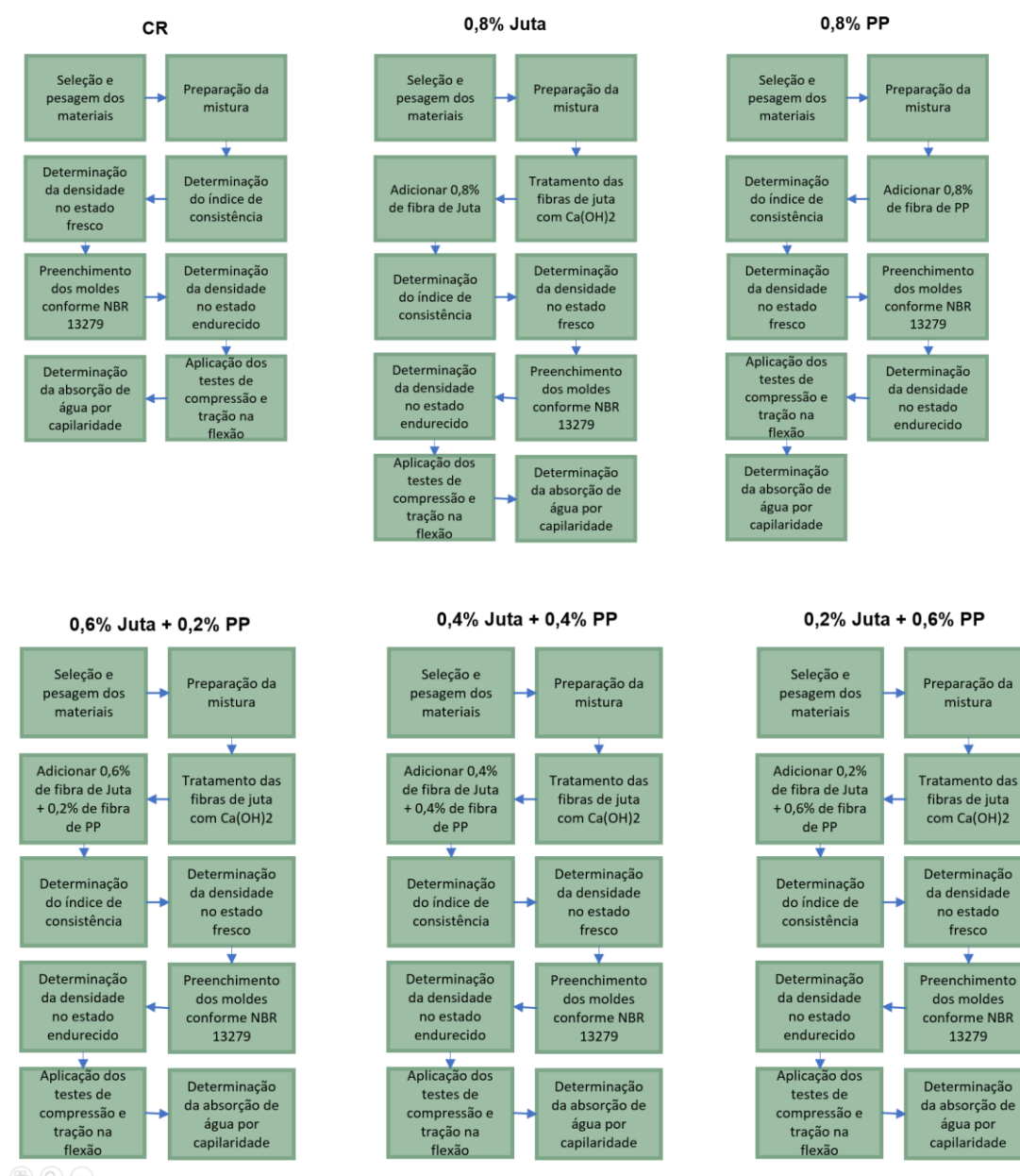
O tratamento promove a deposição de hidróxido de cálcio na superfície da fibra, com o objetivo de remover impurezas distribuídas na região interfibrilar remover parcialmente componentes não celulósicos como a hemicelulose e a lignina da parede celular. Essa remoção parcial, que se concentra nas regiões mais superficiais, é fundamental, pois aumenta a rugosidade superficial da fibra, o que melhora significativamente a aderência mecânica (travamento) com a matriz cimentícia. Após o tratamento alcalino em baixa concentração, as fibrilas tornam-se mais capazes de se reorganizar ao longo das direções de deformação por tração, uma vez que a região interfibrilar se torna menos densa e rígida devido à remoção da hemicelulose.

Além disso, como as fibras não são lavadas após a imersão, o excesso de álcalis permanece em sua superfície, favorecendo reações de hidratação localizadas durante a cura do compósito. Esse processo contribui para o aumento da resistência das fibras à degradação química em ambientes altamente alcalinos, como os presentes em matrizes cimentícias.

3.3.2 Procedimento de dosagem e mistura dos materiais

A mistura completa e homogênea dos materiais é essencial para garantir a uniformidade e o desempenho mecânico dos compósitos cimentícios, neste presente trabalho, da argamassa. Após a realização do tratamento das fibras, foi possível proceder com a mistura dos demais materiais. A Figura 16 ilustra o procedimento adotado para a mistura dos componentes durante a fabricação dos corpos de prova, conforme estabelecido no programa experimental.

Figura 16 - Procedimento de cada traço



A Tabela 15 apresenta o consumo específico de todos os materiais constituintes utilizados nas misturas, detalhado por metro cúbico de compósito.

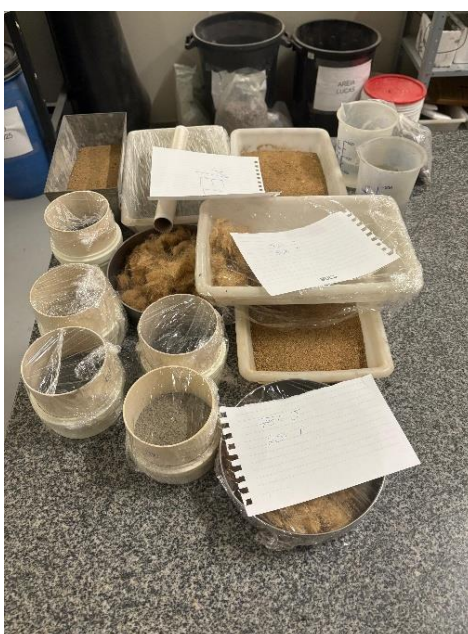
Tabela 15 - Consumo dos materiais por m³ de compósito

CP	Cimento (Kg/m ³)	CCA (Kg/m ³)	Agregado miúdo (Kg/m ³)	Água (Kg/m ³)	Fibra de Juta (Kg/m ³)	Fibra de PP (Kg/m ³)	Adit (kg)
CR	344,48	147,64	1476,38	300,20	0	0	1,03
0,8%J	344,48	147,64	1476,38	300,20	10,8	0	2,46
0,8%PP	344,48	147,64	1476,38	300,20	0	7,28	2,46
0,6%J+ 0,2%PP	344,48	147,64	1476,38	300,20	8,1	1,82	2,46
0,2%J+ 0,6%PP	344,48	147,64	1476,38	300,20	5,4	5,46	2,46
0,4%J+ 0,4%PP	344,48	147,64	1476,38	300,20	2,7	3,64	2,46

Fonte: Autor (2025).

A Figura 17 apresenta o processo de separação dos materiais após a devida pesagem dos mesmos, seguindo as proporções referentes ao traço.

Figura 17 - Separação dos materiais



Fonte: Autor (2025).

Após todos os materiais serem devidamente pesados e separados, iniciou-se o processo da mistura dos materiais. Para esta pesquisa, o processo de mistura foi baseado no método proposto por Oliveira (2015).

- a) Os materiais secos da matriz (cimento, cinza da casca do arroz e areia) foram adicionados ao misturador previamente umedecido e homogeneizados, juntamente com as fibras desfiadas cuidadosamente para evitar a formação de ouriços, na velocidade 1 (125rpm), até a mistura se tornar uma mistura homogênea;
- b) Toda a água e aditivo foi incorporada à mistura e mantida na velocidade 1 (125 rpm);
- c) A mistura completa até este ponto foi processada por mais 60 segundos na velocidade 2 (220 rpm) para garantir homogeneidade;
- d) Realizou-se uma nova parada de 60 segundos para limpeza;
- e) Para finalizar, a mistura foi mantida por 120 segundos na velocidade 2 (220 rpm), promovendo a dispersão uniforme das fibras na matriz.

A Figura 18 apresenta o processo de mistura dos materiais descritos acima.

Figura 18 - Processo de mistura dos materiais



Fonte: Autor (2025).

3.3.3 Ensaio da determinação do índice de consistência

Para a determinação do índice de consistência, procedeu-se conforme a ABNT NBR 13276 de 2016. O ensaio consiste em medir o espalhamento da mistura para avaliar sua trabalhabilidade. O molde cilíndrico é preenchido em três camadas de mesma altura,

aplicando-se 15, 10 e 5 golpes com o soquete em cada uma delas para a compactação. Em seguida, o molde é retirado verticalmente e a mesa de consistência é acionada, realizando 30 quedas uniformes em 30 segundos. Após o ensaio, o diâmetro do espalhamento é medido em três direções distintas, e os valores são registrados. A Figura 19 mostra os processos do ensaio. Foi realizado duas vezes o teste do índice de consistência em todos os 5 diferentes compósitos. No CR foi utilizado um total de 0,21% de aditivo superplastificante. Nos demais traços, foi adicionado inicialmente esse teor de aditivo, e feito o índice de consistência, posteriormente, foi adicionado mais uma quantidade de aditivo, fechando um total de 0,5% nos compósitos incorporados com fibras, a fim de obter uma trabalhabilidade melhor dos mesmos e mais aproximada do CR. E atingiu a trabalhabilidade estipulada de $260\text{mm} \pm 30\text{mm}$.

Figura 19 - Ensaio do índice de consistência



Fonte: Autor (2025).

Após a determinação do espalhamento do compósito, foi realizado o ensaio da densidade no estado fresco com a mistura final, o CR obtendo um adicional de 0,21% de aditivo e os demais compósitos um adicional de 0,5%. A determinação da densidade de massa no estado fresco tem como objetivo avaliar o grau de compactação e homogeneidade do compósito, parâmetros relacionados a trabalhabilidade e ao teor de ar incorporado. Este ensaio permite verificar a uniformidade da mistura e identificar possíveis variações no processo de moldagem, sendo essencial para o controle da qualidade e para a análise comparativa entre diferentes formulações. O grau de compactação da mistura influencia diretamente na resistência que a mesma pode alcançar, pois uma mistura homogênea e com um baixo número de vazios é essencial para se obter uma resistência alta tanto à compressão como para a tração na flexão.

3.3.4 Determinação da densidade no estado fresco

Para a determinação da densidade, inicialmente o recipiente foi pesado com a tampa para a determinação da massa do recipiente vazio, após isso preenchido em três camadas, aplicando-se 20 golpes por camada e três quedas do recipiente após cada etapa, garantindo o adensamento adequado. A superfície foi rasada e o conjunto, limpo externamente, foi pesado novamente para registro da massa total. A densidade de massa foi então calculada pela relação entre a diferença das massas (recipiente com argamassa e recipiente vazio) e o volume do recipiente, expressa em kg/m^3 . A Figura 20 indica as etapas desse ensaio.

Figura 20 - Ensaio da densidade no estado fresco



Fonte: Autor (2025).

A aparelhagem utilizada nos ensaios seguiu os requisitos da ABNT NBR 13279 do ano de 2005, sendo composta por:

- a) Moldes prismáticos metálicos de $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$ para moldagem dos corpos de prova;
- b) Mesa de adensamento por queda, utilizada para compactação da argamassa nos moldes;
- c) Nivelador de camadas com duas espátulas de dimensões distintas, para nivelamento da superfície;
- d) Régua metálica;

- e) Máquina para ensaios de tração na flexão e compressão, conforme ABNT NBR NM ISO 7500-1;
- f) Dispositivo de carga para ensaio de tração na flexão, com aplicação uniforme e sem choque de 50 N/s;
- g) Dispositivo de carga para compressão, com aplicação uniforme e sem choque de 500 N/s;
- h) Cronômetro;
- i) Utensílios de laboratório.

A execução dos ensaios seguiu os procedimentos descritos na ABNT NBR 13279 do ano de 2005, conforme as etapas abaixo:

- a) Moldar três corpos de prova prismáticos para cada idade de ensaio (7, 28 e 42 dias);
- b) Posicionar os moldes prismáticos sobre a mesa de adensamento e fixá-los adequadamente;
- c) Aplicar uma fina camada de óleo mineral nas faces internas dos moldes e remover o excesso com papel ou pano seco;
- d) Preparar a argamassa conforme a ABNT NBR 13276;
- e) Introduzir nos moldes uma porção de argamassa recém-preparada;
- f) Espalhar a primeira camada com o lado maior do nivelador de camadas;
- g) Aplicar 30 quedas com a mesa de adensamento;
- h) Introduzir a segunda camada de argamassa nos moldes;
- i) Espalhar novamente com o lado menor do nivelador de camadas;
- j) Aplicar mais 30 quedas na mesa de adensamento;
- k) Rasar a superfície dos corpos de prova com régua metálica;
- l) Manter os corpos de prova nos moldes por (48 ± 24) horas antes da desmoldagem;
- m) Após desmoldar, conservar os corpos de prova nas mesmas condições até o momento do ensaio.

A Figura 21 indica o processo de moldagem e desmoldagem do compósito, seguido da identificação dos mesmos e inseri-los em tanques para o processo de cura, até a data prevista para os ensaios nas idades programadas,

Figura 21 - Processo de moldagem e desmoldagem dos compósitos



Fonte: Autor (2025).

3.3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica de análise microestrutural que utiliza um feixe de elétrons para produzir imagens de alta resolução da superfície dos materiais. Diferentemente dos microscópios ópticos convencionais, o MEV permite observar características em escalas micrométricas e nanométricas, possibilitando uma avaliação detalhada da microestrutura do compósito cimentício.

Além disso, de acordo com Pacheco et al. (2016), o uso do MEV é fundamental para investigar a interação entre as fibras e a matriz, especialmente na região da zona de transição interfacial. A observação dessa interface permite identificar a qualidade da aderência, a presença de falhas, zonas de descolamento e mecanismos como *pull-out* ou ancoragem mecânica. A qualidade dessa ligação é determinante para o desempenho do compósito, uma vez que diferentes tipos de fibras apresentam comportamentos distintos quando incorporadas à matriz. Assim, a MEV se destaca como uma ferramenta eficaz para visualizar e compreender essas interfaces, fornecendo evidências diretas de como as fibras contribuem para o comportamento mecânico do material.

Para a avaliação microestrutural, duas amostras foram selecionadas para análise no MEV, o compósito reforçado com 0,8% de fibra de juta e o compósito contendo 0,8% de fibra de polipropileno. As Micrografias de alta resolução obtidas permitiram investigar como cada tipo de fibra estava atuando no interior da matriz cimentícia, especialmente após a ruptura dos corpos de prova. A análise foi realizada no Laboratório Central de Microscopia (LCMIC) da Universidade de Caxias do Sul (UCS).

3.3.5.1 Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS)

A Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS), acoplada ao Microscópio Eletrônico de Varredura, é uma técnica utilizada para identificar e quantificar os elementos químicos presentes na superfície de um material. Durante a análise no MEV, o feixe de elétrons interage com os átomos da amostra, provocando a emissão de raios X característicos. Cada elemento químico possui um padrão único de energia desses raios X, permitindo sua detecção e diferenciação.

O EDS complementa a análise microestrutural ao fornecer informações composicionais da matriz, das fibras e da região de interface fibra-matriz. Isso permite avaliar possíveis alterações químicas geradas pelos tratamentos aplicados às fibras, verificar a presença de impurezas, além de identificar elementos típicos da matriz cimentícia, como cálcio, silício e oxigênio. Dessa forma, a técnica se torna fundamental para compreender os mecanismos de aderência e degradação, contribuindo para a interpretação do comportamento mecânico dos compósitos analisados.

3.3.6 Ensaio de tração na flexão

O ensaio de tração na flexão tem como objetivo avaliar a resistência de um compósito cimentício quando submetido a uma carga que gera tração indireta, ou seja, esforços que tendem a provocar fissuração na região tracionada do elemento. Esse tipo de solicitação permite quantificar a tensão máxima que o material é capaz de suportar antes da ruptura, sendo útil especialmente em materiais frágeis, como argamassas ou concretos reforçados com fibras. O procedimento consiste na aplicação gradual de carga sobre o corpo de prova até que ocorra a fratura, conforme especificado em norma técnica ABNT NBR 13279 do ano de 2005.

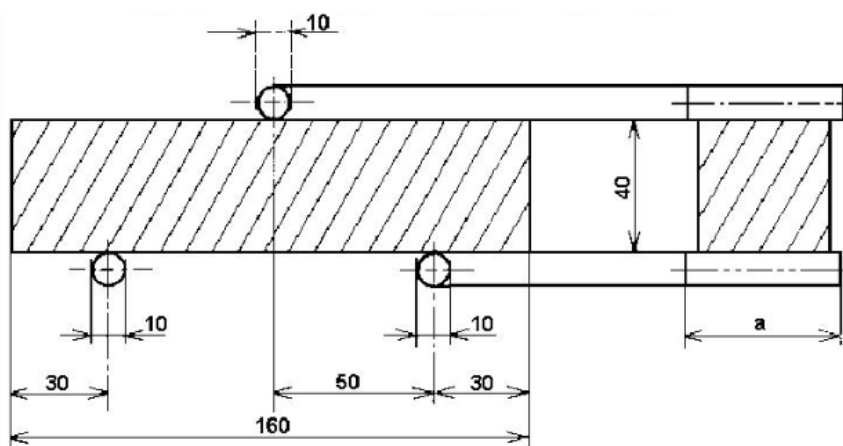
A principal vantagem desse método é a sua aplicação em materiais frágeis, como em argamassas ou concretos, nos quais a tração direta é difícil de ensaiar devido à tendência de falha prematura por problemas de alinhamento ou concentração de tensões. Fatores como a composição da mistura, a granulometria dos componentes e as condições de cura influenciam diretamente o desempenho final do compósito.

Nesses casos, o ensaio também fornece informações sobre a tenacidade e ductilidade. Dessa forma, o teste contribui não apenas para o controle de qualidade, mas também para a caracterização mecânica completa do compósito cimentício.

Os corpos de prova, após a desforma, devem ser armazenados até atingirem a idade prevista para o ensaio. A ruptura deve ser realizada nas idades estabelecidas previamente, respeitando a margem de tolerância indicada pela norma. Essa tolerância permite pequenas variações no tempo de ensaio sem comprometer a validade dos resultados, desde que os desvios não ultrapassem os limites estabelecidos.

De acordo com a norma, para a realização do ensaio de resistência à tração na flexão, o corpo de prova prismático (40 mm × 40 mm × 160 mm) deve ser posicionado no equipamento de ensaio de forma que a face rasada não entre em contato com os dispositivos de apoio nem com o dispositivo de carga, conforme ilustrado na Figura 22. A carga é aplicada de maneira contínua, com velocidade de (50 ± 10) N/s, até que ocorra a ruptura do corpo de prova. Foi realizado ensaios em três idades distintas, aos 7, 28 e 42 dias, e foi ensaiado 3 corpos de prova por idade.

Figura 22 - Dispositivo de carga para determinação da resistência à tração na flexão



Fonte: ABNT NBR 13279 (2000).

A resistência à tração na flexão é determinada pela Equação 2.

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

Onde:

R_f = Resistência a tração na flexão, em MegaPascal.

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

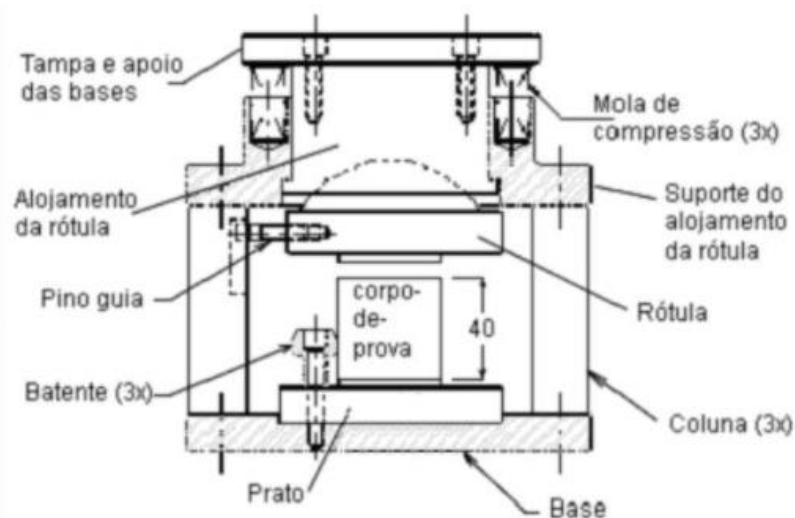
L = Distância entre os suportes, em milímetros.

3.3.7 Ensaio de compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial tem como objetivo avaliar a capacidade da argamassa ou compósito cimentício de suportar esforços de compressão, sendo um dos principais indicadores do desempenho mecânico do material. Esse ensaio é fundamental para verificar se o compósito atende aos requisitos estruturais e de durabilidade exigidos para sua aplicação.

A ABNT NBR 13279 de 2005 recomenda que o ensaio de resistência à compressão seja realizado utilizando as metades dos mesmos corpos de prova empregados no ensaio de tração na flexão. Após a ruptura por flexão, cada corpo de prova prismático é dividido em duas partes, que são então utilizadas para o teste de compressão. A norma especifica que essas metades devem ser posicionadas no dispositivo de apoio do equipamento de ensaio de forma que a face rompida (rasada) não entre em contato com os dispositivos de carga nem de apoio, conforme ilustrado na Figura 23. Essa abordagem otimiza o uso dos corpos de prova e permite uma avaliação complementar do desempenho mecânico da argamassa ou compósito analisado.

Figura 23 - Dispositivo de carga típico para ensaios de resistência à compressão



Fonte: ABNT NBR 13279 (2005).

Foi realizado ensaios em três idades distintas, aos 7, 28 e 42 dias, e foi ensaiado 3 corpos de prova por idade. A carga foi aplicada de forma contínua e sem choques, à taxa de (500 ± 50) N/s, até a ruptura completa do corpo de prova. A resistência à compressão foi determinada utilizando a Equação 3.

$$Rc = \frac{Fc}{1600} \quad (3)$$

Onde:

Rc = resistência à compressão, em MPa;

Fc = carga máxima aplicada, em N;

1600 = área da seção transversal considerada (40 mm × 40 mm), em mm².

3.3.8 Absorção de água, índice de vazios e densidade no estado endurecido

A absorção de água por capilaridade é um ensaio utilizado para avaliar a capacidade de um material cimentício em absorver e transportar água através de sua rede de poros, impulsionado pelas forças capilares presentes na microestrutura. Esse mecanismo ocorre devido à tensão superficial da água e à adesão entre as moléculas de água e as paredes internas dos poros da matriz cimentícia. Assim, a água consegue ascender pelos microcanais mesmo contra a força da gravidade, sendo que a velocidade de ascensão é inversamente proporcional ao diâmetro dos poros.

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado conforme a ABNT NBR 9779 do ano de 2012. Para cada compósito, foram preparados três corpos de prova. Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram em cura submersa até a idade de 28 dias, quando foram retirados para a realização do ensaio. Em seguida, os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa ventilada a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até atingirem massa constante, assegurando que os poros estivessem totalmente vazios e aptos a iniciar o processo de absorção.

Durante o ensaio, os corpos de prova foram posicionados sobre suportes dentro do recipiente contendo água, mantendo-se o nível a 5 ± 1 mm acima da face inferior dos CPs, garantindo que a absorção ocorresse exclusivamente por capilaridade, evitando a molhagem de outras superfícies. As massas saturadas parciais foram determinadas nos tempos de 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h. Nesses tempos determinados, os compósitos foram retirados do recipiente contendo água, foi realizado uma secagem superficial com pano úmido, e foi aferido a massa saturada dos mesmos. Ao final de cada leitura, os corpos de prova retornaram imediatamente ao recipiente para continuidade da absorção. Assim, é possível identificar e quantificar tanto a taxa de absorção quanto o avanço da água pelos poros do compósito.

A absorção de água por capilaridade é calculada de acordo com a Equação 4.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \quad (4)$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade, em g/cm²;

m_{sat} = massa saturada do corpo de prova, em gramas;

m_s = massa do corpo de prova seco, em gramas;

S = área da seção transversal que ficou em contato com a água, em cm².

Para a determinação da densidade no estado endurecido, foi utilizado os mesmos corpos de prova que foram submetidos aos ensaios de absorção por capilaridade. A densidade no estado endurecido representa a massa por unidade de volume do compósito após o término da cura e da evaporação da água não reagente. Esse parâmetro permite avaliar indiretamente o grau de porosidade total da matriz, já que reduções significativas de massa sem variação proporcional do volume indicam maior formação de vazios internos. Quando analisada em conjunto com a densidade no estado fresco, essa medida possibilita identificar o comportamento do compósito durante a cura.

Calcula-se a densidade de massa no estado endurecido através da Equação 5.

$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{m}{v} \times 1000 \quad (5)$$

Onde:

$\rho_{m\acute{a}x}$ = densidade de massa, em kg/m³

m = massa do compósito, em gramas

v = volume do compósito, em g/cm³

Para a determinação do volume, utiliza-se um parquímetro para realizar a medição da altura, largura e o comprimento de cada corpo de prova em duas posições distintas, após isso, faz-se uma média entre esses dois resultados e calcula-se o volume.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos dos efeitos da hibridização da fibra natural de juta, tratada com hidróxido de cálcio, e da fibra sintética de polipropileno em diferentes percentuais, sobre a resistência à compressão, à tração na flexão.

4.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

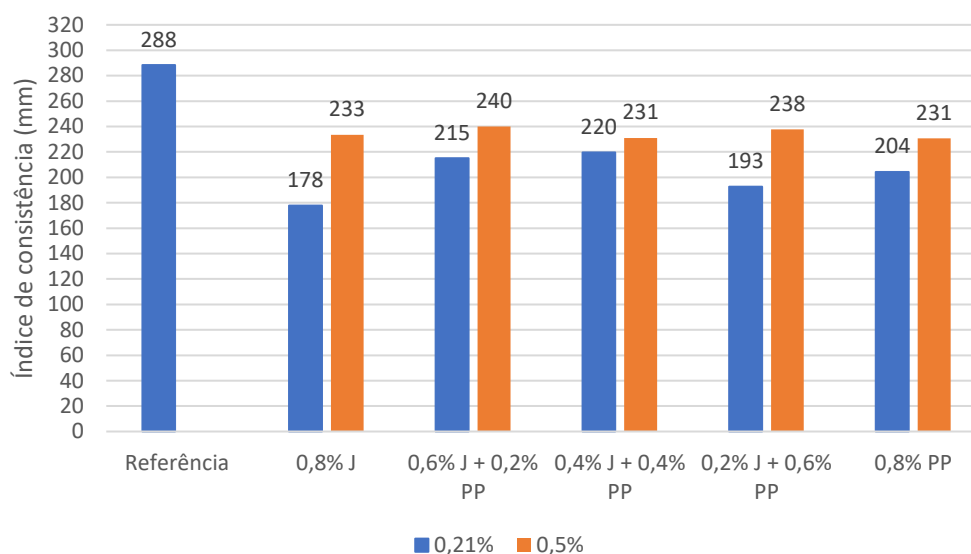
O estado fresco do compósito é o período logo após a mistura dos materiais, quando a massa ainda está plástica, úmida e moldável, podendo ser facilmente lançada, adensada e acabada. antes da pega e endurecimento.

A seguir serão abordadas o índice de consistência e a determinação da densidade de massa no estado fresco de acordo com ABNT NBR 13276 do ano 2016, a fim de analisar a trabalhabilidade do compósito e avaliar o grau de compactação e uniformidade dos materiais utilizados.

4.1.1 Índice de consistência

O índice de consistência avaliou o espalhamento das misturas no estado fresco. A Figura 24 apresenta os resultados obtidos para o traço referência e para os compósitos reforçados com diferentes variações entre fibras de juta e de polipropileno, mantendo-se constante o teor total de fibras em 0,8% do volume do compósito. O traço de referência foi preparado com 0,21% de aditivo superplastificante em relação à massa de agregados, enquanto os traços com incorporação de fibras receberam duas dosagens de aditivo, uma inicial de 0,21% e posteriormente uma adição até atingir um total de 0,5% de aditivo, visando compensar a redução de fluidez causada pela presença das fibras.

Figura 24 - Índice de consistência



Fonte: Autor (2025).

O CR, que não recebeu fibras, obteve um espalhamento de 288 mm. Já a mistura contendo 0,8% de fibra de juta apresentou redução significativa na fluidez, alcançando 178 mm com 0,21% de aditivo e 233 mm com 0,5% de aditivo. Para o compósito com 0,6% de juta e 0,2% de polipropileno, os valores foram de 215 mm e 240 mm, respectivamente. O traço com 0,4% de juta e 0,4% de polipropileno obteve 220 mm com 0,21% de aditivo e 231 mm com 0,5%. Já o compósito com 0,2% de juta e 0,6% de polipropileno apresentou 193 mm e 238 mm. Por fim, o traço contendo 0,8% de polipropileno (0,8%PP) apresentou valores de 204 mm com 0,21% e 231 mm com 0,5% de aditivo superplastificante. Os resultados de espalhamento obtidos com 0,5% de aditivo superplastificante confirmam que o aditivo cumpriu seu papel, pois todos os traços reforçados apresentaram melhoria significativa na trabalhabilidade com o aumento da dosagem do aditivo, em comparação com a dosagem inicial de 0,21%.

O CR apresentou melhor trabalhabilidade entre os compósitos, mesmo ao comparar com os resultados com uma maior quantidade de aditivo (0,5%). Pinto (2019) observou esse mesmo tipo de comportamento quando incorporou fibras de Curauá em compósitos cimentícios, mesmo adicionando um teor de 0,9% de aditivo, os compósitos reforçados com fibras mantiveram uma trabalhabilidade menor do que o CR.

Este acontecimento ocorre porque a incorporação de fibras no compósito reduz a trabalhabilidade devido a três principais fatores. O primeiro está relacionado à restrição de movimento das partículas, causada pela presença das fibras. Como se recomenda que

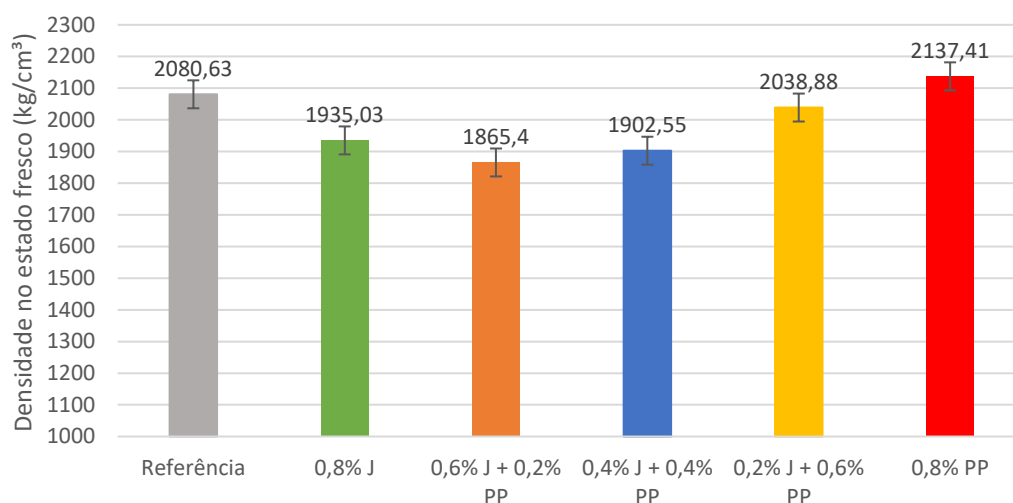
as fibras apresentem comprimento superior a, pelo menos, duas vezes a dimensão máxima do agregado, ocorre um bloqueio parcial à mobilidade desses grãos, reduzindo a fluidez da mistura. O segundo fator refere-se ao aumento da área superficial introduzida pelas fibras. Ao incorporá-las ao compósito, adiciona-se também uma superfície adicional que requer água para molhagem. Dessa forma, fibras com maior área superficial elevam a demanda de água, resultando em maior coesão e menor mobilidade do material no estado fresco (Figueiredo, 2011). E o terceiro fator, se tratando especificamente da adição de fibras naturais, é que essas fibras possuem uma característica hidrofílicas, ou seja, possuem uma boa absorção de água. Devido a isso, as fibras naturais podem acabar absorvendo e roubando a água livre presente na matriz, reduzindo a relação a/c e consequentemente, reduzindo a trabalhabilidade.

Observa-se que o traço 0,8%J foi o que possuiu um menor espalhamento com 0,21% de aditivo, devido a alta capacidade de absorção de água da fibra de juta. Porém não nota-se uma maior e melhor trabalhabilidade com os traços majoritariamente ou inteiramente PP, pois a fibra de polipropileno possui uma densidade menor que a fibra de juta, então 0,8% de fibra de juta, em massa, é mais pesado do que 0,8% de fibra de PP, porém ao se tratar de área de superfície de contato, a fibra de PP acaba tendo uma maior superfície de contato com a matriz do que a de juta, o que acaba acarretando na redução da trabalhabilidade desses compósitos.

4.1.2 Densidade no estado fresco

A densidade dos compósitos no estado fresco é um indicador fundamental da qualidade do empacotamento das misturas e do volume de ar incorporado logo após o amassamento. A Figura 25 apresenta os resultados obtidos da densidade no estado fresco. Todas as misturas contendo fibras possuem 0,5% de aditivo plastificante, porém o CR possui um total de 0,21%.

Figura 25 - Densidade no estado fresco



Fonte: Autor (2025).

De modo geral, a incorporação de fibras, sejam elas naturais ou sintéticas, tende a reduzir a densidade da mistura em comparação com o traço de referência, devido ao aumento da porosidade e à introdução de material com menor massa específica. Ehrenbring e Tutikian (2023) explicam que as fibras possuem uma densidade muito menor do que os demais constituintes da matriz cimentícia, e mesmo que o teor de incorporação seja de baixo volume, considerando o volume total, a inclusão desses materiais de menor massa específica no sistema contribui para a redução da densidade no estado fresco do compósito.

O CR apresentou uma densidade de 2080,63 g/cm³. A fibra de juta atingiu uma densidade de 1935,03 kg/m³. Nos compósitos híbridos, nota-se uma crescente nos valores da densidade na medida que é reduzido o teor de fibra de juta e aumentando o teor de fibra de PP. O compósito 0,6%J + 0,2%PP resultou em uma densidade de 1865,4kg/m³, já a hibridização em proporção igual, 0,4%J + 0,4%PP apresentou 1902,55 kg/m³ para este ensaio, enquanto a hibridização majoritariamente de PP, apresentou um ganho na densidade, obtendo um resultado de 2038,88 kg/m³. A redução da densidade nas misturas reforçadas com fibras naturais de juta pode ser atribuída à sua natureza hidrofílica. Após a adição, as fibras absorvem parte da água de amassamento da matriz. Essa perda de água livre impacta criticamente a trabalhabilidade da mistura, tornando-a mais rígida e menos fluida. Essa condição dificulta o processo de adensamento, resultando em uma má compactação efetiva do compósito. Uma compactação deficiente leva a um maior volume

de ar aprisionado (vazios), o que, combinado com a baixa massa específica da própria fibra, contribui diretamente para a redução da densidade no estado fresco do compósito

Adicionalmente, a combinação de fibras com propriedades físico-químicas opostas (hidrofílica e hidrofóbica) compromete a dispersão e a homogeneidade da mistura. A matriz se torna excessivamente rígida e os aglomerados de fibras são mais difíceis de romper, resultando em uma má compactação da argamassa no recipiente. Conseqüentemente, um maior volume de vazios de ar é aprisionado, sendo esta a principal causa da redução da densidade no estado fresco observada nas misturas fibrosas em comparação com o traço de referência (CR).

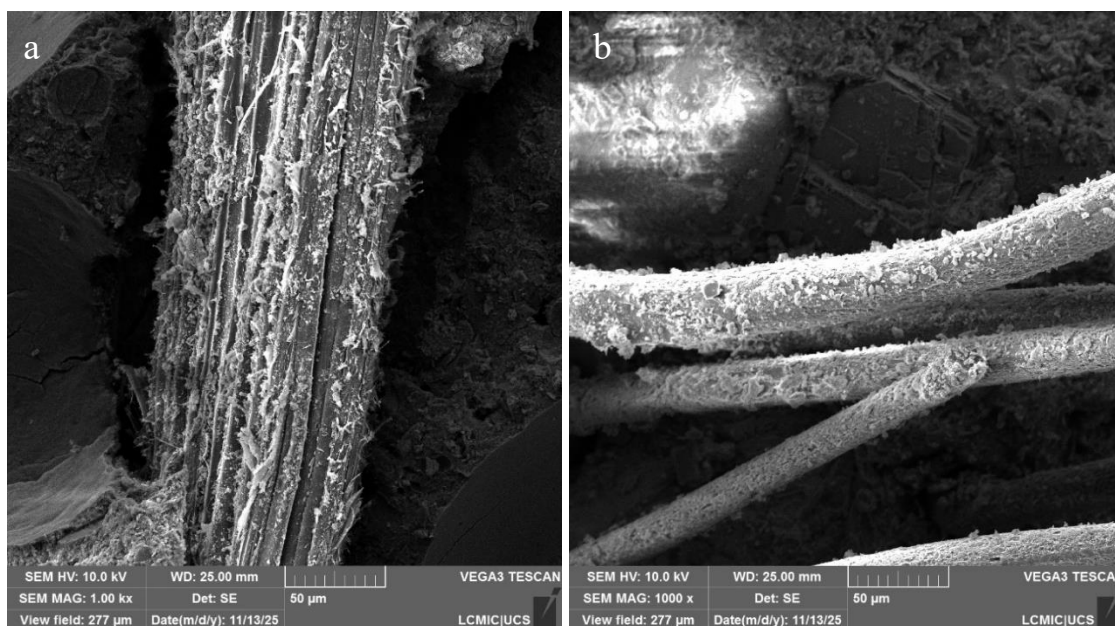
4.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

O estado endurecido do compósito cimentício refere-se ao período após a pega e o desenvolvimento das reações de hidratação, quando a matriz adquire sua resistência mecânica e durabilidade final. É neste estágio que o material atinge sua capacidade operacional e estrutural. A seguir, serão abordadas a resistência à compressão, a resistência à tração na flexão e a absorção de água dos compósitos. Estes ensaios são cruciais para analisar a capacidade de carga, a tenacidade, a durabilidade e a eficiência do reforço de fibras na microestrutura final do material.

4.2.1 Análise microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos compósitos

A seguir, são apresentadas as análises microscópicas obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura, empregadas para identificar e compreender as características morfológicas das fibras incorporadas aos compósitos cimentícios. A Figura 26 mostra o MEV com ampliação em 1000x da fibra de juta (a) e fibra de polipropileno (b).

Figura 26 - MEV fibra de juta (a) e fibra de polipropileno (b) ampliada em 1000x



Fonte: Autor (2025).

As micrografias de MEV evidenciam diferenças morfológicas expressivas entre a fibra de juta tratada com hidróxido de cálcio e a fibra de polipropileno (PP) sem tratamento. Na micrografia correspondente à fibra de juta tratada, observa-se uma superfície mais rugosa, com elevada fibrilação e exposição de microfibrilas ao longo do eixo longitudinal da fibra. Essa característica indica a remoção parcial de componentes amorfos, como lignina e hemicelulose, promovida pelo tratamento alcalino, o que resulta em maior área superficial disponível para interação com a matriz polimérica. Além disso, identificam-se pequenos depósitos brancos distribuídos sobre a superfície da fibra, possivelmente correspondentes a resíduos de hidróxido de cálcio provenientes do tratamento alcalino, bem como a produtos formados durante a hidratação do cimento, que se aderem às microfibrilas expostas. Ferreira (2016), ao analisar fibras de juta sem tratamento e após a aplicação do tratamento alcalino com hidróxido de cálcio, também observou a presença de cristais de diferentes dimensões aderidos à superfície das fibras tratadas, atribuindo esses depósitos a cristais de hidróxido de cálcio, resultantes da elevada afinidade da fibra por esse composto.

Resultados semelhantes foram reportados por Pires et al. (2012), que observaram aumento da rugosidade superficial ao comparar fibras de juta sem tratamento com fibras submetidas a tratamento alcalino com hidróxido de cálcio. Os autores atribuíram essa

alteração morfológica à remoção parcial de hemicelulose e lignina, tal como observado na presente análise.

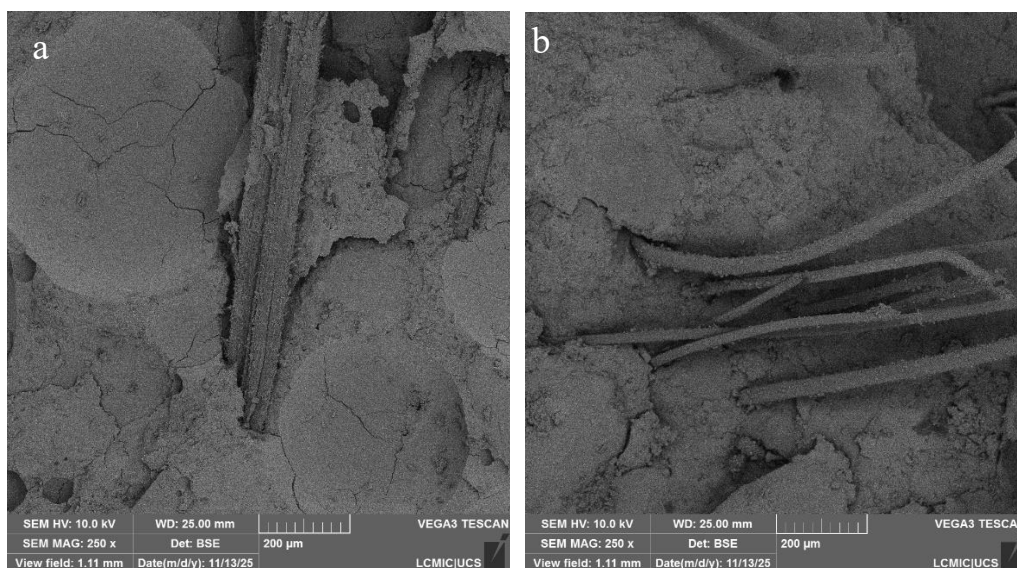
A combinação desses efeitos, o aumento da rugosidade e a deposição de cristais de hidróxido de cálcio na superfície da fibra, indica um aprimoramento potencial da adesão interfacial fibra–matriz. Conforme descrito por Silva (2003), modificações dessa natureza favorecem maior difusão da matriz polimérica nas regiões interfibrilares, contribuindo para uma interface mais eficiente e, conseqüentemente, para melhores propriedades mecânicas do compósito.

Em contraste, a micrografia da fibra de PP sem tratamento revela uma superfície lisa, contínua e praticamente desprovida de rugosidade ou fissuras, típica de polímeros termoplásticos extrudados, que apresentam baixa energia superficial e comportamento hidrofóbico. A ausência de fibrilação ou irregularidades naturais indica um potencial limitado de ancoragem mecânica quando esse material é associado a fibras vegetais. A literatura confirma que a compatibilidade entre PP e fibras naturais é intrinsecamente baixa, devido à natureza hidrofóbica do polímero e à característica hidrofílica das fibras celulósicas, o que dificulta a adesão interfacial (Leão, 2012; Correa et al., 2003).

Entretanto, mesmo apresentando superfície lisa, também é possível observar pequenos depósitos brancos aderidos à superfície da fibra de PP. Esses depósitos podem estar associados à presença de produtos de hidratação do cimento ou de fases reativas provenientes do material pozolânico empregado na matriz. A incorporação de pozolanas tende a gerar compostos adicionais de silicato de cálcio hidratado (C–S–H), capazes de preencher microirregularidades e favorecer uma interface mais coesa entre fibra e matriz. Assim, ainda que o PP apresente baixa afinidade química natural, a deposição desses produtos de hidratação pode contribuir para uma melhoria local da aderência mecânica, funcionando como uma espécie de ponte física entre o polímero e a matriz cimentícia.

No MEV apresentado na Figura 27 é possível analisar a aderência e interação das fibras nos compósitos cimentícios de fibra de juta (a) e compósitos com fibra de polipropileno (b).

Figura 27 - MEV compósito de fibra de juta (a) e compósito de fibra de polipropileno (b) ampliada em 250x



Fonte: Autor (2025).

Nas micrografias apresentadas, é possível observar comportamentos distintos de interação entre as fibras e a matriz cimentícia para os dois tipos de reforço utilizados. Na micrografia referente ao compósito com fibra de juta, nota-se que um fragmento da matriz permanece aderido à superfície da fibra após o processo de fratura, indicando que houve arrancamento conjunto fibra-matriz. Esse comportamento sugere um nível significativo de adesão interfacial, uma vez que a matriz não se separou de maneira limpa da fibra, mas foi destacada em bloco, permanecendo rigidamente ligada a ela. Tal resposta é coerente com o efeito positivo do tratamento alcalino, que aumenta a rugosidade superficial da fibra e favorece o estabelecimento de ligações físicas e químicas com a matriz.

Entretanto, observa-se também que essa boa adesão não ocorre de maneira homogênea ao longo de toda a superfície da fibra. Em algumas regiões adjacentes ao seu perímetro são visíveis vazios e zonas de descolamento, indicando interrupções no contato efetivo com a matriz. Esse comportamento pode estar associado à própria natureza hidrofílica da fibra de juta: durante o processamento, a fibra tende a absorver água rapidamente, podendo causar retração local, formação de lacunas e microvazios ao perder parte da umidade aprisionada ao longo do tempo.

Por outro lado, a micrografia correspondente ao compósito reforçado com fibra de polipropileno (PP) revela uma interação diferente. Embora o PP apresente superfície lisa, baixa rugosidade e comportamento hidrofóbico observa-se que a ligação entre fibra

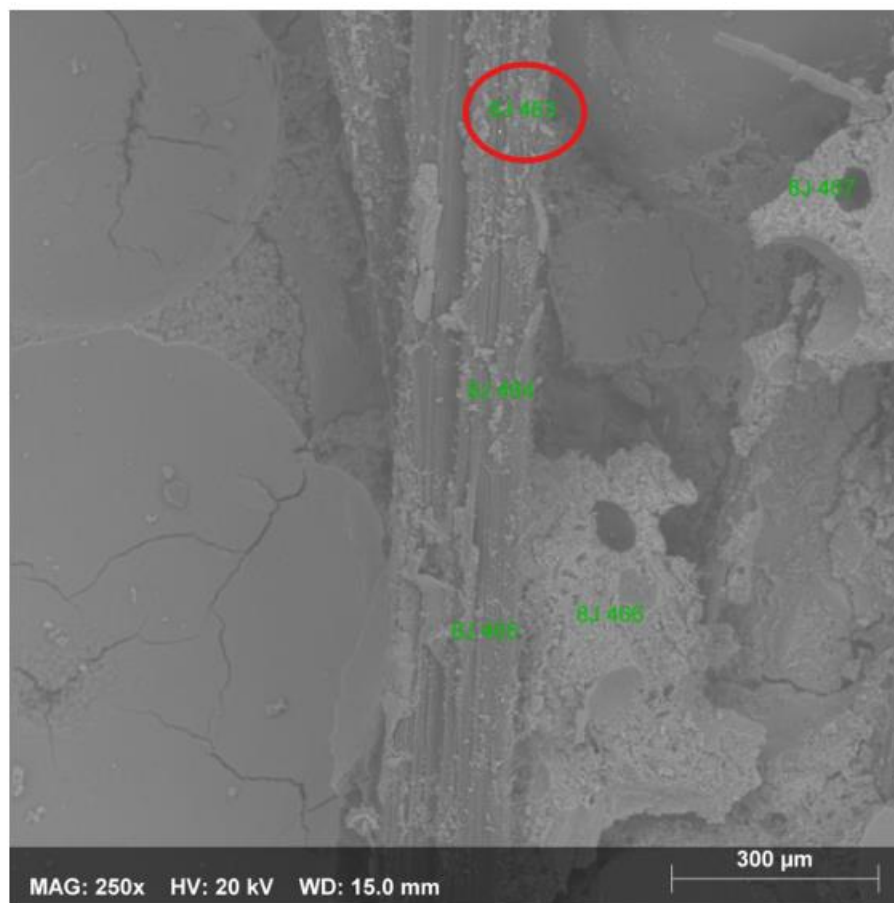
e matriz não é deficiente aos 28 dias. Esse comportamento pode estar relacionado ao uso de cinza da casca de arroz, que melhora a adesão fibra–matriz por meio da formação de C–S–H secundário, que preenche poros e consolida a região interfacial. A ação pozolânica reduz a presença de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, refina a microestrutura e densifica a zona de transição ao redor da fibra, favorecendo a ancoragem mecânica. Mesmo em fibras hidrofóbicas, como o polipropileno, a maior compacidade da matriz e a redução de água livre ao longo da cura contribuem para uma interface mais estável e resistente.

Além disso, aos 28 dias, a matriz cimentícia apresenta menor quantidade de água livre devido à progressão da hidratação, o que pode favorecer uma aderência física mais eficiente entre fibra hidrofóbica e matriz endurecida. A redução da água disponível diminui a tendência de formação de películas de água ao redor do PP, facilitando um encaixe mecânico mais estável dos produtos cimentícios ao redor da fibra. Assim, mesmo uma fibra com baixa afinidade química, como o polipropileno, demonstra um desempenho bom de adesão quando combinada com uma matriz contendo material pozolânico altamente reativo.

4.2.2 Análise espectroscopia por dispersão de energia (EDS) das fibras

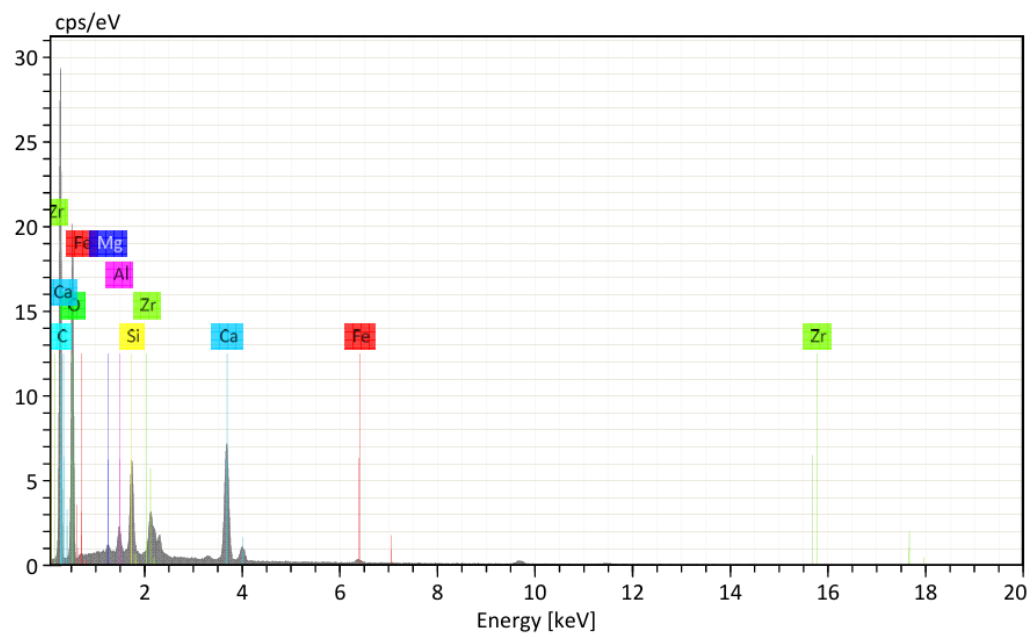
Neste estudo, foi realizado o ensaio de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), a qual possibilita identificar os elementos químicos presentes na superfície da amostra, bem como estimar suas respectivas intensidades relativas. Esse método complementa a análise microestrutural ao revelar a composição elementar dos produtos de hidratação e das interfaces fibra-matriz, permitindo compreender fenômenos como deposição de compostos, formação de fases cimentícias e possíveis interações químicas decorrentes do tratamento aplicado à fibra de juta. A Figura 29 apresenta a EDS referente ao compósito 0,8% juta, e a Figura 28 mostra em qual parte da fibra foi realizado o EDS.

Figura 28 - Região correspondente ao EDS



Fonte: Autor (2025).

Figura 29 - EDS fibra de Juta



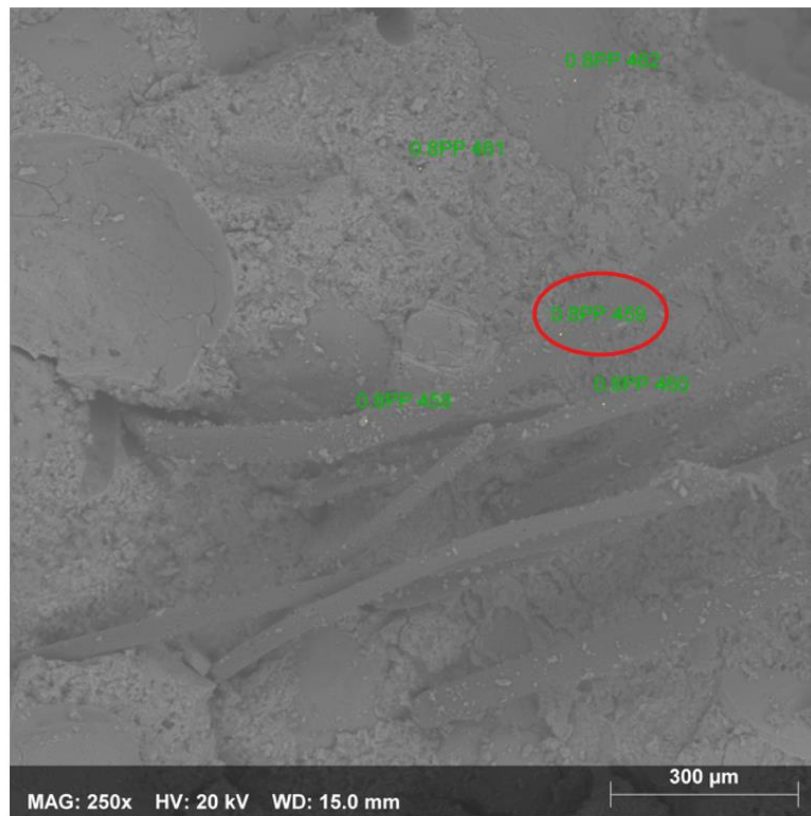
Fonte: Autor (2025).

A análise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) revelou a composição superficial da fibra de juta após o tratamento com hidróxido de cálcio. Observa-se a predominância de carbono (C) e oxigênio (O), elementos inerentes à estrutura lignocelulósica da fibra, indicando que sua composição orgânica essencial foi preservada (Pinto et al. 2022).

Os picos mais significativos do espectro correspondem ao cálcio (Ca), cuja presença aparece em duas faixas distintas de energia, sugerindo origens diferentes. Uma fração desse cálcio é associada diretamente ao tratamento com Ca(OH)_2 , responsável pela mineralização superficial da fibra. A segunda fração está relacionada aos produtos de hidratação do cimento, como CaCO_3 e, principalmente, C–S–H, que podem precipitar ou se fixar na superfície da fibra durante o contato com a matriz cimentícia. Essa dupla origem do cálcio confirma não apenas o efeito do tratamento, mas também a interação e adesão química entre fibra e matriz (Ferreira, 2016).

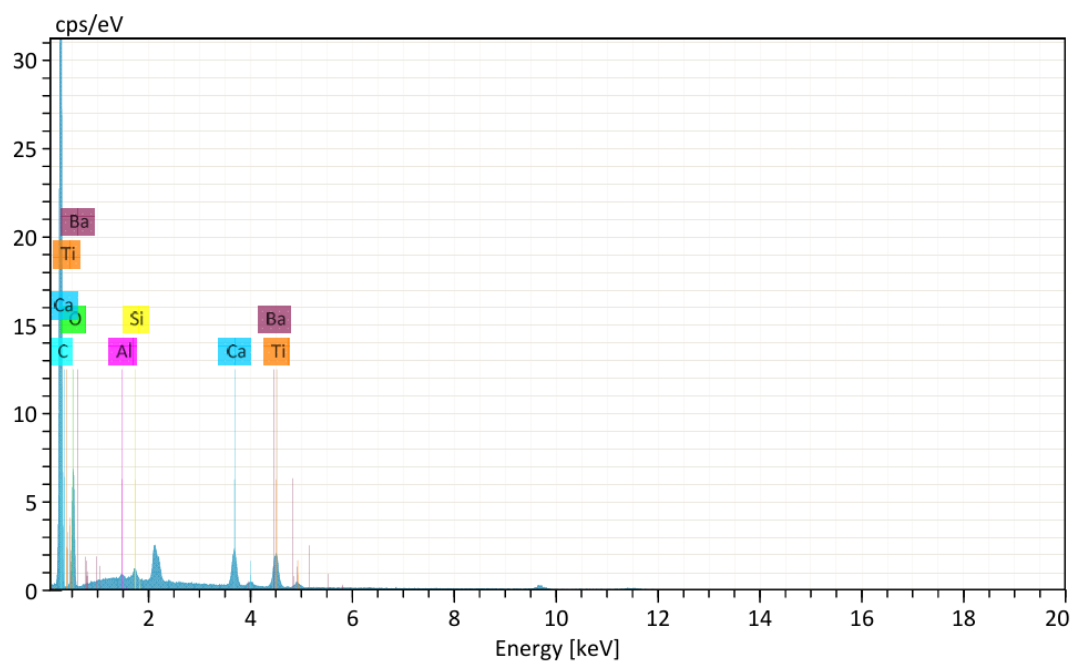
De forma geral, o EDS demonstra que o tratamento com hidróxido de cálcio proporcionou uma mineralização eficaz, favorecendo a estabilidade alcalina da juta e permitindo que a matriz cimentícia depositasse seus produtos de hidratação na superfície da fibra. Essa combinação fortalece a interface fibra–matriz e contribui para um desempenho superior do compósito. A Figura 31 apresenta a EDS referente ao compósito 0,8% juta, e a Figura 30 mostra em qual parte da fibra foi realizado o EDS.

Figura 30 - Figura 28 - Região correspondente ao EDS



Fonte: Autor (2025).

Figura 31 - EDS fibra PP



Fonte: Autor (2025).

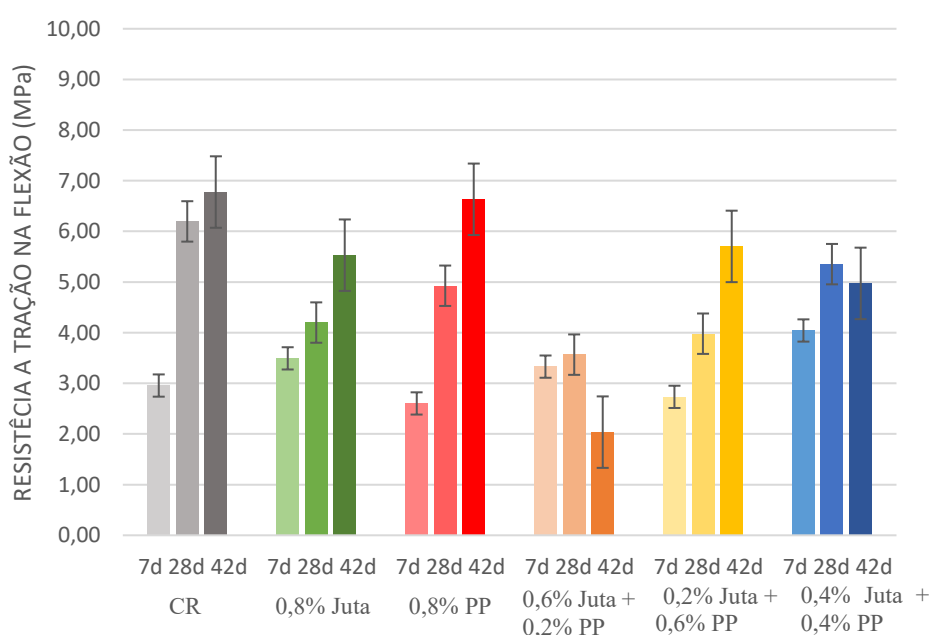
A análise por EDS da fibra de polipropileno mostrou que o pico mais intenso corresponde ao carbono, confirmando sua natureza orgânica, já que o PP é formado essencialmente por cadeias de carbono. Apesar de a fibra não ter sido submetida a tratamento, o espectro revelou ainda a presença de dois picos de cálcio, atribuídos tanto aos produtos de hidratação do cimento quanto aos resíduos da cinza da casca do arroz, que também contém traços desse elemento.

Também foram identificados elementos como silício (Si), alumínio (Al), magnésio (Mg) e ferro (Fe). Esses elementos estão relacionados tanto aos constituintes da matriz cimentícia. A presença desses elementos indica que partículas da matriz se depositaram na superfície da fibra, estabelecendo uma interação essencialmente física, coerente com o caráter inerte e hidrofóbico do PP, sem alterar sua composição química.

4.2.3 Ensaio de tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão teve como objetivo avaliar a capacidade dos compósitos cimentícios em resistir a esforços de tração indireta, analisando o efeito da adição das fibras de juta e polipropileno, isoladas e combinadas, em três idades de cura 7, 28 e 42 dias. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 32. Além disso o Apêndice A apresenta todos os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão em todos os distintos compósitos cimentícios e em idades de cura.

Figura 32 - Resistência a tração na flexão



Fonte: Autor (2025).

O CR, que não recebeu fibras, apresentou um comportamento esperado na evolução das propriedades mecânicas do compósito ao longo do tempo. Aos 7 dias, a resistência à tração na flexão foi de 2,96 MPa, valor compatível com o estágio inicial da cura, visto que o processo de hidratação do cimento ainda não está completo e a microestrutura do material permanece pouco consolidada. Aos 28 dias, houve um aumento na resistência, atingindo 6,20 MPa, o que evidencia o avanço da hidratação do cimento, e com isso o a formação de produtos cimentícios mais coesos, como o C-S-H (silicato de cálcio hidratado), principal responsável pelo ganho de resistência. Aos 42 dias, a resistência à tração na flexão atingiu 6,78 MPa, indicando a consolidação da matriz cimentícia. Esse comportamento demonstra que, após os ganhos expressivos nas idades iniciais, o compósito passa a apresentar um aumento mais gradual de resistência. O processo de hidratação atinge um ponto de equilíbrio, em que as reações se tornam menos intensas, resultando em valores mais estáveis e constantes.

O compósito com 0,8% de fibra de juta apresentou um comportamento distinto em relação ao corpo de prova de referência (CR), especialmente nas idades iniciais. Aos 7 dias, a resistência à tração na flexão foi de 3,49 MPa, valor superior ao do CR, evidenciando a influência positiva da adição de fibras no estágio inicial da cura. Nesse estágio, as fibras atuam de forma eficaz como pontes de transferência de esforços, controlando a propagação de microfissuras e reduzindo a fragilidade do material. A observação de falha por ruptura da fibra, em vez de arrancamento, sugere que o tratamento preliminar das fibras minimizou os efeitos negativos da hidrofília, permitindo que a força de ligação interfacial superasse a resistência da própria fibra nesse período.

Aos 28 dias, a resistência atingiu 4,20 MPa, um ganho notável em relação aos 7 dias, porém significativamente inferior (cerca de 32%) ao CR. Essa resistência inferior ao CR está diretamente ligada à formação de Zonas de Transição Interfacial (ZTI) menos aderentes entre as fibras e a matriz. Este fenômeno é decorrente da natureza hidrofílica da juta e da absorção de parte da água de hidratação localizada. Conforme a matriz se consolida, a remoção local de água resulta em uma ZTI mais porosa e com maior teor de Ca(OH)_2 , o que enfraquece a aderência mecânica e química, tornando a ZTI o ponto de falha do compósito nessa idade. Segundo Martins (2014) e Tolêdo Filho (1997), a elevada capacidade de absorção de água resulta em inchamento, que afasta a matriz ao redor. Com a perda de umidade e a consolidação da matriz, a fibra retoma seu tamanho original (contração), deixando pequenos vazios na ZTI. Essas variações dimensionais afetam

drasticamente a adesão, tornando a ZTI um ponto de falha e limitando a resistência final do compósito, conforme elucidado por Ghavami et al. (1999).

Aos 42 dias, a resistência alcançou 5,53 MPa, registrando um aumento de 32,2% em relação aos 28 dias. Este ganho indica que, embora o tratamento aplicado tenha sido eficaz em evitar a degradação acelerada e a consequente perda de resistência em idades avançadas, o valor final permanece abaixo do CR (6,78 MPa), confirmando a limitação do ganho de resistência em decorrência da ZTI.

O compósito com 0,8% de fibra de polipropileno apresentou um comportamento característico de materiais reforçados com fibras sintéticas hidrofóbicas. Aos 7 dias, a resistência à tração na flexão foi de 2,60 MPa, valor inferior ao corpo de prova de referência, o que pode estar relacionado à baixa aderência entre as fibras e a matriz cimentícia nesse estágio inicial. Yuan e Jia (2021) apud Ceconello (2024) destacam a dificuldade na interação das fibras sintéticas devido presença de água na superfície dessas fibras, esse efeito resulta em regiões de maior porosidade e menor densidade, comprometendo a interação na zona de transição fibra-matriz.

Aos 28 dias, a resistência atingiu 4,93 MPa, mostrando um ganho expressivo com o avanço da hidratação do cimento e a consequente densificação da matriz. Esse comportamento pode ser atribuído à redução da porosidade e ao preenchimento progressivo dos vazios ao redor das fibras, o que melhora a ancoragem física do PP, ainda que sem ligação química significativa.

Aos 42 dias, a resistência atingiu 6,63 MPa, registrando um ganho adicional de 34,5% em relação aos 28 dias. Este resultado é a confirmação do conceito de ancoragem mecânica e da durabilidade do PP. Como a fibra é inerte e não sofre degradação alcalina, o ganho de resistência da matriz nas idades avançadas se traduz em um travamento físico superior da fibra.

O compósito híbrido 0,6% Juta + 0,2% PP apresentou o pior desempenho em idades avançadas, obteve uma resistência de 2,73 e 3,57MPa aos 7 e 28 dias, respectivamente, com a resistência caindo para 2,04 MPa aos 42 dias. Esta redução de 42,8% é uma possível evidência de degradação estrutural acelerada. O resultado está diretamente ligado à baixa densidade no estado fresco, como indicado na Figura 23, a menor de todas as formulações, indicando um empacotamento deficiente e alta porosidade inicial da mistura. A matriz cimentícia resultante, sendo intrinsecamente mais fraca e porosa, facilitou a penetração rápida do meio alcalino até a zona de transição da juta. Este processo de degradação da fibra em uma matriz já enfraquecida levou ao colapso

estrutural do compósito entre 28 e 42 dias, demonstrando o efeito negativo da hibridização.

O compósito 0,6% de PP + 0,2% de juta registrou, inicialmente, a resistência mais baixa entre todos os compósitos. Aos 7 dias, a resistência foi de 2,73 MPa, o valor mais baixo entre todos os compósitos, inclusive inferior ao CR (2,96 MPa). Isso se deve à dominância do alto teor de polipropileno que, em um estágio inicial, possui baixa aderência química. No entanto, o desempenho melhorou drasticamente com a cura. A resistência apresentou um aumento expressivo, passando de 3,98 MPa (28 dias) para 5,70 MPa (42 dias), registrando o melhor desempenho final entre todas as formulações híbridas. Este resultado é amparado pela excelente densidade no estado fresco, indicando um empacotamento de alta qualidade que minimizou a porosidade. O alto teor de PP, por ser inerte, maximizou os benefícios da ancoragem mecânica em uma matriz densificada e de maior resistência, garantindo a estabilidade e o alto valor de resistência na idade final.

O compósito 0,4% Juta + 0,4% PP destacou-se por apresentar a melhor sinergia entre as formulações híbridas, refletida em seu desempenho inicial superior. Aos 7 dias, alcançou 4,04 MPa, a resistência máxima observada no início da cura. Aos 28 dias, atingiu 5,35 MPa, mantendo-se como o traço de maior resistência entre os compósitos reforçados com fibras, embora inferior ao do CR. Esse desempenho é atribuído à proporção equilibrada das fibras, permitindo que cada tipo atuasse em seus pontos fortes. A fibra de juta, que possui maior rigidez e módulo de elasticidade que o polipropileno, contribuiu principalmente para o ganho de resistência de pico inicial. O PP, com sua maior deformabilidade, atuou como reforço secundário, garantindo a tenacidade e suportando os esforços após a ruptura da juta, retardando a falha final. Dessa forma, a juta contribuiu para o reforço na fase de pico, enquanto o PP garantiu a estabilidade estrutural após a consolidação da matriz.

Tonoli et al. (2011) observaram este comportamento ao hibridizar fibras de sisal e de polipropileno. Os autores atribuíram o ganho de resistência à fibra de sisal e o ganho de ductilidade e tenacidade à fibra de polipropileno. O sistema híbrido mostrou-se eficiente comparado ao compósito reforçado apenas com fibras de sisal.

Além disso, Chandrakar et al. (2023) apresentaram resultados semelhantes ao hibridizarem diferentes teores de fibras de sisal e polipropileno, bem como de fibras de banana e polipropileno. Os autores analisaram as propriedades mecânicas dos compósitos aos 7 e 28 dias. Em ambos os casos, a hibridização mostrou-se eficaz, resultando em

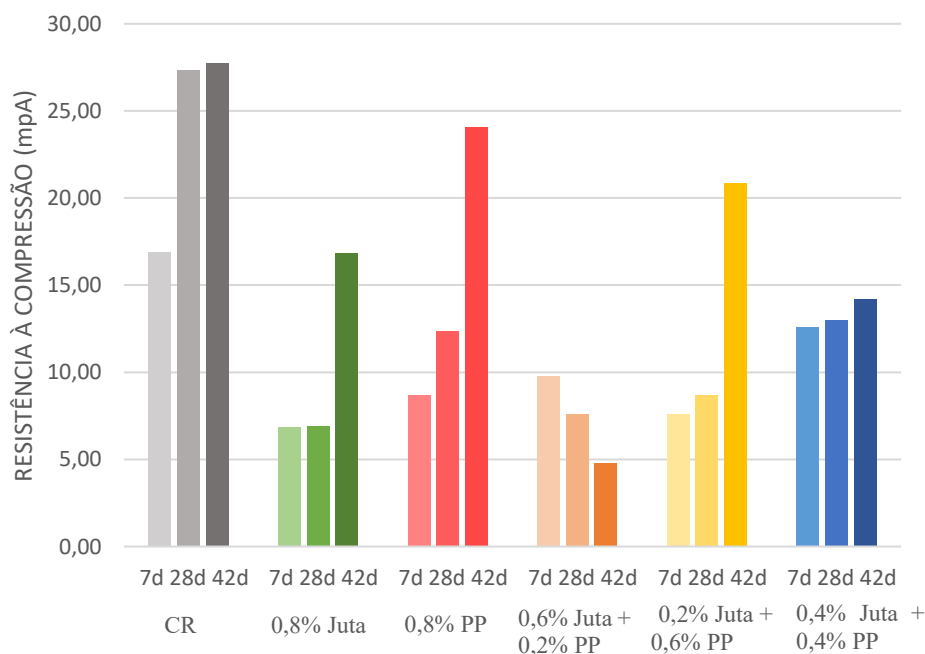
resistências superiores às obtidas com o uso individual das fibras, evidenciando o potencial sinérgico entre fibras naturais e sintéticas na melhoria das propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios.

Contudo, a evolução da resistência aos 42 dias demonstra uma transição na dominância do reforço. Apesar de alcançar 4,97 MPa, o compósito foi superado pelas formulações com maior teor de fibra sintética e pelo compósito incorporado com 0,8% juta.

4.2.4 Ensaio de compressão axial

O ensaio de resistência à compressão teve como objetivo avaliar a capacidade dos compósitos cimentícios em resistir a esforços axiais, analisando o efeito da adição das fibras de juta e polipropileno, isoladas e combinadas, em três idades de cura 7, 28 e 42 dias. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 33. Ainda, o Apêndice B demonstra todos os resultados dos ensaios de resistência à compressão em todos os distintos compósitos cimentícios e em idades de cura.

Figura 33 - Resistência à compressão



Fonte: Autor (2025).

O CR, sem adição de fibras, estabeleceu a resistência da matriz cimentícia, com valores de 16,88 MPa aos 7 dias e 27,37 MPa aos 28 dias. Este rápido ganho de resistência

inicial é um resultado esperado, e é potencializado pelo uso do Cimento Portland Composto CP II-F-40. Sua classe de resistência elevada e a presença de filler calcário (F) aceleram o processo de hidratação e a formação de produtos cimentícios nas idades precoces. Aos 42 dias, a resistência manteve-se estável em 27,74 MPa, indicando a consolidação da matriz.

O traço reforçado com 0,8% de fibra de juta resultou em uma redução da resistência à compressão nas três idades analisadas. Nas idades iniciais, dos 7 e 28 dias, o compósito obteve 6,85MPa e 6,92Mpa, respectivamente. Sob compressão, a integridade da matriz cimentícia é o fator dominante referente a resistência que a mesma irá atingir. A presença de uma fibra de caráter hidrofílica ocasiona uma ZTI frágil e porosa. A ZTI atua como um defeito microestrutural, tornando-se o ponto de falha sob cargas de compressão. Consequentemente a fibra compromete o desenvolvimento da microestrutura e da densidade da matriz, gerando uma redução na resistência a compressão. Além de que ao absorver a água livre da matriz, prejudica o processo de hidratação do cimento, prejudicando e reduzindo a resistência. Já aos 42 dias, o traço com 0,8% de juta atingiu uma resistência de 16,86Mpa, resultado ainda bem inferior ao alcançado pelo CR, porém observou-se uma expressiva melhora na resistência entre os 28 e 42 dias. Pode-se atribuir esse ganho de resistência por causa a hidratação tardia do cimento, que é facilitada pela fibra de juta. Devido a capacidade de absorção da fibra de juta, nos estágios iniciais a fibra absorve a água livre no meio da matriz. Porém, na idade dos 42 dias, a fibra de juta já começou a liberar lentamente a água que estava retida em sua estrutura. Essa água liberada atua como um reservatório interno e reabastece o cimento não reagido da matriz, permitindo que a reação de hidratação continue, especialmente na zona de transição.

Choi (2022) explica esse comportamento da hidratação tardia em compósitos reforçados com fibras naturais. O autor observou a incorporação 0,5% de diferentes fibras naturais, entre elas abacá, cânhamo e juta, e avaliou o calor de hidratação, velocidade do pulso ultrassônico e retração autógena, demonstrando que essas fibras retardam o início da hidratação e reduzem a resistência nas idades. Além disso, Choi evidencia que a absorção de água pelas fibras pode atuar como cura interna e influenciar o ganho de resistência em idades mais avançadas.

O compósito com 0,8% de polipropileno apresentou uma redução inicial da resistência à compressão, com 8,70 MPa aos 7 dias e 12,37 MPa aos 28 dias. Essa queda comparada ao CR é atribuída ao efeito físico do PP, que, apesar de ser inerte e não

interferir na hidratação do cimento, cria uma ZTI menos aderente devido à sua superfície lisa e hidrofóbica. Contudo, aos 42 dias, o compósito registrou aumento na resistência, alcançando 24,07 MPa, o que representa 86,8% da resistência final do CR. A redução da água livre na matriz, à medida que o cimento hidrata, pode melhorar a aderência entre fibra e matriz, resultando em uma interface mais densa e melhor desempenho mecânico em idades avançadas.

O traço reforçado com 0,6% de Juta e 0,2% de PP apresentou o pior desempenho de resistência à compressão, evidenciando uma queda progressiva ao longo das idades. Aos 7 dias, o compósito atingiu 9,79 MPa, mas já aos 28 dias caiu para 7,61 MPa, chegando a apenas 4,78 MPa aos 42 dias, valor correspondente a 17,2% da resistência final do CR. Essa regressão está diretamente associada à baixa densidade no estado fresco, indicando alta porosidade na microestrutura. Com a cura, os vazios presentes na matriz se tornam pontos frágeis, concentrando tensões e acelerando a falha do material sob compressão. A sinergia negativa entre as fibras, que dificultou a compactação, resultou em uma matriz fraca e descontínua, intensificando a degradação durante a cura.

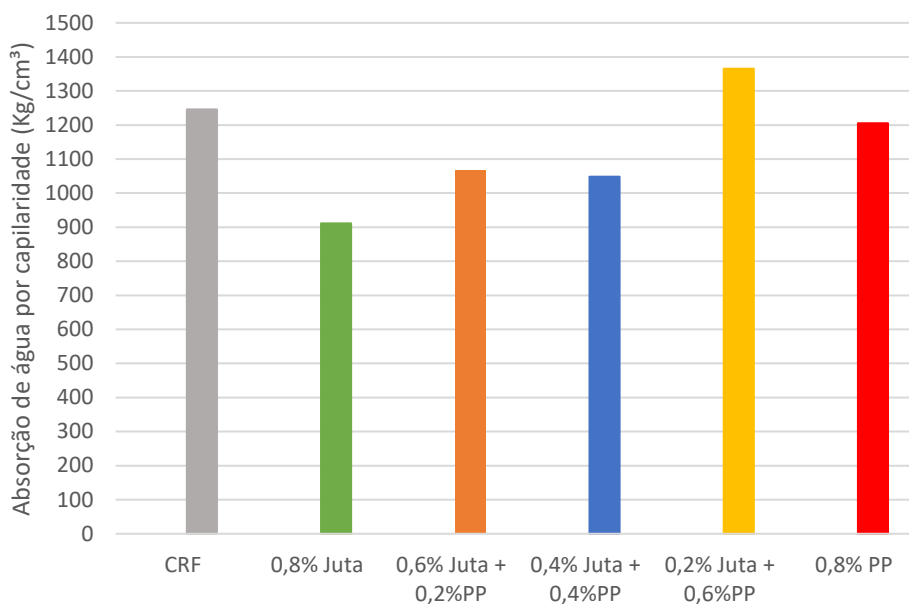
O compósito com 0,2% Juta e 0,6% PP apresentou resistência à compressão inicial baixa, com 7,60 MPa aos 7 dias e 8,71 MPa aos 28 dias. Aos 42 dias, no entanto, registrou um ganho exponencial, alcançando 20,84 MPa, sendo 75,1% do CR. Esse aumento é atribuído à melhoria da aderência da fibra de PP, que foi otimizado com a cura.

O compósito 0,4% Juta + 0,4% PP destacou-se por apresentar a melhor sinergia inicial entre as formulações híbridas, refletida em seu desempenho de 12,57 MPa aos 7 dias e 13,00 Mpa aos 28 dias. Esses valores, embora representem a resistência à compressão máxima entre os reforçados nas idades iniciais, mantiveram-se abaixo do CR. Contudo, a evolução da resistência demonstrou uma estagnação, alcançando apenas 14,20 MPa aos 42 dias.

4.2.5 Absorção de água por capilaridade e densidade no estado endurecido

O ensaio de absorção de água por capilaridade permitiu avaliar o comportamento dos compósitos quanto ao transporte de umidade através dos poros. O Apêndice C apresenta todos os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade em todas as horas registradas. Os resultados finais obtidos são representados na Figura 34.

Figura 34 - Absorção de água por capilaridade



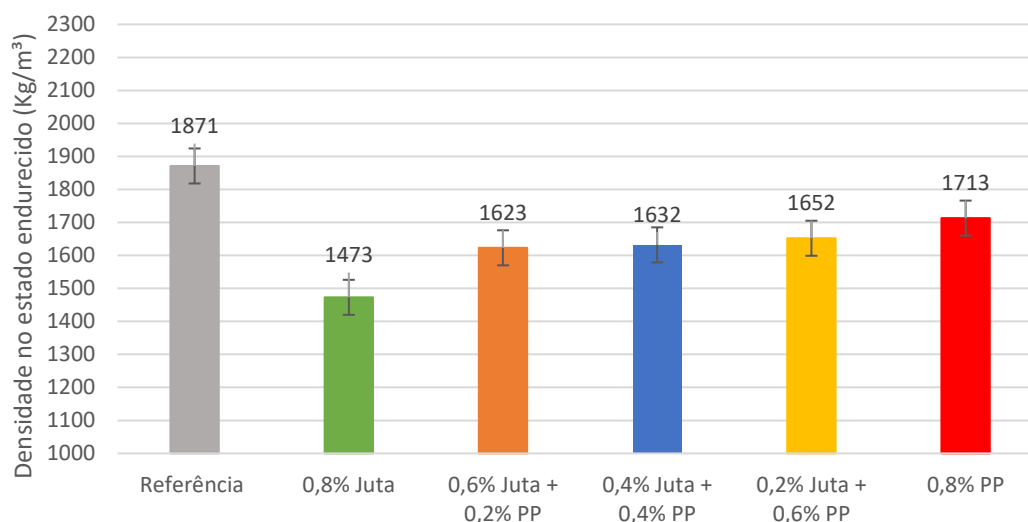
Fonte: Autor (2025).

O compósito que apresentou maior índice de absorção de água por capilaridade foi o 0,2% juta + 0,6% PP, com 1370 kg/m³, superando até mesmo o CR, que obteve 1250 kg/m³. O compósito 0,8% PP apresentou absorção de 1201 kg/m³. Já os compósitos híbridos 0,6% juta + 0,2% PP, 0,4% juta + 0,4% PP e o compósito exclusivamente reforçado com 0,8% juta apresentaram coeficientes de 1070 kg/m³, 1050 kg/m³ e 910 kg/m³, respectivamente.

Nota-se que o compósito incorporado somente com fibra de juta foi o que apresentou a menor taxa de absorção por capilaridade. Por ser hidrofílica, a fibra de juta absorve parte da água de amassamento e se expande; posteriormente, ao perder essa umidade durante a cura e secagem, a fibra deixa para trás macro poros na matriz. Comparativamente à matriz reforçada com 0,8% PP, que tende a formar uma rede de poros menores e mais interconectados, esses macros poros induzidos pela juta são menos eficientes para o transporte capilar de água. Isso ocorre porque o fenômeno da capilaridade é inversamente proporcional ao diâmetro do poro, de modo que poros maiores exercem menor força capilar e, portanto, promovem uma ascensão mais lenta e menos volumosa de água. Assim, apesar de mais poroso, o compósito 0,8% juta apresenta uma menor absorção capilar devido à predominância de poros grandes.

A densidade dos compósitos no estado endurecido é um parâmetro essencial para avaliar o empacotamento, o volume de ar retido e a formação de vazios após a cura. A Figura 35 apresenta os resultados obtidos nesse estado.

Figura 35 - Densidade no estado endurecido



O CR apresentou a maior densidade, atingindo 1871 kg/m³, com redução de 10,08% em relação ao estado fresco. O compósito com 0,8% de juta apresentou densidade final de 1473 kg/m³, com queda mais acentuada de 23,9%. Já o compósito com 0,8% PP alcançou 1713 kg/m³, representando redução de aproximadamente 19%.

Para os compósitos híbridos, as densidades aos 28 dias foram de 1623, 1652 e 1632 kg/m³ para as combinações 0,6% juta + 0,2% PP, 0,2% juta + 0,6% PP e 0,4% juta + 0,4% PP, respectivamente. As perdas de densidade associadas foram de 13,0%, 18,98% e 14,19%, indicando que as misturas híbridas apresentaram variações intermediárias quando comparadas aos compósitos com fibras individuais.

A redução da densidade entre os estados fresco e endurecido é um comportamento esperado, decorrente da evaporação da água não reagente durante a cura. No estado fresco, toda a água, tanto a destinada à hidratação quanto a água livre, contribuem para a massa inicial. À medida que o material cura, a água não consumida evapora, formando poros de evaporação. A perda de massa sem redução equivalente do volume aparente resulta na diminuição da densidade, sendo essa variação um indicativo indireto da porosidade total do compósito. Reduções mais acentuadas sugerem maior formação de vazios, o que pode afetar a resistência mecânica e a durabilidade.

5. CONCLUSÃO

Este estudo investigou o efeito da hibridização de fibras de juta com fibras de polipropileno, em compósitos cimentícios, mantendo constante o teor total de fibras em 0,8% do volume. Foi avaliado a resistência à compressão e à tração na flexão ao longo de três idades: 7, 28 e 42 dias. Os resultados mostraram que a incorporação dessas fibras influenciou positivamente nas propriedades mecânicas da matriz, embora de forma variada, dependendo do tipo de hibridização feita.

Os corpos de prova com aplicações individuais, de 0,8% Juta e 0,8% PP apresentaram resultados satisfatórios em relação ao objetivo de melhorar o desempenho à tração na flexão. As duas fibras apresentaram resultados opostos nas idades iniciais. O traço 0,8% juta apresentou resultados superiores ao CR aos 7 dias. Isso demonstrou a eficácia do tratamento alcalino em otimizar a aderência inicial da fibra natural, que atua como ponte em uma matriz cimentícia ainda fraca. A juta manteve um acréscimo de resistência nas idades de 28 e 42 dias, o que é um resultado positivo, posicionando-a entre os melhores traços nas três idades avaliadas, apesar de seu potencial ser limitado pela Zona de Transição Interfacial (ZTI).

Em contraste, o traço 0,8% PP apresentou o pior resultado inicial 7 dias, devido à sua natureza hidrofóbica que resultou em baixa aderência física e fraca transferência de tensões nesse estágio. No entanto, o desempenho do PP melhorou drasticamente aos 28 e 42 dias, o que está diretamente ligado à melhoria da aderência fibra-matriz através do travamento mecânico em uma matriz consolidada. Como o PP é inerte e não é afetado pela degradação alcalina, diferentemente da Juta, ele conseguiu alcançar a resistência final superior.

Individualmente, se tratando de resistência a tração na flexão as duas fibras são positivas. Em relação à resistência à compressão, a incorporação de ambas as fibras resultou em uma redução da resistência em comparação ao CR. A resistência à compressão é dominada pela integridade da matriz, e a presença das fibras, especialmente a Juta (devido à sua hidrofília), introduziu uma falta de homogeneidade microestrutural e Zonas de Transição Interfacial (ZTI) porosas, que atuam como defeitos e concentradores de tensão. Consequentemente, a fibra comprometeu o desenvolvimento da densidade e da resistência da matriz sob cargas compressivas.

Em relação a hibridização das duas fibras, é possível notar um efeito positivo de sinergia. O compósito 0,6% juta + 0,2% pp apresentou boa resistência a tração em idades

iniciais. Mas no decorrer da cura, apresentou resultados negativos, tendo perda de resistência. Já o traço 0,6%pp + 0,2% juta apresentou um comportamento inverso. Na idade inicial apresentou uma baixa resistência, menor do que a do CR. Porém com o avanço da cura, passou a ter um ganho alto resistência.

O compósito 0,4% Juta + 0,4% PP foi o que melhor revelou um efeito sinérgico. A juta contribuiu para a resistência inicial, tirando proveito do tratamento alcalino para fornecer a aderência necessária em uma matriz cimentícia com alta alcalinidade. Em contrapartida, o polipropileno garantiu a durabilidade e o ganho de resistência após a ruptura da fibra de juta. Apresentou uma boa resistência a tração aos 7 e 28 dias, aos 7 dias apresentou uma resistência maior do que a do CR, e apesar de aos 28 dias ter apresentado uma resistência menor do que a do CR, foi a melhor resistência apresentada entre os compósitos com incorporações de fibra. Porém aos 42 apresentou uma estagnação do ganho da resistência, tendo ultrapassada pelos compósitos inteiramente reforçados com pp ou majoritariamente. Isso indica que o tratamento para corrigir as dificuldades e características negativas para a fibra foi eficaz, porém até certa idade de cura do corpo de prova. O tratamento controlou a deterioração da fibra de juta em todos os casos dos 7 aos 28 dias, todos apresentaram ganhos que podem ser atribuídos a este fator. Porém a durabilidade da fibra e o controle em relação a característica hidrofílica da fibra não foi eficaz em idades mais avançadas, fazendo-o ser um fator determinante para estagnar o aumento de resistência e um possível melhor resultado dos compósitos. A fibra de juta não se manteve estável em toda a durabilidade do presente trabalho.

Os resultados indicaram que a hibridização entre a juta e o polipropileno tem grande potencial para aplicações em que a resistência à tração na flexão é necessária, porém deve-se ser investigado tratamentos superficiais que controlem melhor a absorção de água pela fibra de juta e a deterioração da mesma. Realizar mais de um ciclo imersão alcalina no hidróxido de cálcio, ou tratamentos com Silano ou látex poderiam melhorar esta questão.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- AGOPYAN, V. et al. **Developments on vegetable fibre–cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview**. *Cement and Concrete Composites*, v. 27, n. 5, p. 527-536, 2005.
- ARAÚJO, Myrela Vieira de. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras do epicarpo do coco babaçu para aplicação em placas cimentícias**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022.
- ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D3878-23: Standard Terminology for Composite Materials*. West Conshohocken, PA, 2023.
- BALLESTEROS, C. et al. **Influence of hornification on the pore structure of cellulose fibers**. *Carbohydrate Polymers*, v. 208, p. 169–176, 2019.
- BELTRAMI, Lílian Vanessa Rossa; SCIENZA, Lisete Cristine; ZATTERA, Ademir José. **Efeito do tratamento alcalino de fibras de curauá sobre as propriedades de compósitos de matriz biodegradável**. *Polímeros*, v. 24, p. 388-394, 2014.
- BERNARDI, Stefania Tesi. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida Kevlar**. 2003. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. 2. ed. New York: Taylor & Francis, 2007.
- BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. United Kingdom: Elsevier, 1990.
- CÁCERES, Alan Renato Estrada. **Caracterização geométrica e mecânica de macrofibras poliméricas**. 80 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- CALLISTER, William D. **Fundamentos da ciência e engenharia dos materiais**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002.
- CASTOLDI, Raylane de Souza. **Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos reforçados com fibras de polipropileno e sisal**. 147 f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

CLARAMUNT, Josep et al. **The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites.** *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 5, p. 586-595, 2011.

DEFOIRDT, N.; BISWAS, S.; VRIESE, L.; TRAN, L. Q. N.; ACKER, J. V.; AHSAN, Q.; GORBATIKH, L.; VUURE, A. V.; VERPOEST, I. **Assessment of the tensile properties of coir, bamboo and jute fibre.** *Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 41, n. 5, p. 588–595, 2010.

DIAS, Dainer Marçal. **Concreto reforçado com fibras poliméricas submetido a temperaturas elevadas.** 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

DITTENBER, D. B.; GANGARAO, H. V. S. **Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure.** *Composites: Part A*, Article in Press, 2012.

FERREIRA, S. R. **Effect of surface treatments on the structure, mechanical, durability and bond behavior of vegetable fibers for cementitious composites.** Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto reforçado com fibras.** 256 f. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

HANNANT, P. J. **Fibre cements and fibre concretes.** 1978.

ISLAM, M. S.; AHMED, S. **Influence of Jute Fiber on Properties of Fresh and Hardened Concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 178, p. 221–233, 2018.

JOHN, M.; THOMAS, S. **Biofibers and biocomposites.** *Carbohydrate Polymers*, v. 71, n. 3, p. 343-364, 2008.

LI, V. C.; STANG, H. **Classification of fibre reinforced cementitious material for structural applications.** In: 6th Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), Verenna, Italy, 2004. p. 197-217.

LIMA, P. R. L. **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal.** 2004. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2004.

LIMA, B. S. et al. **Influência da fibra de curauá em compósitos cimentícios: verificação da resistência à flexão e da resistência à compressão.** *Revista de Iniciação Científica da ULBRA*, v. 1, n. 9, p. 225-236, 2011.

LOU, Xiaolin; ZHU, Junyong. **Effects of drying-induced fiber hornification on enzymatic saccharification of lignocelluloses.** *Enzyme and Microbial Technology*, v. 48, n. 1, p. 92–99, 2011.

LUCENA, Júlio César Tavares de. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina.** 2017. Dissertação

(Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

MACHADO, P. J. C. **Estudo da durabilidade de compósitos cimentícios com polpa de eucalipto modificados com microssilica e látex.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades, materiais.** São Paulo: Pini, 1994.

MELO FILHO, J. A. **Desenvolvimento e caracterização de laminados cimentícios reforçados com fibras longas de sisal.** Dissertação de Mestrado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

MO, Kim Hung; ALENGARAM, U. Johnson; JUMAAT, Zamin; YUEN, Choon Wah; et al. **Recycling of seashell waste in concrete: a review.** Construction and Building Materials, v. 162, p. 751-764, fev. 2018.

MOURA, Heloise Oliveira Medeiros de Araújo. **Investigação do efeito de pré-tratamentos na estrutura de biomassas lignocelulósicas para o isolamento de celuloses de alta reatividade.** 2019.

NAAMAN, A. E.; NAMUR, G. G.; ALWAN, J. M.; NAJM, H. S. **Fiber pullout and bond slip. I: Analytical study.** Journal of Structural Engineering, v. 117, p. 2769–2790, 1991.

NAAMAN, A. E.; REINHARDT, H. W. **Proposed classification of FRC composites based on their tensile response.** Materials and Structures, v. 39, n. 5, p. 547–555, 2006.

NAAMAN, Antoine E. **Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites.** Journal of Advanced Concrete Technology, v. 1, n. 3, p. 241-252, 2003.

OLIVEIRA, A. M. **Fluência a altas temperaturas, aderência fibra matriz e comportamento mecânico sob ações higrótérmicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA.** Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.

PIMENTEL, M. G. et al. **Resposta à flexão e análise de tenacidade de argamassas reforçadas com fibra de Curauá.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 21, n. 1, p. 18-26, mar. 2016.

QUININO, Uziel Cavalcanti de Medeiros. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras.** 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ROMUALDI, J. P.; MANDEL, J. A. **Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed closely spaced short length of wire reinforcement.** ACI Proceedings Journal, v. 61, n. 6, p. 657-672, 1964.

- SALVADOR, Renan Pícolo; FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço**. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 18, p. 1273-1285, 2013.
- SANTOS, F. R. dos S. **Desenvolvimento e aplicação de compósitos à base de matriz polimérica reforçado com fibras de curauá (*Ananás erectifolius*) e resíduos de madeiras amazônicas**. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.
- SEDAN, D. et al. **Effect of chemical treatments on hemp fibers for improving adhesion with cement matrix**. *Composite Structures*, v. 82, n. 3, p. 429–437, 2008.
- SILVA, F. A.; MOBASHER, B.; TOLEDO FILHO, R. D. **Fatigue behavior of sisal fiber reinforced cement composites**. *Materials Science and Engineering A*, v. 527, n. 21–22, p. 5507–5513, 2010.
- SONG, H. et al. **A comprehensive overview of jute fiber reinforced cementitious composites**. *Case Studies in Construction Materials*, v. 15, n. e00724, p. e00724, 2021.
- SPADEA, Saverio; FARINA, Ilenia; BERARDI, Valentino Paolo; FRATERNALI, Fernando; et al. **Energy dissipation capacity of concretes reinforced with R-PET fibers**. *Ingegneria Sismica*, v. 2, p. 61-70, abr. 2014.
- THOMAS, S.; PAUL, S. A.; POTHAN, L. A.; DEEPA, B. **Natural fibres: structure, properties and applications**. In: KALIA, S.; KAITH, B. S.; KAUR, I. (Ed.). *Cellulose fibers: bio and nano polymer composites – green chemistry and technology*. Springer-Verlag, 2011.
- TOLEDO FILHO, R. D.; SCRIVENER, K.; ENGLAND, G. L.; GHAVAMI, K. **Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites**. *Cement & Concrete Composites*, v. 22, p. 127-143, 2000.
- TONOLI, G. H. D. et al. **Performance and durability of cement-based composites reinforced with refined sisal pulp and polypropylene fibers**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Reston, v. 23, n. 2, p. 177–187, 2011.
- WEI, J.; MEYER, C. **Utilization of rice husk ash in green natural fiber-reinforced cement composites: mitigating degradation of sisal fiber**. *Cement and Concrete Research*, v. 81, p. 94-111, 2015.
- ZOLLO, R. F. **Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development**. *Cement and Concrete Composites*, v. 19, p. 107-122, 1997.
- ZUKOWSKI, B. **Design and characterization of strain hardening Curauá fiber cement-based composites**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.
- SAVASTANO JR., H. **Zona de transição entre fibras e pasta de cimento Portland: Caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas do compósito**. 1992. 21 p. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

**APÊNDICE A – RESULTADOS ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA
FLEXÃO NAS 3 IDADES**

Idades do Ensaio	Compósito	Resistência a Tração na Flexão (Mpa)			Média Aritmética (Mpa)
7 dias	CR	2,22	3,03	3,62	2,96
	0,8%J	4,48	3,07	2,93	3,49
	0,8% PP	3,00	1,88	2,93	2,60
	0,6% J + 0,2% PP	3,29	3,41	3,29	3,33
	0,2% J + 0,6% PP	2,91	2,57	2,72	2,73
	0,4%J + 0,4% PP	3,86	4,48	3,79	4,04
28 dias	CR	5,20	7,29	6,10	6,20
	0,8%J	4,48	3,93	4,19	4,20
	0,8% PP	5,01	4,5	5,27	4,93
	0,6% J + 0,2% PP	3,24	3,72	3,74	3,57
	0,2% J + 0,6% PP	4,53	3,53	3,88	3,98
	0,4%J + 0,4% PP	5,6	3,62	6,84	5,35
42 dias	CR	7,22	7,39	5,72	6,78
	0,8%J	5,6	5,22	5,77	5,53
	0,8% PP	6,29	7,91	5,7	6,63
	0,6% J + 0,2% PP	1,91	1,96	2,24	2,04
	0,2% J + 0,6% PP	5,55	5,36	6,2	5,70
	0,4%J + 0,4% PP	5,27	4,79	4,86	4,97

**APÊNDICE B – RESULTADOS ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
NAS 3 IDADES**

Idades do Ensaio	Compósito	Resistência a Compressão (Mpa)						Média Aritm. (Mpa)
7 dias	CR	15,08	18,15	15,67	17,45	17,97	16,96	16,88
	0,8%J	7,4	5,91	6,03	6,21	6,55	9,02	6,85
	0,8% PP	9,51	9,18	10,4	6,97	8,5	7,65	8,70
	0,6% J + 0,2% PP	10,62	10,32	8,42	10,09	10,82	8,46	9,79
	0,2% J + 0,6% PP	8,07	7,93	6,59	9,18	5,06	8,77	7,60
	0,4%J + 0,4% PP	13,23	12,77	10,59	12,86	14,02	11,96	12,57
	28 dias	CR	31,17	24,9	29,67	26,09	23,16	29,25
0,8%J	6,3	8,21	6,1	5,22	8,75	MEV	4,20	
0,8% PP	15,39	13,8	8,77	13,00	10,87	MEV	4,93	
0,6% J + 0,2% PP	8,24	7,39	7,35	6,83	8,35	-	3,57	
0,2% J + 0,6% PP	6,08	10,18	6,37	9,55	11,36	-	3,98	
0,4%J + 0,4% PP	11,85	10,59	17,22	13,73	11,49	-	5,35	
42 dias	CR	31,58	30,84	26,53	23,57	29,99	23,93	27,74
0,8%J	13,61	14,1	17,5	17,7	15,73	16,49	16,86	
0,8% PP	23,79	25,10	22,49	22,75	25,84	24,43	24,07	
0,6% J + 0,2% PP	5,22	5,41	5,15	4,23	4,39	4,27	4,78	
0,2% J + 0,6% PP	-	21,88	22,45	20,08	19,41	20,38	20,84	
0,4%J + 0,4% PP	12,53	13,46	14,66	16,1	15,49	12,94	14,20	

Fonte: Autor (2025).

**APÊNDICE C – RESULTADOS ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR
CAPILARIDADE**

Massa (g)	Compósito					
	CR			0,8% Juta		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
Seco	481,8	486,8	485,3	392,16	388,91	387,03
3h	488,28	492,14	491,1	397,11	393,95	392,24
6h	490,44	494,5	493,7	398,99	395,55	393,45
24h	497,37	501,4	500,9	404,25	400,08	397,6
48h	500,2	504,7	503,4	407,15	403,02	400,46
72	502,1	506,7	504,9	407,61	403,38	400,85
Total ABS	20,3	19,9	19,6	15,45	14,47	13,82

Massa (g)	Compósito					
	0,8% PP			0,6% Juta + 0,2% PP		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
Seco	456,98	469,95	465,44	410,15	436,13	439,95
3h	463,76	477,27	471,91	415,97	442,96	446,88
6h	466,45	479,78	474,38	418,47	449,32	449,19
24h	472,46	484,55	479,26	423,27	449,86	454,13
48h	476,94	487,86	482,76	426,01	452,39	457,41
72	478,25	488,49	483,48	426,53	452,85	458,07
Total ABS	21,27	18,54	18,04	16,38	16,72	18,12

Massa (g)	Compósito					
	0,4% Juta + 0,4% PP			0,2% Juta + 0,6% PP		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
Seco	421,19	432,45	430,18	436,76	441,87	426,51
3h	427,46	438,35	436,86	444,53	450,15	434,46
6h	429,69	440,62	439,36	447,31	453,04	437,23
24h	434,09	444,24	443,8	453,4	458,87	443,36
48h	437,12	447,04	447,23	457,73	463,28	447,74
72	438,14	447,93	448,07	458,64	463,78	448,26
Total ABS	16,95	15,48	17,89	21,88	21,91	21,75

Fonte: Autor (2025).