

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANTONIO VÍTOR DUARTE DE ABREU  
RONAN CREMONINI ENTRINGER**

**ANÁLISE SOBRE COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS  
CIMENTÍCIOS REFORÇADOS EM MULTIESCALA, COM FIBRAS DE SISAL E  
MICROCELULOSE**

**VITÓRIA  
2023**

ANTONIO VÍTOR DUARTE DE ABREU  
RONAN CREMONINI ENTRINGER

**ANÁLISE SOBRE COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS  
CIMENTÍCIOS REFORÇADOS EM MULTIESCALA, COM FIBRAS DE SISAL E  
MICROCELULOSE**

Projeto de graduação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Civil do Centro  
Tecnológico da Universidade Federal do  
Espírito Santo, como requisito para obtenção  
do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Letícia Oliveira de  
Souza

**VITÓRIA  
2023**

ANTONIO VÍTOR DUARTE DE ABREU  
RONAN CREMONINI ENTRINGER

**ANÁLISE SOBRE COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS  
CIMENTÍCIOS REFORÇADOS EM MULTIESCALA, COM FIBRAS DE SISAL E  
MICROCELULOSE**

Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_\_\_.

**Banca Examinadora**

---

Dra. Letícia Oliveira de Souza  
**Orientadora**

---

Dr. Milton Paulino da Costa Júnior  
**Avaliador Interno**

---

Dra. Raylane de Souza Castoldi  
**Avaliadora Externa**

## AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossos sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a realização deste trabalho. Uma jornada como essa não teria sido possível sem o valioso apoio e contribuição de inúmeras pessoas.

Em primeiro lugar, desejamos expressar nossa profunda gratidão a Deus por nos proporcionar saúde e capacidade de realizar esse sonho.

Desejamos também expressar nosso sincero agradecimento à orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Letícia Oliveira de Souza, pela orientação, apoio e dedicação ao longo de todo o processo de pesquisa e desenvolvimento deste trabalho. Sua vasta experiência e conhecimento foram fundamentais para o sucesso desta pesquisa, e somos imensamente gratos por sua orientação precisa e incentivo constante.

Estendemos nossos agradecimentos, à Dr.<sup>a</sup> Raylane de Souza Castoldi e ao Prof. Dr. Milton Paulino da Costa Júnior, pela pronta disponibilidade e por aceitarem nosso convite para compor a banca deste trabalho.

Gostaríamos também de agradecer a todos os técnicos do Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção (LEMAC), Breno, Henrique, Luana e Márcio por dedicarem seu tempo e conhecimento auxiliando em todas as etapas de preparo e realização dos ensaios de nossa pesquisa.

Não podemos deixar de expressar nossa profunda gratidão à nossa família e as nossas namoradas, Enza Zanon e Janini Paganini, que nos apoiaram incondicionalmente durante esta jornada acadêmica. Suas palavras motivadoras, encorajamento constante, palavras e compreensão foram essenciais para superar os desafios e obstáculos encontrados ao longo do caminho.

Agradecemos também aos nossos amigos e colegas de classe, que compartilharam suas experiências e conhecimentos, contribuindo com a troca de ideias e críticas enriquecedoras.

Por fim, gostaríamos de agradecer a todos os profissionais do Departamento de Engenharia Civil, especialmente os professores, por nos transmitirem o conhecimento durante a realização das disciplinas, sendo fundamentais para nossa formação profissional.

Novamente, nossos sinceros agradecimentos a todos que direta ou indiretamente participaram desta pesquisa. Sua colaboração e suporte foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

## **RESUMO**

Atualmente, é bastante discutido o impacto que o setor da construção civil causa na conservação ecológica. Devido ao elevado índice de poluição e alto consumo energético causado pelas indústrias siderúrgicas, alternativas são buscadas para reduzir o consumo de aço. Uma alternativa promissora é o uso de fibras naturais provenientes de fontes renováveis. Visando superar a baixa fragilidade de matrizes cimentícias, as fibras naturais surgem como potencial reforço em elementos cimentícios em virtude de possuirem boas propriedades mecânicas. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o comportamento mecânico de compósitos reforçados com fibras de fonte celulósica em multiescala. Macro fibras de sisal e microcelulose foram adicionadas em diferentes porcentagens em uma matriz de argamassa. Foram moldados corpos de prova prismáticos da matriz de referência e dos compósitos. Para compatibilizar a matriz cimentícia com as fibras naturais, foi utilizada uma argamassa com baixo teor de hidróxido de cálcio. Os compósitos foram reforçados primeiramente apenas com fibras de sisal, com teores de 0,34, 0,67 e 1,12 % sobre a massa de material cimentício. Após definido o teor ótimo de sisal, os compósitos foram reforçados também com microcelulose, variando seus teores em 0,5, 1,0 e 1,5 % da massa de material cimentício, tornando-se um compósito reforçado em multiescala. A caracterização dos compósitos foi realizada por meio de ensaios de índice de consistência e ensaios de compressão e de flexão de 3 pontos, ao 28º dia de hidratação dos corpos de prova. De acordo com os resultados, a inserção de qualquer porcentagem de sisal e microcelulose alteraram o índice de consistência das argamassas, fazendo com que elas se tornassem menos fluidas. Ainda, observou-se a esperada diminuição da resistência à compressão, quando comparados com a matriz de referência. Porém, foi possível observar um aumento significativo da resistência à tração em todos os compósitos. Com o teor ótimo de sisal de 0,34%, e 0,5% de microcelulose, a resistência à tração aumentou em 75%.

**Palavras-chave:** Fibras de sisal; reforço em multiescala; microcelulose; MCC; compósitos cimentícios; resistência à tração na flexão; ensaio de flexão; fibras naturais; índice de consistência; celulose microcristalina.

## ABSTRACT

Currently, there is significant discussion regarding the impact of the construction sector on ecological conservation. The steel industry is known for its high pollution levels and energy consumption, so alternatives are proposed to reduce steel consumption. One promising alternative is the use of natural fibers from renewable sources. Aiming to overcome the low fragility of cementitious matrices, natural fibers are emerging as a potential reinforcement in cementitious elements due to their good mechanical properties. The objective of this research was to evaluate the mechanical behavior of composites reinforced with cellulosic fibers in multiscale. Macro sisal fibers and cellulose microcrystalline were added in different percentages to a mortar matrix. Prismatic specimens of the reference matrix and composites had been molded. To compatibilize the cementitious matrix with the natural fibers, a mortar with a low content of calcium hydroxide has been used. The composites had been initially reinforced only with sisal fibers at levels of 0,34, 0,67 and 1,12 %. After selecting the optimal sisal content, the composites had been also reinforced with microcellulose, varying its content at 0.5, 1.0 and 1.5% of the mass of cementitious material, becoming a multiscale reinforced composite. The characterization of the composites was made by means of consistency index test, Three-point bending test and compression test on the 28<sup>th</sup> day of specimen hydration. According to the results, the addition of any percentage of sisal and microcellulose altered the consistency index of the mortars, making them less fluid. Furthermore, the expected decrease in compressive strength had been observed when compared it to the reference matrix. However, a significant increase in tensile strength has been observed in all composites. With the optimal sisal content of 0,34 % and 0.5% of microcellulose, the tensile strength increased by 75%.

**Keywords:** Sisal fibers; multiscale reinforcement; Sisal; microcellulose; MCC; cementitious composites; tensile strength; bending test; natural fibers; consistency index; microcrystalline cellulose.

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Atuação das fibras formando pontes através das fissuras e transferindo as forças entre elas.....	18
Figura 2 – Classificação da dispersão das fibras em uma, duas ou três dimensões	21
Figura 3 – Classificação das fibras vegetais .....	24
Figura 4 – <i>Agave Sisalana</i> .....	26
Figura 5 – Corte e colheita das folhas de sisal.....	26
Figura 6 – Fibras de sisal após desfibramento.....	27
Figura 7 – Secagem das fibras de sisal ao ar livre .....	28
Figura 8 - Estrutura morfológica de uma fibra natural .....	28
Figura 9 – Fluxograma demonstrando a sequência dos métodos utilizados .....	35
Figura 10 – Cimento Portland CPIII-RS 40MPa da marca Mizu.....	36
Figura 11 – Metacaulim HP ULTRA .....	36
Figura 12 – Baia contendo areia, localizada no LEMAC .....	37
Figura 13 - Aditivo químico Glenium 51 .....	38
Figura 14 – Fibras de sisal fornecidas.....	38
Figura 15 – Microcelulose .....	39
Figura 16 - Argamassadeira planetária com capacidade de 5 litros .....	43
Figura 17 – Argamassa da matriz de referência.....	44
Figura 18 – Etapa de preenchimento dos moldes com a argamassa.....	45
Figura 19 – Corpos de prova desmoldados .....	45
Figura 20 – Tanque de imersão .....	46
Figura 21 – Fibra de sisal adicionada na cuba juntamente com os materiais finos...	47
Figura 22 – Ranhuras na argamassa .....	47
Figura 23 – Corpos de prova de 1,12 % de sisal moldados e levados para câmara úmida .....	48
Figura 24 – Corpos de prova com fibra de sisal e microcelulose após 24 horas moldados.....	49
Figura 25 – Fibras de sisal em processo de beneficiamento submersas em água a 70 °C .....	49
Figura 26 – Fibras de sisal penduradas no varal para etapa de secagem durante 48 horas .....	50
Figura 27 – Fibras de sisal escovadas com aparato de cerdas de pregos.....	50

Figura 28 – Fibras de sisal cortadas em comprimento de $25 \pm 1$ mm .....	51
Figura 29 – Ensaio de massa específica do sisal utilizando proveta volumétrica graduada .....	51
Figura 30 – Porção de areia peneirada .....	52
Figura 31 – Ensaio de massa específica da areia utilizando frasco de Chapman.....	53
Figura 32 – Peneiras dispostas no peneirador .....	54
Figura 33 – Ensaio de massa específica do cimento utilizando frasco volumétrico de Le Chatelier .....	55
Figura 34 – Ensaio de massa específica do Metacaulim utilizando frasco volumétrico de Le Chatelier .....	56
Figura 35 – Tronco de cone sobre a mesa de abatimento .....	57
Figura 36 – Argamassa disposta no molde em formato de tronco de cone .....	58
Figura 37 – Medição do diâmetro da argamassa antes dos golpes .....	58
Figura 38 – Espalhamento da argamassa e medição dos diâmetros após os golpes .....	59
Figura 39 – Máquina EMIC.....	60
Figura 40 – Corpo de prova acoplado no dispositivo de carga para realização do ensaio de resistência à tração na flexão. ....	61
Figura 41 – Rompimento do corpo de prova .....	62
Figura 42 - Corpos de prova com 0,67 % de fibras de sisal .....	63
Figura 43 - Dispositivo de carga para ensaios de compressão .....	64
Figura 44 - Curva granulométrica da areia .....	68
Figura 45 - Argamassa da matriz de referência .....	69
Figura 46 - Compósito reforçado apenas com fibras de sisal, com teor de 1,12 %...70	70
Figura 47 - Compósito reforçado com fibras de sisal e microcelulose, com teor de 1,5% de microcelulose .....	70
Figura 48 - Comparativo entre índices normalizados de consistência da matriz de referência com compósitos reforçados com fibras de sisal .....	75
Figura 49 - Comparativo entre índices normalizados de consistência da matriz de referência com a variação de teor de dosagem ótima de fibras de sisal e com compósito reforçado em multiescala .....	75
Figura 50 - Corpos de prova com 0,34 % de fibras de sisal .....	78
Figura 51 - Corpos de prova com 1,12 % de fibras de sisal .....	78
Figura 52 - Gráfico de barras comparando os valores médios das resistências à	

flexão dos compósitos produzidos e da matriz de referência .....	80
Figura 53 - Gráfico de barras comparando os valores médios das resistências à compressão dos compósitos produzidos e da matriz de referência .....	82

## **LISTAS DE QUADROS**

Quadro 1 – Propriedades típicas de fibras utilizadas como reforço. ....	21
Quadro 2 - Propriedades típicas das fibras sintéticas .....	23
Quadro 3 - Propriedades típicas de algumas fibras naturais.....	25
Quadro 4 – Composição química de algumas fibras naturais .....	29
Quadro 5 - Dosagem dos corpos de prova .....	42
Quadro 6 – Massa específica dos materiais utilizados na pesquisa .....	66
Quadro 7 – Análise granulométrica da areia .....	67
Quadro 8 - Resultados dos ensaios de índice de consistência das variações produzidas.....	69
Quadro 9 - Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão de 3 pontos de todos os corpos de prova produzidos.....	72
Quadro 10 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão de todos os corpos de prova produzidos .....	73

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

LEMAC	Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção
MCC	Celulose Microcristalina
NBR	Norma Brasileira
Rpm	Rotações por minuto
NM	Norma Mercosul
CPIII-RS	Cimento Portland de alto forno resistente a sulfatos
S.D	Sem dados

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	12
1.2 OBJETIVOS .....	15
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS.....	17
2.2 FIBRAS .....	20
<b>2.2.1 Fibras sintéticas.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2 Fibras naturais .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.3 Fibra de Sisal.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.4 Celulose microcristalina.....</b>	<b>31</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>34</b>
3.1 MATERIAIS .....	35
3.2 COMPÓSITO .....	39
<b>3.2.1 Dosagem.....</b>	<b>39</b>
3.2.1.1 Matriz cimentícia .....	39
3.2.1.2 Compósito reforçado com fibra de sisal.....	41
3.2.1.3 Compósito reforçado com fibra de sisal e microcelulose .....	41
<b>3.2.2 Moldagem da matriz de referência .....</b>	<b>43</b>
<b>3.2.3 Moldagem do compósito reforçado com fibra de sisal .....</b>	<b>46</b>
<b>3.2.4 Moldagem do compósito reforçado com fibra de sisal e microcelulose.....</b>	<b>48</b>
3.3 MÉTODOS .....	49
<b>3.3.1 Caracterização dos materiais .....</b>	<b>49</b>
3.3.1.1 Fibra de sisal .....	49

3.3.1.2 Agregado miúdo .....	52
3.3.1.3 Cimento .....	54
3.3.1.4 Metacaulim .....	56
<b>3.3.2 Caracterização dos compósitos no estado fresco.....</b>	<b>56</b>
<b>3.3.3 Caracterização dos compósitos no estado endurecido .....</b>	<b>59</b>
3.3.3.1 Resistência mecânica à tração na flexão em 3 pontos .....	61
3.3.3.2 Resistência à compressão.....	64
<b>4 RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>	<b>66</b>
4.1 RESULTADOS .....	66
<b>4.1.1 Caracterização dos materiais .....</b>	<b>66</b>
<b>4.1.2 Caracterização dos compósitos no estado fresco.....</b>	<b>68</b>
<b>4.1.2 Caracterização dos compósitos no estado endurecido .....</b>	<b>71</b>
4.1.2.1 – Resistência à tração na flexão de 3 pontos .....	71
4.1.2.2 – Resistência à compressão.....	72
4.2 ANÁLISES.....	74
<b>4.2.1 Modificações na consistência .....</b>	<b>74</b>
<b>4.2.2 Modificações no comportamento mecânico .....</b>	<b>77</b>
4.2.2.1 Resistência à tração na flexão.....	77
4.2.2.2 Resistência à compressão.....	80
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>84</b>
5.1 CONCLUSÕES .....	84
5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	86
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>87</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC), a construção civil é um dos setores de maior relevância na indústria por ser um dos maiores geradores de emprego e renda de um país. A construção civil é considerada um importante indicador de crescimento da economia e também da movimentação da população pelo país. Isso se dá devido ao intenso fluxo de trabalhadores para grandes cidades, e por isso a construção de novas estruturas urbanas é uma realidade pela qual observamos o crescimento constante dos principais municípios do Brasil. Portanto, além de fortalecer a economia, a construção civil está ligada diretamente com o bem-estar da população e desenvolvimento social (CBIC, 2021).

A construção civil é reconhecida como um dos setores que consomem significativamente os recursos naturais. É bastante discutido o impacto negativo desse setor na conservação ecológica, principalmente devido aos níveis elevados de emissão de gases poluentes que contribuem para o aquecimento global. A geração de gases está distribuída em toda cadeia produtiva desse setor, começando pela extração e beneficiamento de diversas matérias primas, como ferro, alumínio, argila, areia, calcário, entre outros, até a finalização de uma obra (DA SILVA et al., 2020). Responsável pela produção de aço, a indústria siderúrgica respondeu por 6,2% de toda a energia consumida no Brasil no ano de 2014, além de 6,5% das emissões mundiais de gases carbônicos do mesmo período (PAULA, 2014). Diante disso, são exploradas alternativas para reduzir o consumo do aço, substituindo-o por materiais que possam desempenhar papel semelhante. Dentre algumas alternativas existentes, há o uso de fibras naturais provenientes de fontes renováveis, que podem unir boas propriedades mecânicas ao compósito e proporcionar benefícios ao meio ambiente (ARDANUY et al., 2015).

Mesmo que por muitas vezes o cimento tenha impacto negativo na conservação ecológica, ele é um material amplamente utilizado na construção civil por ser o principal aglomerante do concreto. Ainda, o concreto possui pontos negativos por ser considerado um material frágil: baixa capacidade de suportar deformações e, quando submetido a esforços de tração, apresenta rápida propagação de fissuras. Por conta disso, normalmente utiliza-se aço como reforço, devido a suas características

dúcteis, que passam a absorver os esforços de tração (BENTUR; MINDESS, 2007). Além do uso do aço, para este mesmo fim há também o incremento de fibras que ficam por entre a matriz cimentícia, adicionadas durante a etapa de mistura (FIGUEIREDO, 2011).

Atualmente existem diversos tipos de fibras sendo usadas, de diferentes materiais e formatos. As mais utilizadas como reforço no concreto são as fibras sintéticas de aço e as de polipropileno. A forma mais comum de se utilizar fibras é dispersas aleatoriamente na matriz cimentícia (PEREIRA, 2017). Normalmente as fibras são utilizadas como reforço secundário nos compósitos, ou seja, evita-se sua utilização em elemento com maior responsabilidade estrutural. As fibras de aço podem ser utilizadas como reforço primário, mas são susceptíveis a degradação por corrosão (FIGUEIREDO, 2000). Ademais, as fibras de polipropileno não são indicadas como reforço primário devido a falta de normas técnicas específicas (FIGUEIREDO, 2014). Diante do contexto ambiental abordado e de acordo com Pickering et al. (2016), o grande volume necessário de matéria prima mineral e química para a produção de fibras sintéticas, bem como os resíduos gerados e o descarte dos mesmos, causam grandes efeitos negativos no meio ambiente, deixando de ser atrativa do ponto de vista ecológico.

A partir disso, fibras naturais provenientes de fontes renováveis surgem como um recurso em elementos não estruturais, em detrimento ao uso de fibras sintéticas. Em comparação ao uso de outras fibras sintéticas, as de origem natural como as fibras de coco, bambu, cana-de-açúcar, sisal entre outras, possuem uma série de vantagens, principalmente em relação aos impactos no meio ambiente. Elas são recicláveis, biodegradáveis e não tóxicas, além da sua fonte ser um material renovável, de baixo custo e que necessita de baixo consumo de energia na produção (SAVASTANO, 1986).

Segundo Bentur e Mindess (1990), independentemente de seu tipo, as fibras tem o objetivo de diminuir a retração, gerar um aumento de tenacidade, ductilidade e resistência do compósito. Possuem a capacidade de criar pontes entre fissuras e assim, terem um maior controle sobre sua propagação. Desse modo, a adição de fibras traz uma melhoria nas propriedades mecânicas dos compósitos, visto que quando a matriz fissa, as fibras suportam a maior parte das tensões de tração atuantes (FIGUEIREDO, 2011).

Diante de todos estes pontos positivos, para Castoldi (2018), a utilização de

fibras naturais na produção de elementos não estruturais ainda é pequena visto que é necessário entender de forma precisa o comportamento mecânico do reforço, para assim dimensionar com segurança e economia os elementos. A falta de estudos em abundância e a baixa capacidade dessas fibras atuarem em meios alcalinos, como o concreto, dificultam sua inserção mais rápida ao mercado (BERGSTROM; GRAM, 1984). Portanto, é necessário haver estudos que incentivam e abordam o conceito de fibras naturais na construção civil, visto que é de suma importância seu impacto positivo ao meio ambiente, junto com suas boas propriedades mecânicas.

## 1.2 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo principal avaliar e comparar propriedades mecânicas de compósitos reforçados em multiescala com fibras de sisal e microcelulose, em diferentes porcentagens.

Dentre seus objetivos específicos, o estudo abordou aspectos como:

- Beneficiamento das fibras de sisal para torná-las compatíveis com as condições de uso junto a matriz cimentícia;
- Caracterização dos materiais para que os cálculos de dosagem sejam precisos;
- Caracterização da matriz de referência e dos compósitos quando em estado fresco;
- Caracterização da matriz de referência e dos compósitos quanto a parâmetros mecânicos (resistência à tração na flexão e resistência à compressão);
- Realização de estudo de dosagem a partir da resistência à tração, para macrofibra e microfibra.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 1 traz a introdução e os objetivos deste trabalho.

O Capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica, apresentando informações sobre as fibras sintéticas e naturais. Além disso, traz estudos acerca da utilização de fibras como reforço em compósitos cimentícios.

No Capítulo 3, são descritos os materiais utilizados e a dosagem adotada na produção da matriz de referência, bem como nos compósitos reforçados com fibra de sisal e microcelulose. Além disso, são abordados os métodos empregados na caracterização dos materiais, assim como na caracterização da matriz e dos compósitos tanto em seu estado fresco quanto em seu estado endurecido.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos de resistência à tração pela flexão e resistência à compressão dos compósitos em estado endurecido, e a trabalhabilidade dos compósitos em estado fresco. Além disso, são realizadas as análises desses resultados neste capítulo.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões sobre o trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

O concreto possui diversas vantagens e características que lhe fazem tornar um dos materiais mais utilizados do mundo. Quando reforçados tanto com barras ou fios de aço quanto com fibras, pode ser chamado de compósito. Portanto, um compósito é um material obtido da combinação de outros materiais, resultando em propriedades melhores do que as de seus constituintes separados. No entanto, é frequentemente utilizado para materiais que possuem algum tipo de reforço (BENTUR; MINDESS, 1990).

Há décadas o conceito de materiais frágeis reforçados com fibras é conhecido com a finalidade de melhorar o comportamento da matriz. Registros indicam uso de fibras de palha de trigo há aproximadamente 3500 anos na incorporação da argila para produção de tijolos (BENTUR; MINDESS, 2007; FIGUEIREDO, 2011). Porém, só a partir da década de 70 que as fibras naturais passaram a ter maior atenção para seu incremento, com objetivo de substituir fibras de amianto, devido às suas propriedades cancerígenas (TONOLI et al., 2011). Desde então, mais tipos de fibras tomaram seu espaço e vem sendo utilizadas para diversas demandas em matrizes cimentícias, como as fibras de carbono, fibras de vidro, alguns tipos de fibras sintética e também fibras provenientes de origem natural, como é o caso da fibra de sisal, objeto de estudo neste trabalho (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2002).

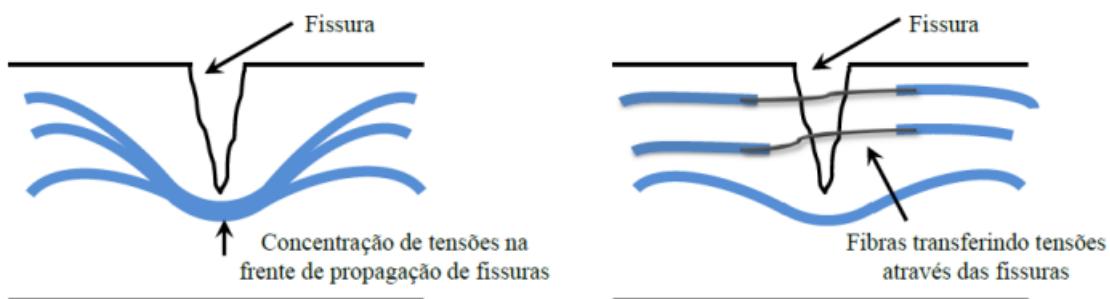
Os materiais que podem compor um compósito são classificados da seguinte forma: a matriz e os elementos de reforço. A matriz confere estrutura ao material compósito e preenche os vazios que ficam entre os materiais de reforço, mantendo-os em suas posições (HERAKOVICH, 1997; BENTUR; MINDESS, 1990). Os elementos de reforço, por sua vez, são responsáveis por melhorarem as propriedades mecânicas e garantir ao compósito acréscimo de resistência principalmente de tensões de tração (KAW, 2006).

Da mesma forma para barras de aço, a utilização de fibras como reforço em compósitos cimentícios se dá, principalmente, pela fragilidade e limitação de desempenho do concreto quando submetido a esforços de tração. Segundo Mehta e Monteiro (2006), por mais que o concreto possua diversas vantagens como fabricação simples, custo relativamente baixo, alta durabilidade e elevada resistência a

compressão, possui também pontos negativos como baixa relação resistência/peso e comportamento frágil com baixa capacidade de deformação quando submetido a esforços de tração. Diante disso, visando agregar ao material maior ductibilidade e resistência a esforços de tração, há a opção de adicionar fibras como reforço.

As vantagens de se usar fibras como reforços em materiais cimentícios começa pela sua adição, que é feita na mistura da matriz como se fosse qualquer outro material da formulação da matriz, anulando a necessidade de executar atividades que demandariam muito tempo, como montagem das armaduras feitas de barras de aço (FIGUEIREDO, 2011). Além desta, há o comportamento dúctil que o compósito adquire após as primeiras fissuras na matriz cimentícia, devido as fibras formarem pontes entre as fissuras e transferirem as forças entre elas, reduzindo a velocidade de propagação, melhorando a capacidade pós fissuração e aumentando a tenacidade à flexão (PEREIRA, 2017; FIGUEIREDO, 2011). Essa característica minimiza a concentração de tensões nas extremidades da fissura, restringindo ou reduzindo sua velocidade de propagação. Apesar das fibras possuírem um potencial de controlar a abertura e crescimento das fissuras, a presença das mesmas não impede a sua formação (AUERSVALDT et al., 2019). A Figura 1 a seguir demonstra a concentração de tensões para uma matriz sem adição de fibras e outra matriz com adição de fibras.

Figura 1 – Atuação das fibras formando pontes através das fissuras e transferindo as forças entre elas



Fonte: (SALVADOR; FIGUEIREDO, 2013)

Entretanto, para Figueiredo (2011), há desvantagens quanto ao uso de fibras e elas estão associadas com a incerteza de cálculo da sua capacidade de reforço, pois é difícil avaliar com precisão seu posicionamento e distribuição dentro da matriz. Além disso, há a dificuldade que as fibras naturais e as de vidro possuem em manter sua

performance em meios alcalinos, ocasionando decréscimo de tenacidade e resistência do material logo no início das fissuras (WEI; MEYER, 2015). Outro ponto negativo é a possível diminuição da resistência à compressão do compósito (CASTOLDI, 2018).

De acordo com Bentur e Mindess (1990) a escolha de qual fibra deve ser usada depende do que se espera do compósito cimentício. As fibras que possuem módulo de elasticidade alta originam compósitos com elevada resistência à tração, rigidez e absorção de cargas dinâmicas. Ademais, as de baixo módulo de elasticidade conseguem absorver grandes energias, tendo seus compósitos elevada resistência ao impacto e ductilidade aparente. Ainda, cada fibra natural tem características específicas e, para cada situação, um determinado tipo de fibra se mostra mais adequado. Não vale dizer que uma fibra pode ser melhor que outra, mas sim, que cada uma pode se destacar em aspectos específicos.

Para Figueiredo (2011), fatores como o teor de fibras, comprimento das fibras e disposição das mesmas por entre a matriz irão determinar a influência das fibras no compósito:

O teor de fibras é um dos principais parâmetros que irá determinar a capacidade das fibras de reforçar a matriz cimentícia. De forma simplificada, quanto maior o teor, maior será o número de fibras atuando para transferir as tensões e isso faz com que haja aumento da capacidade de reforço pós-fissuração (BENTUR; MINDESS, 2007). Quando utilizadas em fração volumétrica menor do que 1%, ajudam na redução das fissuras por retração e agregam melhor distribuição das cargas na matriz. Entre 1% e 2% também irão auxiliar no acréscimo de tenacidade a flexão, do aumento do módulo de ruptura e resistência ao impacto, reduzindo cargas mesmo após o surgimento das primeiras fissuras. Já quando encontradas acima de 2%, se tornam reforço principal para concretos de alta resistência devido ao grande aumento da capacidade de carga após a primeira fissura (BENTUR; MINDESS, 1990).

Ainda para Bentur e Mindess (1990), no caso das fibras de aço, quando são dispostas aleatoriamente na matriz, proporcionam melhores condições anticorrosivas e distribuição de cargas mais eficiente do que dispostas em formato direcionado. Johnston (1994) já destacava que fibras paralelas a fissura não tem efeito influente para transmitir cargas, enquanto fibras dispostas perpendiculares podem alcançar efeitos máximos.

Quando utilizadas em comprimento menor que o comprimento crítico “ $L_c$ ”,

definido por Figueiredo (2011) como o comprimento onde a fibra atinge uma determinada tensão em seu centro que é igual a sua própria tensão de ruptura, ao surgir as primeiras fissuras no compósito, a carga de arrancamento devido ao comprimento não seria capaz de causar ruptura na fibra, sendo arrancadas pelo lado que possuir menor comprimento. Por outro lado, ao possuírem comprimento igual ao crítico, maior será a capacidade resistente após as primeiras fissuras e a ruptura do compósito será dada pela ruptura da fibra. Deve se atentar ao tamanho máximo pois fibras muito compridas podem atrapalhar na consistência da matriz cimentícia e não agregar resistência consideravelmente (BENTUR; MINDESS, 2007).

## 2.2 FIBRAS

Segundo Figueiredo (2011, p.8) “as fibras são elementos descontínuos, cujo comprimento é bem maior que as dimensões da seção transversal”. Atualmente, existem diversos tipos de fibras em diferentes formatos e, no ramo da engenharia, algumas podem ser aplicadas para situações específicas.

No geral, para reforço em compósitos cimentícios, pode-se utilizar tanto fibras sintéticas quanto fibras de origem natural. O grupo das fibras sintéticas se caracteriza por obtenção através de tratamentos industriais e por isso conseguem estabelecer melhor as propriedades mecânicas da fibra. Em suma, são provenientes de polímeros, vidro, carbono, aço entre outras (CASTOLDI, 2018). Já as fibras naturais, podem ser de origem vegetal, animal ou mineral. As fibras vegetais, por sua vez, são obtidas através de produtos naturais, tais como a cana, coco, bambu, sisal, carauá entre outros, podendo ser extraídas das folhas, do caule, talo ou dos frutos (MOHANTY et al, 2000). A seguir, no Quadro 1, são listadas propriedades típicas de fibras comumente utilizadas como reforço, retiradas de Castoldi (2018).

Quadro 1 – Propriedades típicas de fibras utilizadas como reforço.

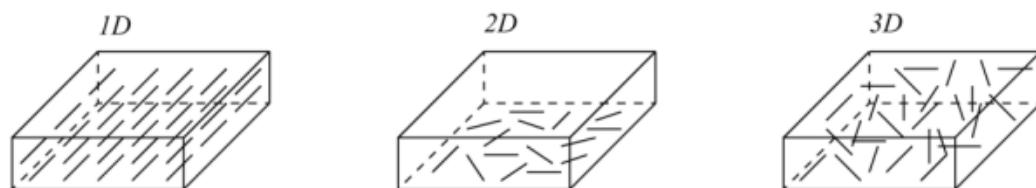
Fibra	Diâmetro (μm)	Peso específico	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5,0 - 500,0	7,84	200	0,5 - 2,0	0,5 - 3,5
Vidro	9,0 - 15,0	2,6	70,0 - 80,0	2,0 - 4,0	2,0 - 3,5
Amianto	0,02 - 400,0	3,4	196	3,5	2,0 - 3,0
Polipropileno	20,0 - 400,0	0,9 - 0,95	3,5 - 10,0	0,45 - 0,76	15,0 - 25,0
Carbono	8,0 - 9,0	1,6 - 1,7	230 - 380	2,5 - 4,0	0,5 - 1,5
Celulose	-	1,2	10	0,3 - 0,5	-
Fibra de Madeira	-	1,5	71	0,9	-
Sisal	10,0 - 50,0	1,5	-	0,8	3

Fonte: Bentur e Mindess (2007) adaptado por Castoldi (2018)

Figueiredo (2011) caracteriza, de modo geral, as macrofibras e as microfibras. As macrofibras são destinadas para reforço estrutural em concretos, sendo as fibras de aço e de polímeros as mais utilizadas. Já as microfibras, por sua vez, são caracterizadas por não possuírem objetivo de reforço estrutural, neste caso, visando a diminuição da retração, utilizam com frequência fibras poliméricas e naturais. No presente trabalho, as microfibras também ganham essa definição por conta da sua escala dimensional.

Quando utilizadas como reforço em compósitos cimentícios, Castoldi (2018) menciona que as fibras podem ser utilizadas na forma de monofilamentos ou na forma de tecidos. Ainda afirma que existem dois tipos de arranjos de reforço: reforço contínuo, onde as fibras são dispostas numa direção específica, ou fibras discretas, que ficam distribuídas de forma arbitrária por entre a matriz cimentícia. Ou seja, as fibras podem se arranjar em uma, duas ou três dimensões, como ilustrado na Figura 2 a seguir.

Figura 2 – Classificação da dispersão das fibras em uma, duas ou três dimensões



Fonte: Pereira (2017) adaptada por Castoldi (2018)

## 2.2.1 Fibras sintéticas

As fibras sintéticas usadas para reforço em materiais cimentícios são materiais obtidos a partir da extrusão de matérias primas poliméricas nobres que formam fibras estruturais. Seu objetivo é que, quando inseridas ao material compósito, irão agregar maior resistência à tração e maior tenacidade, além de reduzir a retração plástica do material (BENTUR; MINDESS, 1990).

Desde o ano 1965 tem se utilizado este tipo de fibra para reforço, porém, só a partir de 1980 que passou a ter amplo desenvolvimento científico e estudos em larga escala a seu respeito (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2002). Nos tempos atuais, este tipo de fibra é aplicado em lajes, pavimentos de concreto, concretos projetados, peças pré-moldadas e outros elementos que necessitam de controle de trincas e fissuras, ambos provenientes de efeitos de retração e fatores agressivos ao compósito (TECMACHINE, 2011).

De acordo com Castoldi (2018), fibras sintéticas como as de Acrílico, Carbono, Nylon, Poliéster e Polipropileno apresentam grande diferença nos valores de algumas propriedades típicas, quando comparadas umas com as outras. Diferentemente das fibras naturais, as fibras sintéticas são fabricadas industrialmente e como consequência disso, têm-se mais confiabilidade nos parâmetros das propriedades típicas das fibras, como módulo de elasticidade, resistência a tração e deformação na ruptura. Por mais que seja um ponto positivo para estas fibras serem fabricadas industrialmente e terem suas propriedades bem definidas, não há normalização brasileira nos procedimentos de determinação destes parâmetros mecânicos. Apesar disso, há a norma EN 14889-2 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006) que apresenta algumas condições para uso estrutural e não estrutural para as fibras poliméricas em concretos, além de indicar os procedimentos de caracterização mecânica previstos na EN 10002-1 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2001). A seguir, no Quadro 2, são listadas algumas propriedades típicas das fibras sintéticas, retiradas de Bentur e Mindess (2017).

Quadro 2 - Propriedades típicas das fibras sintéticas

Fibra	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Peso específico	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Acrílico	20,0 - 350,0	1,16 - 1,18	14,0 - 19,0	0,2 - 1,0	10,0 - 50,0
Aramida (kevlar)	10,0 - 12,0	1,44	63,0 - 120,0	2,3 - 3,5	2,0 - 4,5
Carbono (PAN)	8,0 - 9,0	1,6 - 1,7	230,0 - 380,0	2,5 - 4,0	0,5 - 1,5
Carbono (Pitch)	9,0 - 18,0	1,6 - 1,21	30,0 - 480,0	0,5 - 3,1	0,5 - 2,4
Nylon	23,0 - 400,0	1,14	4,1 - 5,2	0,75 - 1,0	16,0 - 20,0
Poliéster	10,0 - 200,0	1,34 - 1,39	10,0 - 18,0	0,23 - 1,2	10,0 - 50,0
Polietileno	25,0 - 1000,0	0,92 - 0,96	5	0,08 - 0,6	3,0 - 100,0
Poliolefina	150,0 - 635,0	0,91	2,7	2,75	15
Polipropileno	20,0 - 400,0	0,9 - 0,95	3,5 - 10,0	0,45 - 0,76	15,0 - 25,0
PVA	14,0 - 650,0	1,3	29,0 - 36,0	0,8 - 1,5	5,7

Fonte: Bentur e Mindess (2007) adaptado por Castoldi (2018)

Conforme os autores Auersvaldt et al. (2019), o consumo de fibras sintéticas apresenta desafios significativos em termos de impacto ambiental. O grande volume de matéria-prima mineral e química necessário para sua produção, bem como os resíduos gerados e sua disposição, resultam em efeitos negativos consideráveis no meio ambiente. Esses fatores contribuem para reduzir sua atratividade do ponto de vista ecológico.

Como mencionado por Castoldi (2018), dentre todas as fibras sintéticas citadas acima, as mais utilizadas atualmente como reforço para compósitos cimentícios são as fibras de aço e as de polipropileno. Ambas podem ser incorporadas ao concreto mesmo quando se usa barras de aço como elemento de reforço primário. Neste caso, as fibras atuariam como um reforço secundário melhorando a capacidade de absorção de energia do concreto e controlando a propagação de fissuras. Entretanto, também podem ser utilizadas em elementos estruturais como reforço primário, porém estão sujeitas a corrosão, como é o caso da fibra de aço (FIGUEIREDO, 2000). Devido a isso, abriu-se espaço ao uso das macrofibras poliméricas pela sua boa capacidade de resistência química e boa durabilidade (FIGUEIREDO, 2011). As fibras poliméricas são comumente utilizadas em pisos industriais, lajes pré-moldadas, pavimentos rodoviários e túneis (FIGUEIREDO, 2000; BENTUR; MINDESS, 2007; FIGUEIREDO, 2011), possuem baixo custo, facilidade de dispersão e boa ancoragem e por isso se apresentam no mercado com destaque. Ao contrário da grande maioria das fibras naturais, esta fibra resiste de forma adequada em meio alcalino (LÓPEZ-BUENDÍA et al., 2013). Por outro lado, apresentam pouca aderência química com matrizes

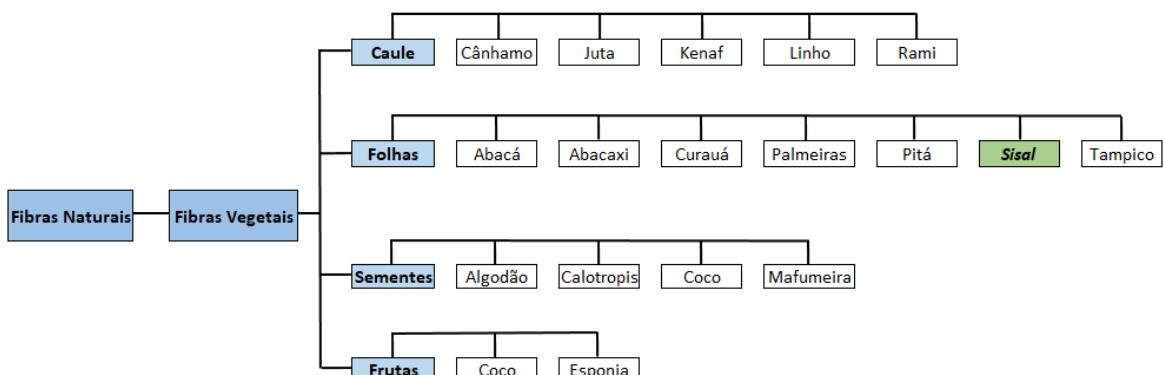
cimentícias, sensibilidade com sol e oxigênio, além de baixa resistência ao fogo.

Ainda no âmbito das fibras manufaturadas, outras fibras se destacam em situações específicas, como é o caso da fibra de vidro, largamente utilizada em painéis pré-fabricados não estruturais (BENTUR; MINDESS, 1990).

## 2.2.2 Fibras naturais

As fibras naturais, dependendo de sua origem, podem ser classificadas em vegetais, animais ou minerais (MOHANTY et al., 2000). As fibras vegetais, por sua vez, podem ser classificadas como provenientes da madeira (podendo ser rígidas ou flexíveis) ou não provenientes da madeira. As mais utilizadas como reforço em compósitos cimentícios são as não provenientes da madeira, e as principais fontes destas fibras são folhas, caules, frutas e sementes (PANDEY et al., 2015). A seguir, na Figura 3 é possível visualizar a classificação das fibras vegetais.

Figura 3 – Classificação das fibras vegetais



Fonte: Adaptado de Kicinski - Jakubowska et al (2012).

De acordo com Ashby et al. (2018), as fibras vegetais podem ser definidas como materiais obtidos de fontes renováveis que podem ser facilmente recicláveis ou biodegradáveis. São consideradas por si só compósitos naturais por conterem microfibrilas de celulose em uma matriz de lignina e hemicelulose em sua formação, sendo a celulose a parte que atribui melhor resistência mecânica. (JOHN; THOMAS, 2008).

As vantagens de se utilizar fibras vegetais são devido às suas propriedades mecânicas comparáveis à fibras sintéticas, disponibilidade em vários países,

facilidade e baixo custo de fabricação, não-tóxicas, alta resistência e boa rigidez estrutural (SILVA, 2003). Já no âmbito das crescentes questões ambientais, são biodegradáveis, com possibilidade de reciclagem, e influenciam de maneira positiva nos aspectos ecológicos em geral quando comparadas às fibras sintéticas (YAN et al., 2016). Todas essas características tornam as fibras vegetais como boa escolha em reforço para compósitos cimentícios, não só pelo ponto de vista comercial, mas também como um atrativo ao ponto de vista ambiental. Apesar dos pontos positivos, as fibras naturais possuem desvantagens que são associadas a alta absorção de água, alta variação de propriedades, baixa resistência a micro-organismos, baixa estabilidade térmica e baixa resistência em ambiente alcalino (SILVA, 2003). A seguir, o Quadro 3 apresenta as principais propriedades mecânicas além da absorção de água de alguns tipos de fibras naturais.

Quadro 3 - Propriedades típicas de algumas fibras naturais.

Fibra	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)	Absorção de água (%)
Sisal	13,0 - 26,0	280,0 - 750,0	3,0 - 5,0	60,0 - 70,0
Juta	26,0 - 32,0	250,0 - 350,0	1,5 - 1,9	-
Coco	19,0 - 26,0	120,0 - 200,0	10,0 - 25,0	130,0 - 180,0
Cana-de-açúcar	15,0 - 29,0	170,0 - 290,0	-	70,0 - 75,0
Bagaço	1,7	20	-	78,5

Fonte: Bentur e Mindess (2007).

### 2.2.3 Fibra de Sisal

No presente trabalho, a fibra em estudo é a fibra da folha de sisal, proveniente da planta *agave sisalana*. É nativa da península de Yucatan, no México, mas ao redor do mundo é conhecida como sisal. No Brasil, as primeiras mudas foram introduzidas em 1903, no estado da Bahia, e passou a ser difundida na região Nordeste devido às boas condições climáticas para a planta. Atualmente, o Brasil é o maior exportador de sisal do mundo e concentra mais de 50% da produção mundial em seu território. Os principais produtores se concentram nos estados da Bahia e Paraíba (CONAB, 2010). Necessita-se pouca exigência para o cultivo do sisal, portanto é feito de maneira muito simples nas regiões de clima tropical e subtropical sem necessidade de mão de obra especializada, o que torna o custo de produção barato (LADCHUMANANANDASIVAM, 2005). Na Figura 4 a seguir é possível visualizar a

planta *Agave Sisalana*.

Figura 4 – *Agave Sisalana*



Fonte: Holanda (2013).

A fibra de sisal é um produto com vasta versatilidade comercial. É aplicado na indústria de papeis, na indústria têxtil, automobilística, no artesanato e especialmente na construção civil onde é usada como reforço em compósitos cimentícios (PEREIRA et al., 2016).

Após ser plantado, o sisal estará pronto para ser colhido dentre 5 a 6 anos e cada planta pode durar até 25 anos dependendo da qualidade do solo. Para a colheita, utiliza-se foice ou faca para fazer os cortes manualmente, rente ao tronco, sempre deixando de 12 a 18 folhas por planta, que pode ser cortada várias vezes ao ano (LADCHUMANANANDASIVAM, 2005). A Figura 5 representa a colheita do sisal, onde as folhas foram cortadas e irão passar pelo procedimento de desfibramento.

Figura 5 – Corte e colheita das folhas de sisal



Fonte: CONAB (2010).

Na época de serem colhidas, cada folha chega a pesar 1kg e possuir entre 100 a 150 centímetros de comprimento. As fibras se localizam no cerne da folha, que contém aproximadamente entre 3% a 5% de fibras (HOLANDA, 2013).

Ainda conforme Holanda (2013) menciona, após serem cortadas, é iniciado o processo de desfibramento que consiste na separação da polpa das fibras, raspando as folhas de forma mecânica, com auxílio de jatos d'água. O resultado deste procedimento é o surgimento de feixes de fibras entre 40 a 200 centímetros. O processo de desfibramento deve ser iniciado o quanto antes para que não ocorra putrefação das folhas e evitar perda de resistência e brilho. Isso pode acontecer caso as fibras de sisal permaneçam armazenadas por um certo período de tempo. A Figura 6 a seguir representa as fibras que acabaram de passar pelo procedimento de desfibramento.

Figura 6 – Fibras de sisal após desfibramento



Fonte: CONAB (2010).

Após o processo de desfibramento, as fibras são lavadas em reservatórios de água permanecendo submersas por um período entre 8 as 12 horas (PEREIRA et al., 2016). A partir disso, as fibras de sisal são secas ao ar livre e posteriormente limpas com escovas. Esse procedimento é necessário para que possam ficar em conformidade para melhor aproveitamento em sua utilização final (HOLANDA, 2013). Há uma outra forma de limpeza das fibras numa máquina denominada “batedeira”, onde as fibras são submetidas a um processo de batimento em tambores rotativos com lâmina planas (SANTOS; BRANDÃO, 2021). A Figura 7 a seguir mostra que as fibras estão passando pelo processo de secagem ao ar livre e posteriormente irão ser limpas com escovas.

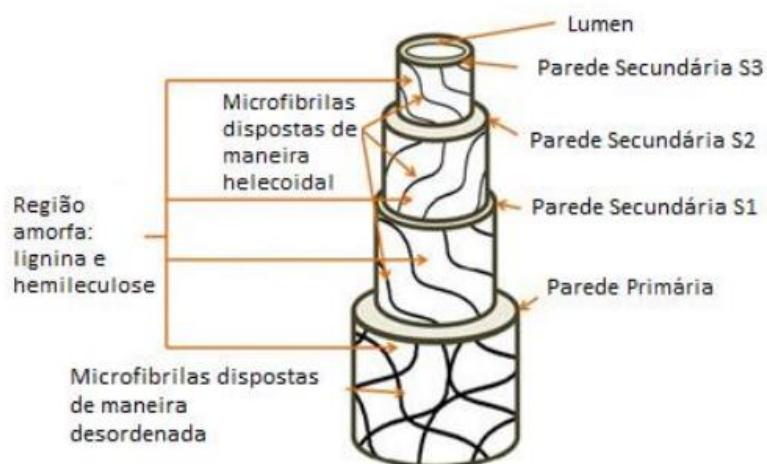
Figura 7 – Secagem das fibras de sisal ao ar livre



Fonte: CONAB (2010)

Como visto, a obtenção das fibras de sisal é proveniente de métodos rústicos sem que haja ambiente controlado e tecnologia empregada, como é no caso das fibras sintéticas, e por isso existe variabilidade nas propriedades mecânicas. Azwa et al. (2013) afirma que por mais que existem diversos tipos de fibras vegetais, a estrutura morfológica e composição química são bastante similares entre si. A Figura 8 representa a morfologia da fibra de sisal, que é formada por diversas células individuais, chamadas de fibrilas. As fibrilas podem ser divididas em três partes: parede primária, secundária e o lúmen, e elas são conectadas pela lamela média, que é formada por lignina e hemicelulose (ZIMMERMANN et al., 2004).

Figura 8 - Estrutura morfológica de uma fibra natural



Fonte: Adaptado de John e Thomas (2008).

A fibra de sisal é composta por aproximadamente 60-78% de celulose, 10-14,2% de hemicelulose, 8-14% de lignina, 10% de pectina e 2% de ceras (DITTENBER; GANGARAO, 2011). A celulose pode ser considerada um polímero natural e é um componente orgânico resistente com grande importância estrutural, proporcionando estabilidade e resistência a fibra (JAWAID; KHALIL, 2011). A lignina, assim como a celulose, é considerada um polímero natural, porém é um composto aromático de alta complexidade e amorfa. Auxilia no transporte de água da fibra e agrega resistência para a planta atuando como se fosse um adesivo químico dentro e por meio das fibras (KOMURAIH et al., 2014).

A hemicelulose, por sua vez, são polissacarídeos e fazem parte da formação da lamela média. Possui baixo peso molecular e são ligados por cadeias curtas e ramificadas. Sua estrutura é aberta e amorfa, e auxilia na incorporação da celulose (YAN et al., 2016). A pectina representa o coletivo dos heteropolissacarídeos e tem como função gerar flexibilidade a planta. E por fim, as ceras oferecem proteção a planta pois são constituídas de álcoois e óleos que se agrupam na superfície da fibra (JOHN; THOMAS, 2008; WONG et al., 2010).

No geral, a celulose, hemicelulose e lignina são as principais responsáveis por promoverem comportamentos de aderência e degradação das fibras e, por isso, a composição química de cada fibra vegetal influencia diretamente nas suas propriedades mecânicas (AZWA et al., 2013). Essa composição varia para cada tipo de fibra vegetal como mostrado no Quadro 4, onde são listados alguns destes valores para algumas fibras naturais.

Quadro 4 – Composição química de algumas fibras naturais

Fibra	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Pectina	Ceras
Sisal	60,0-78,0	10,0-14,2	8,0-14,0	10	2
Piaçava	28,6	25,8	45	-	-
Bambu	26,0-65,0	30	5,0-31	-	-
Cânhamo	68,0-74,0	15,0-22,0	3,7-10	0,9	0,8
Coco	32,0-44,0	0,15-20,0	40,0-45,0	3,0-4,0	-
Juta	59,0-71,5	13,6-20,4	11,8-13	0,2-0,4	0,5
Linho	62,0-72,0	18,6-20,6	2,0-5,0	2,0-3,0	1,5-1,7

Fonte: Adaptado de Dittenber e Gangarao (2011)

Apesar de haver avanço em pesquisas com relação ao uso das fibras naturais como reforço em compósitos cimentícios e interesse do mercado acerca de seus benefícios ecológicos, é notável que cada vez mais trabalhos estão abordando o sisal como protagonista.

Castoldi (2018) em seu artigo avaliou o desempenho mecânico e durabilidade de concretos reforçados com macrofibras discretas de sisal e polipropileno com 51 milímetros de comprimento. Utilizou duas matrizes cimentícias com diferentes teores de material pozolânico e as fibras foram incorporadas em diferentes dosagens. As fibras foram caracterizadas: a resistência a tração média para a fibra de polipropileno foi de  $260,72 \pm 13,15$  MPa e  $383,88 \pm 49,88$  MPa para a fibra de sisal. Já a caracterização mecânica dos compósitos foi realizada por meio de ensaios de flexão em corpos de prova prismáticos. Concretos sem reforço apresentaram comportamento frágil, enquanto que para todas as dosagens de fibra, a presença de reforço proporcionou comportamento dúctil. Após a fissuração da matriz, a presença de fibras garantiu ao concreto comportamento denominado *deflection softening*. Da mesma forma, o aumento na quantidade de fibras resultou no aumento da tenacidade do concreto. Chegou-se à conclusão de que as fibras de sisal e de polipropileno podem ser utilizadas como reforço com fins estruturais, desde que sejam utilizadas em dosagens acima de 0,34%. A utilização do reforço de sisal na matriz com maior alcalinidade apresentou certo nível de degradação, enquanto quando incorporada na matriz livre de hidróxido de cálcio, não resultou em perdas mecânicas (CASTOLDI, 2019).

Colonetti e Godinho (2017) realizaram um estudo sobre o efeito da adição da fibra de sisal nas propriedades do concreto. Oitenta corpos de prova cilíndricos foram concretados com objetivo de efetuar a comparação entre amostras de um concreto sem adição de fibras e amostras com teores de 0,3 %, 0,6 % e 0,9 % de fibras de sisal em relação ao volume de concreto. Foram executados os ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral para cada amostra nos períodos de 28 e 150 dias. De acordo com o estudo, como efeito do incremento de fibras de sisal nos corpos de prova, foi possível observar alta capacidade de absorção de água pelas fibras durante o processo de cura do concreto. Também se notou baixa compacidade e aumento da porosidade causado pelas fibras, o que levou a perda de trabalhabilidade do material e redução na resistência a compressão axial do concreto. O módulo de elasticidade também sofreu

redução por estar diretamente ligado a resistência à compressão axial do concreto. Houve também pequena redução da resistência à tração por compressão diametral nos traços de 0,6% e 0,9% quando comparados com traço referência e 0,3% de fibra (COLONETTI; GODINHO, 2017).

Okeola et al. (2018) analisaram o incremento de fibras de sisal em matrizes cimentícias. Foram moldados cerca de 45 cubos de concreto para testes à compressão, absorção de água e densidade seca, e mais 45 cubos para serem testados à tração e medição do módulo de Young. As fibras foram adicionadas à mistura nas porcentagens de 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% em massa de cimento. Foi observada uma melhoria adicional na resistência à tração por divisão com a incorporação de fibras de 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% aos 28 dias de cura, com um aumento percentual de 29,68%, 47,17%, 16,57% e 6,63%, respectivamente, mostrando que as fibras de sisal podem melhorar a resistência à tração por divisão do concreto. Além disso, o estudo mostrou que o acréscimo de fibras em diferentes proporções resultou em um aumento do módulo de young do concreto, porém não foi capaz de melhorar sua trabalhabilidade, absorção de água e resistência à compressão (OKEOLA et al., 2018).

Beskopylny et al. (2022) estudaram o efeito da adição de fibras na estrutura e propriedades de concretos. Os corpos de prova consistiam de cubos e prismas de concreto, de resistência a compressão de 48 MPa, e teor de fibra de sisal de 0,25%, 0,5%, 0,75%, 1,0%, 1,25% e 1,5%, ensaiados aos 15 dias. Foram analisadas a resistência à compressão e resistência à tração das amostras. A partir do estudo, foi possível observar que as amostras com dosagem de fibras de sisal de 1% tiveram os ganhos máximos registrados, onde comparado ao concreto convencional, a resistência à tração na flexão aumentou 33% e a resistência à tração axial aumentou 29%. Já em relação a resistência a compressão, as amostras com reforço de fibras foram 22% maiores. Outros aumentos detectados no artigo foram de 25% nas características de deformações sob compressão axial, 42% para deformações sob tração axial e 15% para o módulo de elasticidade, usando como base a amostra com dosagem de fibras de sisal de 1% (BESKOPYLNY et al., 2022).

#### **2.2.4 Celulose microcristalina**

Atualmente, é notável o aumento dos estudos acerca do incremento da microcelulose como reforço em compósitos cimentícios para melhorar as

propriedades mecânicas e físicas do concreto (FERREIRA, 2016). É importante ressaltar que a celulose é um polímero abundante, renovável, biodegradável e possui boa disponibilidade comercial, o que a torna ainda mais interessante, visto que no mundo existe cada vez mais demanda em produtos obtidos a partir de recursos sustentáveis (DUFRESNE, 2013).

A microcelulose é apresentada em forma de pó (DUFRESNE, 2013; XU et al., 2013) e refere-se a cristais de celulose que foram obtidos a partir da hidrólise ácida seguida de homogeneização. Por meio deste e de outros procedimentos, como a desfibrilação, são removidas a lignina e a hemicelulose, que são partes que não possuem boa resistência mecânica e preservando apenas a celulose, que possui maior resistência mecânica. A partir disso, é removida a parte amorfã da celulose, ficando apenas com a parcela cristalina, e assim surge a microcelulose (FU et al., 2020).

Parveen et al. (2020) avaliaram o incremento da combinação de fibras de sisal e celulose microcristalina (MCC) para desenvolver compósitos cimentícios e analisar o impacto destes materiais sobre suas propriedades mecânicas. Teores que variaram entre 0,1% a 3% de MCC em relação a massa de cimento foram dispersos em água com ajuda de um surfactante Pluronic F-127, e posteriormente, as suspensões de MCC foram adicionadas a misturas de cimento e areia contendo teores de fibras de sisal que variaram entre 0,25% a 2% em massa de cimento. Foram produzidos corpos de prova reforçados apenas com fibra de sisal, outros com apenas MCC e corpos de prova reforçados em multiescala com fibra de sisal e MCC. O estudo concluiu que o uso de até 2% de fibra de sisal sem MCC aumentou a tenacidade do compósito em 351% após 28 dias de hidratação, mas reduziu a resistência à compressão em 38% e à tração na flexão em 13%. Corpos de prova apenas com MCC tiveram aumento de 20,5% de resistência à compressão usando 0,1% de MCC, e 29% de aumento da tenacidade com o mesmo teor. Ademais, corpos de prova reforçados tanto com fibra de sisal (0,25% - 0,5%) quanto com MCC (0,1%) obtiveram melhorias de 18,4% na resistência à compressão, 30,1% na resistência à tração na flexão e 100% na tenacidade do compósito (PARVEEN et al., 2020).

Parveen et al. (2018) avaliaram o incremento apenas da celulose microcristalina em compósitos cimentícios. Corpos de prova foram desenvolvidos a partir da adição de suspensões aquosas de MCC na mistura de cimento e areia. Compósitos com teores de MCC de 0,4%, 0,8%, 1,2%, 1,6% e 2% em relação a massa

de cimento foram produzidos por meio da agitação magnética de MCC, por 45 minutos. Os compósitos foram caracterizados quanto a sua densidade aparente, desempenho mecânico, porosidade da microestrutura e absorção de água. O estudo concluiu que o escoamento da pasta da argamassa diminuiu significamente conforme aumentava-se o teor de MCC. O desempenho mecânico foi melhor nos compósitos com menor teor de MCC, havendo melhoria máxima de 20,5% na resistência à tração na flexão, 19,8% na resistência à compressão e 27% na tenacidade, após 28 dias de hidratação. Ademais, em comparação com a matriz de referência, a adição de MCC contribuiu com a redução do tamanho dos poros da matriz cimentícia (PARVEEN et al., 2018).

Ferreira (2016) em seu artigo, avaliou a viabilidade da adição de diferentes quantidades de celulose microcristalina em compósitos cimentícios, com o objetivo de estudar a interação do MCC com os outros materiais que constituem a argamassa e analisar o desempenho final das matrizes cimentícias quanto as propriedades mecânicas. Inicialmente foram produzidos corpos de prova da matriz cimentícia e compósitos com 1%, 2%, 3%, 4% e 5% de MCC em relação a massa de cimento, com diferentes tempos de cura. Porém, foi rapidamente perceptível que estes teores iriam afetar consideravelmente a trabalhabilidade dos compósitos devido às propriedades hidrofílicas da celulose, levando a complicações na moldagem. Portanto, uma alteração na metodologia foi adotada quanto ao aumento da razão de água, utilização de superplastificante e novas variedades de teores de MCC. Foram produzidos corpos de prova com teores de MCC de 0,5%, 1%, 1,5%, 2% e 2,5% em relação a massa de cimento, hidratados por 28 dias. Na produção dos compósitos, o MCC foi disperso em água através de banho de ultrassom. O estudo pôde afirmar que o compósito com 0,5% de MCC apresentou maior resistência à flexão quando comparado com a referência, sendo esta 19,21% maior. O compósito com 2% de MCC, apresentou redução significativa da resistência à flexão, chegando a 13,71%. Porém, quando ensaiados a compressão, todos os compósitos obtiveram acréscimo de resistência, sendo o teor de 2,5% o menos impactado, com 20,22% e o teor de 0,5% mais beneficiado, com 33,73% de acréscimo. O objetivo final da pesquisa foi concluído partindo do pressuposto que a adição de MCC proporciona aumento na resistência mecânica, sendo mais significativo na resistência à compressão, especialmente em menores teores de MCC (FERREIRA, 2016).

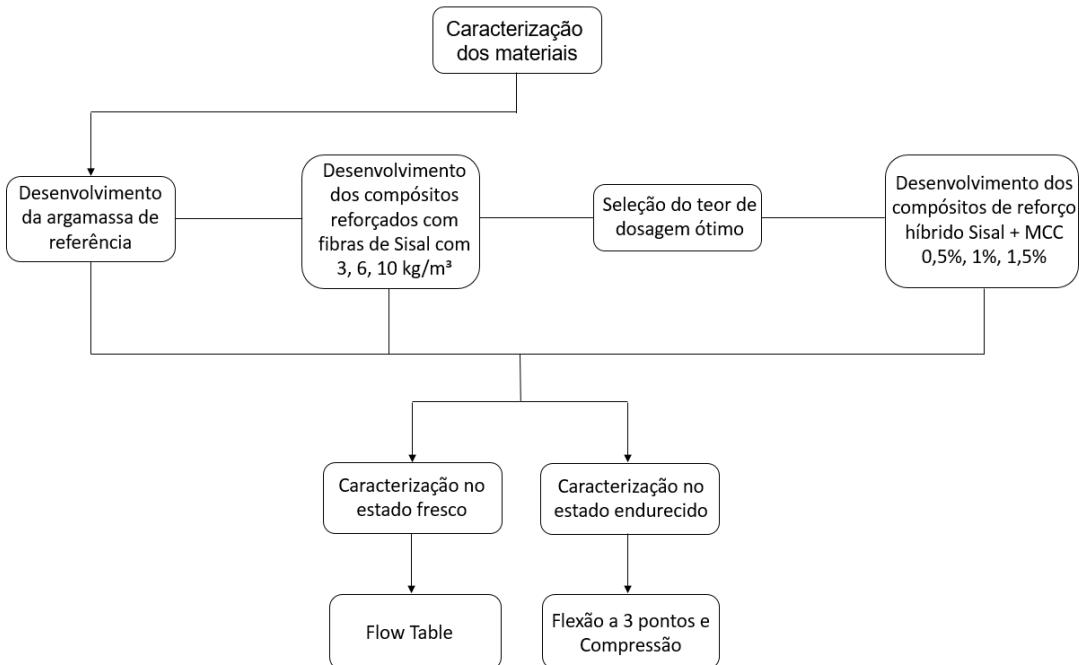
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

É muito importante estabelecer condições adequadas para o processo de produção da matriz cimentícia, visto que a adição de fibras pode prejudicar sua trabalhabilidade e consistência. Portanto, a matriz precisa de fluidez e aderência adequada para que a transferência de carga entre ela e as fibras seja eficiente, independente do teor de fibras utilizado (PEREIRA, 2017; MAZAHERIPOUR et al., 2011; BOULEKBACHE et al., 2016; ONUAGULUCHI; BANTHIA, 2016; SOUZA, 2017).

A durabilidade é outro fator que deve ser levado em consideração, pois compósitos cimentícios quando reforçados com fibras naturais podem sofrer perda de tenacidade e resistência pós fissuração, devido ao envelhecimento natural das fibras, principalmente se estiverem em ambiente alcalino. Para garantir melhor condição quanto a durabilidade, parte do cimento foi substituída por metacaulim, que é um material pozolânico que agrupa a matriz baixo teor de hidróxido de cálcio (DIAZ, 2016). A presença do hidróxido de cálcio é a principal causa da degradação das fibras naturais em matrizes cimentícias (FILHO et al., 2007). Essa adição contribui ainda reduzindo a porosidade da matriz devido as reações pozolânicas, proporcionando maior descontinuidade dos poros e, como resultado disso, se torna reduzida a permeabilidade e velocidade de penetração dos agentes agressivos, tonando as estruturas de concreto mais duráveis e resistentes (THE EUROPEAN PROJECT GROUP, 2005).

A metodologia foi baseada em variáveis quantitativas, onde buscou-se variar os teores de materiais de reforço com o objetivo de avaliar qual o impacto destas variações quanto ao índice de consistência, resistência à tração e à compressão dos compósitos cimentícios quando comparados com a matriz de referência. Na Figura 9 a seguir, é mostrado um fluxograma que foi produzido com o intuito de auxiliar no entendimento do fluxo de ações utilizadas para a realização da confecção dos corpos de prova e seus respectivos ensaios. O fluxograma mostra a caracterização dos materiais, a confecção dos corpos de prova da matriz de referência e dos compósitos cimentícios, os respectivos ensaios de caracterização quanto ao estado fresco e endurecido, e a definição do teor de dosagem ótima.

Figura 9 – Fluxograma demonstrando a sequência dos métodos utilizados



Fonte: Autores (2023)

### 3.1 MATERIAIS

Todos os materiais utilizados para a produção da matriz e dos compósitos que serão apresentados neste trabalho foram fornecidos pelo Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção – LEMAC, que se encontra no Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo.

Os materiais finos utilizados para a formulação da pesquisa foram cimento e metacaulim. O cimento utilizado foi o Cimento Portland CPIII-RS fabricado pela empresa Mizu, e apresenta resistência a compressão mínima de 40 MPa aos 28 dias. De acordo com a norma brasileira NBR 16697 (ABNT, 2018), é um cimento resistente a sulfatos e tem em sua composição clínquer e sulfatos de cálcio que correspondem entre 25 e 65% de sua composição, escória granulada de alto-forno entre 35 e 75% e material carbonático entre 0 e 10%. Para o cimento utilizado foi realizado ensaio de massa específica para caracterização do mesmo, de acordo com a norma NBR 16605 (ABNT, 2017). A Figura 10 a seguir, apresenta o cimento utilizado nesta pesquisa, fornecido pelo LEMAC.

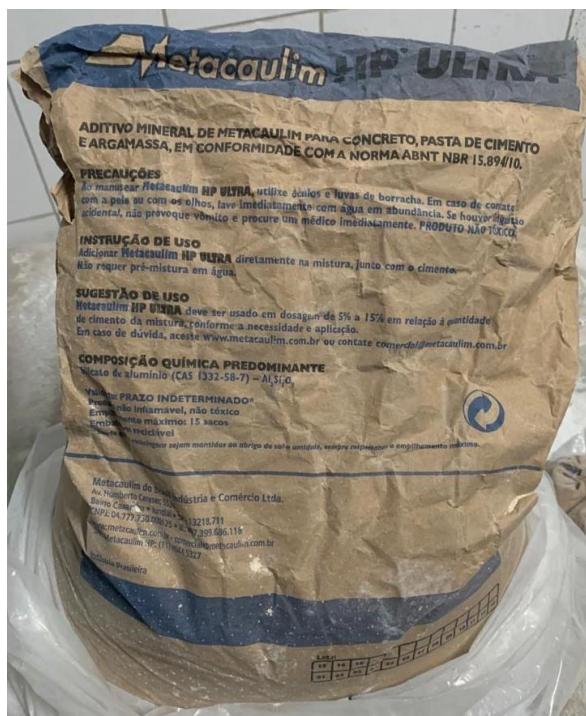
Figura 10 – Cimento Portland CPIII-RS 40MPa da marca Mizu



Fonte: Autores (2023)

O metacaulim utilizado foi o Metacaulim HP ULTRA e para sua caracterização também foi realizado ensaio de massa específica, seguindo as mesmas orientações da norma NBR 16605 (ABNT, 2017). A Figura 11 a seguir, apresenta o metacaulim utilizado nesta pesquisa, fornecido pelo LEMAC.

Figura 11 – Metacaulim HP ULTRA



Fonte: Autores (2023)

A areia utilizada como agregado miúdo é uma areia de cava quartzosa e foi fornecida da cidade de Linhares (Espírito Santo) para o LEMAC. Foi realizado procedimento de peneiramento com granulometria passante na peneira de 1,18 mm e retida na de abertura 0,15 mm conforme proposto por Souza (SOUZA, 2017). Para sua caracterização foi realizado ensaio de massa específica de acordo com a norma NBR NM 52 (ABNT, 2009) e ensaio de granulometria através da norma NBR NM 248 (ABNT, 2001). A Figura 12 mostra a baia que contém a areia utilizada nesta pesquisa, fornecida pelo LEMAC.

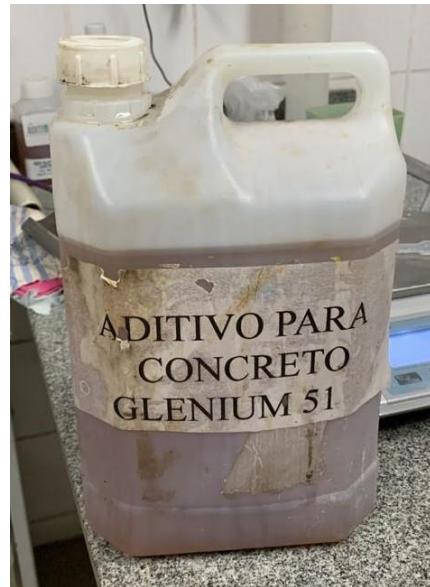
Figura 12 – Baia contendo areia, localizada no LEMAC



Fonte: Autores (2023)

Para proporcionar melhores condições de trabalhabilidade e facilitar a moldagem, como aditivo químico foi utilizado o super plastificante Glenium 51, fabricado pela Basf e é a base de éter policarboxílico. Como especificado em seu catálogo, o Glenium 51 é um aditivo líquido pronto para o uso, livre de cloretos e foi desenvolvido para atuar como dispersante do material cimentício e propiciar super plastificação e alta redução de água, assim tornando o concreto mais trabalhável sem alterar o tempo de pega (BASF, 2023). A Figura 13 a seguir apresenta o aditivo químico Glenium 51, utilizado nesta pesquisa.

Figura 13 - Aditivo químico Glenium 51



Fonte: Autores (2023)

As fibras de Sisal foram fornecidas da cidade de Valente (Bahia) e foram recebidas em maços de fibras longas. Portanto, antes de sua utilização como reforço natural em compósitos cimentícios, foi necessário realizar beneficiamento das fibras que será detalhado no item 3.3. Para a caracterização das fibras de Sisal, foi realizado ensaio de massa específica aparente com auxílio de proveta volumétrica de vidro graduada. A Figura 14 a seguir apresenta as fibras de sisal fornecidas para a realização desta pesquisa.

Figura 14 – Fibras de sisal fornecidas



Fonte: Autores (2023)

A celulose microcristalina (Avicel PH-101) utilizada foi comprada do laboratório Sigma-Aldrich. A microcelulose foi fornecida em forma de pó e utilizada como reforço dos compósitos cimentícios com o intuito de promover maior resistência a compressão e a tração na flexão. Neste estudo, a microcelulose foi utilizada em três proporções diferentes, conforme detalhado na seção 3.2.1. A Figura 15 apresenta a microcelulose utilizada nesse trabalho.

Figura 15 – Microcelulose



Fonte: Autores (2023)

## 3.2 COMPÓSITO

### 3.2.1 Dosagem

Foi adotado um traço de 1:1:0,4 (areia:materiais cimentícios:água), conforme utilizado anteriormente (SOUZA, 2017). Em termos de composição, os materiais cimentícios utilizados foram o cimento e o metacaulim, na qual 30% da massa total de cimento foi substituída por metacaulim.

Os ensaios de caracterização dos materiais serão apresentados posteriormente no item 3.3. No entanto, neste momento, utilizaremos os resultados de massa específica aparente para demonstrar os cálculos realizados a fim de obter as quantidades necessárias dos materiais.

#### 3.2.1.1 Matriz cimentícia

Primeiramente, em relação a matriz de referência, foram produzidos três corpos

de prova. O cálculo da dosagem iniciou-se encontrando o consumo de material cimentício com a equação 1 a seguir:

$$\text{Consumo de material cimentício} = \frac{1}{[(\frac{c}{dc}) + (\frac{mk}{dmk}) + (\frac{a}{dareia}) + a/c]} , \quad (1)$$

sendo:

c = proporção de cimento usada;

mk = proporção de metacaulim usada;

a = proporção de areia usada;

dc = massa específica do cimento calculada, em g/cm<sup>3</sup>;

dmk = massa específica do metacaulim calculada, em g/cm<sup>3</sup>;

dareia = massa específica da areia calculada, em g/cm<sup>3</sup>;

a/c = relação água/cimento.

Logo, têm-se:

$$\text{Consumo de material cimentício} = \frac{1}{[(\frac{0,7}{3}) + (\frac{0,3}{2,58}) + (\frac{1}{2,64}) + 0,4]} = 0,88 \text{ g/cm}^3 = 0,88 \text{ kg/dm}^3$$

Logo após, foi calculado o volume de um corpo de prova prismático de dimensões 4cm x 4cm x 16cm.

$$\text{Volume de um corpo de prova} = 4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 16\text{cm} = 256\text{cm}^3$$

Vale destacar que o volume do corpo de prova foi acrescido em 20% como uma correção para possíveis perdas no decorrer dos processos que envolveram a moldagem dos corpos de prova, demonstrados no item 3.2.

$$\text{Volume final de um corpo de prova} = 256\text{cm}^3 \times 1,20 = 307,2\text{cm}^3$$

Com base no volume encontrado do corpo de prova e sabendo que 307,2 cm<sup>3</sup> correspondem a 0,3072 dm<sup>3</sup>, foi calculada a quantidade de material cimentício

necessária, assim como a quantidade dos outros materiais, como segue:

- Para o volume de 1dm<sup>3</sup> são necessários 0,88kg de material cimentício, então para um volume de 0,3072dm<sup>3</sup> foram necessários 0,2703kg de material cimentício;
- Para três corpos de prova da matriz de referência foram necessários 0,82kg de material cimentício;
- Como 30% da quantidade total de material cimentício corresponde ao metacaulim, é necessário 0,574kg de cimento e 0,246kg de metacaulim;
- A massa de areia foi de 0,82kg;
- A massa de água foi de 0,328kg;
- Para proporcionar maior fluidez à matriz, a quantidade de super plastificante utilizada foi de 0,15% em massa em relação aos materiais cimentícios, ou seja, 1,2g de super plastificante.

### 3.2.1.2 Compósito reforçado com fibra de sisal

Neste estudo, foram produzidos corpos de prova com três diferentes teores de fibra de sisal, sendo estes de 0,34%, 0,67% e 1,12%. Para cada teor foram produzidos três corpos de prova.

As quantidades de materiais necessárias para a produção desse compósito são as mesmas da matriz cimentícia, porém, adicionando-se fibra de sisal. A seguir, será apresentado os cálculos realizados para determinar a quantidade necessária de fibra de sisal para cada teor estudado.

Como apresentado anteriormente, a quantidade de material cimentício utilizado na matriz cimentícia foi de 0,82kg e cada teor de fibras de sisal foi calculada com base na porcentagem total de material cimentício:

- Para o teor de 0,34% de fibra de sisal, foram necessários 2,76g de fibra de sisal;
- Para o teor de 0,67% de fibra de sisal, foram necessários 5,53g de fibra de sisal;
- Para o teor de 1,12% de fibra de sisal, foram necessários 9,22g de fibra de sisal.

### 3.2.1.3 Compósito reforçado com fibra de sisal e microcelulose

Nesta etapa, foram confeccionados corpos de prova com diferentes teores de microcelulose, enquanto que um dos teores de fibra de sisal calculados anteriormente foi mantido constante para todos os corpos de prova. O teor fixado de fibra de sisal será referido como "teor de dosagem ótimo" e será explicado posteriormente no item 3.3. Além disso, foram utilizadas as mesmas quantidades de materiais da matriz de referência.

Os teores de microcelulose utilizados foram em relação a porcentagem total de material cimentício utilizado na matriz cimentícia, que foi de 0,82kg. Neste caso, foram utilizados os teores de 0,5%, 1% e 1,5% em relação à massa de material cimentício.

- Para o teor de 0,5% foram produzidos três corpos de prova e utilizados 4,1g de microcelulose.
- Para o teor de 1% foram produzidos três corpos de prova e utilizados 8,2g de microcelulose.
- Para o teor de 1,5% foram produzidos três corpos de prova e utilizados 12,3g de microcelulose.

Visando facilitar a compreensão das dosagens, foi elaborado o Quadro 5 que apresenta a dosagem de todos os corpos de prova, com as respectivas massas dos materiais.

Quadro 5 - Dosagem dos corpos de prova

Variação	Areia (g)	Cimento (g)	Metacaulim (g)	Água (g)	Sisal (g)	Microcelulose (g)	Superplasticificante (g)
Referência	820	574	246	328	0	0	1,2
Sisal 0,34%	820	574	246	328	2,76	0	1,2
Sisal 0,67%	820	574	246	328	5,53	0	1,2
Sisal 1,12%	820	574	246	328	9,22	0	1,2
Sisal 0,34% e MCC 0,5%	820	574	246	328	2,76	4,1	1,2
Sisal 0,34% e MCC 1%	820	574	246	328	2,76	8,2	1,2
Sisal 0,34% e MCC 1,5%	820	574	246	328	2,76	12,3	1,2

Fonte: Autores (2023)

### 3.2.2 Moldagem da matriz de referência

O procedimento de moldagem foi realizado na argamassadeira planetária com capacidade de cinco litros (Figura 16) e de forma sequêncial, conforme descrito a seguir. Essa sequência foi norteada pela NBR 13279 (ABNT, 2005).

Figura 16 - Argamassadeira planetária com capacidade de 5 litros



Fonte: Autores (2023)

1. Despejo de todo o material seco na cuba previamente untada;
2. Inicia-se a mistura do material seco durante 30 segundos em velocidade baixa a 136 rpm, sendo que nos primeiros 10 segundos 75% da água é adicionada lentamente;
3. Mistura do material em velocidade alta por 60 segundos, a 281 rpm;
4. Repouso durante 90 segundos realizando raspagem da cuba e do garfo para reorganizar a argamassa;
5. Mistura por 60 segundos em velocidade baixa com adição do restante da agua e super plastificante por todo o recipiente.

A Figura 17 a seguir apresenta a argamassa da matriz de referência pronta para ser colocada no molde.

Figura 17 – Argamassa da matriz de referência



Fonte: Autores (2023)

Em seguida, utilizando um tronco de cone e seguindo as recomendações da norma NBR 13276 (ABNT, 2016), foi realizado o ensaio de caracterização da matriz no estado fresco que será detalhado no item 3.3.

Por fim, utilizando uma mesa de abatimento como base de apoio para os moldes, deu-se início a moldagem dos corpos de prova de acordo com as orientações da norma NBR 13279 (ABNT, 2005). Os moldes utilizados são prismáticos de dimensões 4 cm x 4cm x 16 cm. Com os moldes previamente limpos e lubrificados com óleo desmoldante, a argamassa foi colocada com auxílio de uma espátula de mão até atingir metade da altura do molde e, a partir disso, foram efetuados 10 golpes para garantir que todo o espaço fosse preenchido (Figura 18). Em seguida, o restante da argamassa foi adicionada até que preenchesse por completo o molde e novamente foram efetuados 10 golpes para finalizar a compactação do material.

Figura 18 – Etapa de preenchimento dos moldes com a argamassa



Fonte: Autores (2023)

O molde foi transportado até a câmara úmida do laboratório e mantido por 24 horas em umidade controlada de  $95 \pm 2\%$  até que os corpos de prova fossem desmoldados (Figura 19).

Figura 19 – Corpos de prova desmoldados



Fonte: Autores (2023)

Após serem desmoldados, os corpos de prova foram mantidos submersos no tanque de imersão contendo água potável com adição de cal durante vinte sete dias

para que, no vigésimo oitavo dia, fossem iniciados os ensaios de caracterização no estado endurecido. Na Figura 20 são apresentados corpos de prova da submersos no tanque de imersão.

Figura 20 – Tanque de imersão



Fonte: Autores (2023)

### 3.2.3 Moldagem do compósito reforçado com fibra de sisal

Como dito em outras oportunidades, foram produzidos compósitos com três diferentes teores de fibras de sisal, de 0,34 %, 0,67 % e 1,12 %. Para cada teor mencionado, foram produzidos três corpos de prova, totalizando nove corpos de prova. A quantidade de fibra de sisal para cada teor foi calculada e pode ser observada no Quadro 5.

O procedimento para a moldagem do compósito com adição de fibra de sisal é basicamente o mesmo da matriz de referência, sendo que neste, as fibras foram adicionadas na primeira etapa, juntamente com todos os materiais secos na cuba. Na Figura 21 a seguir, é possível visualizar que as fibras de sisal foram adicionadas juntamente com os materiais finos na cuba.

Figura 21 – Fibra de sisal adicionada na cuba juntamente com os materiais finos



Fonte: Autores (2023)

Após essa adição, todas as etapas subsequentes do procedimento são similares, utilizando o mesmo tipo de molde. No entanto, durante o preenchimento dos moldes com a argamassa, assim que metade deles é preenchida, são realizadas ranhuras para promover uma melhor dispersão e compactação das fibras (Figura 22) e, em seguida, os moldes foram preenchidos completamente.

Figura 22 – Ranhuras na argamassa



Fonte: Autores (2023)

Feito isso, seguiu-se com o mesmo procedimento da matriz. Os corpos de prova foram levados à câmara umida e ensaiados à flexão em três pontos e à compressão no vigésimo oitavo dia de cura. A Figura 23 a seguir, apresenta os corpos de prova com teor de 1,12 % de sisal moldados.

Figura 23 – Corpos de prova de 1,12 % de sisal moldados e levados para câmara úmida



Fonte: Autores (2023)

### **3.2.4 Moldagem do compósito reforçado com fibra de sisal e microcelulose**

Os procedimentos para a moldagem desta variação de compósito foram realizados de forma semelhante ao processo de moldagem do compósito que envolveu a adição de fibras de sisal. Neste caso, a microcelulose foi adicionada juntamente com os materiais secos e as fibras de sisal na cuba.

Portanto, foram produzidos três corpos de prova para cada teor de microcelulose, sendo estes 0,5%, 1% e 1,5% em relação a massa total de material cimentício. A quantidade de microcelulose utilizada em cada teor pode ser observada no Quadro 5.

Feita a adição da microcelulose, todas as etapas seguintes de moldagem são conforme os procedimentos vistos em 3.2.3.

Na Figura 24 a seguir, os corpos de prova adicionados com fibra de sisal e microcelulose estão prontos para serem desmoldados.

Figura 24 – Corpos de prova com fibra de sisal e microcelulose após 24 horas moldados



Fonte: Autores (2023)

### 3.3 MÉTODOS

#### 3.3.1 Caracterização dos materiais

##### 3.3.1.1 Fibra de sisal

As fibras de sisal foram recebidas em maços de fibras longas e necessitaram passar por processo de beneficiamento a fim de retirar as impurezas e se tornarem adequadas para serem incrementadas em compósitos cimentícios.

Tal beneficiamento consistiu em submergir cerca de 50 gramas de fibra de sisal em água com temperatura de  $70 \pm 5$  °C, por uma hora (Figura 25).

Figura 25 – Fibras de sisal em processo de beneficiamento submersas em água a 70 °C



Fonte: Autores (2023)

Logo após, as fibras foram secas ao ar livre penduradas por um varal, por 48 horas (Figura 26).

Figura 26 – Fibras de sisal penduradas no varal para etapa de secagem durante 48 horas



Fonte: Autores (2023)

Um aparato de cerdas de prego foi produzido para escovar as fibras manualmente com o intuito de separá-las uma das outras, deixando-as em filamentos individuais. A Figura 27 a seguir mostra o aparato produzido e as fibras escovadas e separadas uma das outras.

Figura 27 – Fibras de sisal escovadas com aparato de cerdas de pregos



Fonte: Autores (2023)

Posteriormente, as fibras foram cortadas em comprimento de  $25 \pm 1$  mm, para se adequarem ao tamanho e geometria do molde (Figura 28).

Figura 28 – Fibras de sisal cortadas em comprimento de  $25 \pm 1$  mm



Fonte: Autores (2023)

Utilizando uma proveta volumétrica de vidro com capacidade de 250 ml, com intervalos de graduação a cada 2 ml, deu-se início ao ensaio de massa específica aparente da fibra de sisal (Figura 29).

Figura 29 – Ensaio de massa específica do sisal utilizando proveta volumétrica graduada



Fonte: Autores (2023)

A equação utilizada para o cálculo da massa específica é dada a seguir pela equação 2:

$$\text{Massa específica} = \frac{M}{V}, \quad (2)$$

sendo:

M = Massa, em gramas;

V = Variação do volume, em cm<sup>3</sup>.

Com volume inicial de água medido em 150 ml, foram adicionados 4,02 gramas de sisal. Realizada a leitura do menisco, o volume atingido e lido foi de 152 ml. Utilizando a equação 2 têm-se:

$$\text{Massa específica da fibra de sisal} = ds = \frac{4,02}{152 - 150} = 2,01 \text{ g/cm}^3$$

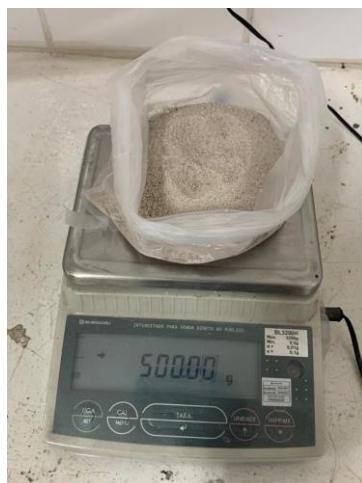
Portanto foi possível obter um resultado de 2,01 g/cm<sup>3</sup> para a massa específica da fibra de sisal utilizada nessa pesquisa.

### 3.3.1.2 Agregado miúdo

Para a caracterização da areia utilizada na pesquisa, foram realizados ensaios de massa específica e análise granulométrica.

Primeiramente, foram peneirados 500 gramas de areia passantes na peneira de abertura 1,18 e retida na de abertura 0,15 (Figura 30). Graduação esta utilizada na presente pesquisa.

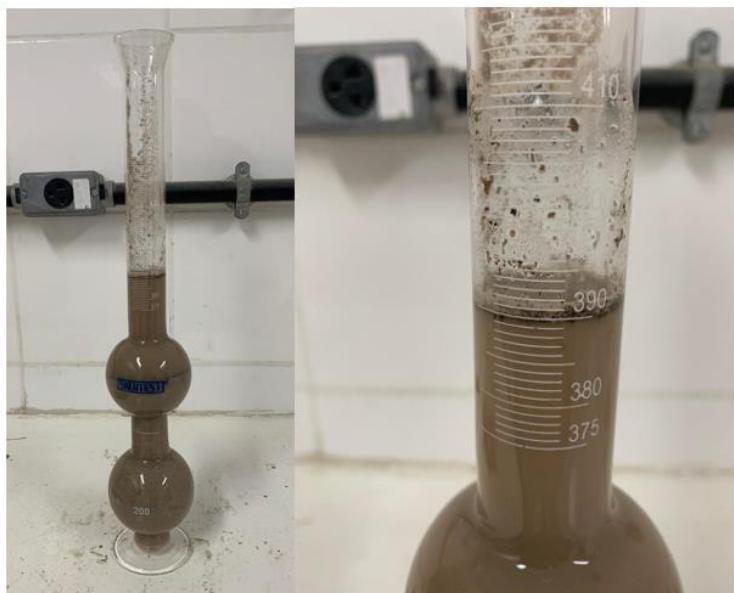
Figura 30 – Porção de areia peneirada



Fonte: Autores (2023)

Utilizando o frasco de Chapman de 500 cm<sup>3</sup> de capacidade e um erro inferior a 0,15 cm<sup>3</sup> a 20°C, iniciou-se o ensaio de massa específica da areia em conformidade com as recomendações da norma NBR NM 52 (ABNT, 2009). Com uma amostra de 500 gramas de areia, a água inserida no frasco foi de 200 ml. Foram executados movimentos circulares de leve agitação para a remoção das bolhas de ar presente no fundo do frasco, conforme sugerido pela norma NBR NM 52 (ABNT, 2009). Por fim, a leitura final atingida no menisco foi de 389,5 ml (Figura 31).

Figura 31 – Ensaio de massa específica da areia utilizando frasco de Chapman



Fonte: Autores (2023)

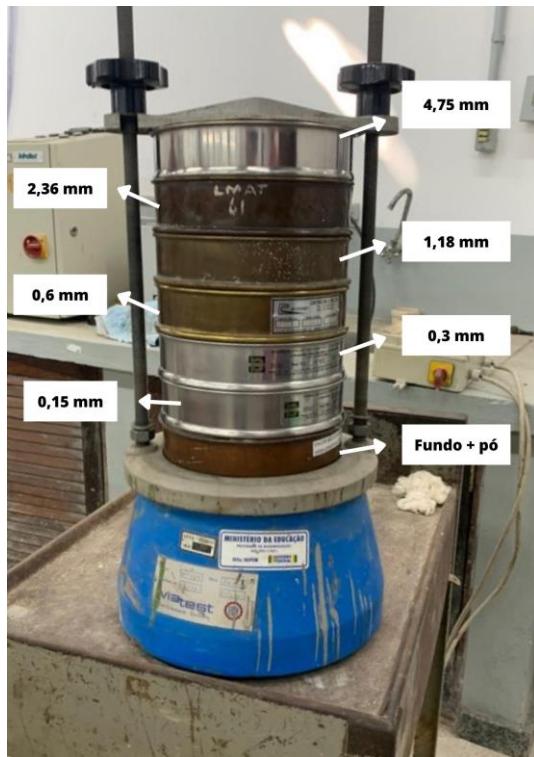
Utilizando a equação 2, têm-se:

$$\text{Massa específica da areia} = \frac{\text{dareia}}{389,5 - 200} = \frac{500}{389,5 - 200} = 2,64 \text{ g/cm}^3$$

Portanto foi possível obter um resultado de 2,64g/cm<sup>3</sup> para a massa específica da areia utilizada nessa pesquisa.

A realização do ensaio de análise granulométrica seguiu as orientações da norma NBR NM 248 (ABNT, 2001). Foram utilizadas peneiras da série normal e o ensaio foi realizado duas vezes com o auxílio do peneirador, ambos com amostras de 300 gramas. Na Figura 32 a seguir, é possível visualização as peneiras de série normal dispostas no peneirador.

Figura 32 – Peneiras dispostas no peneirador

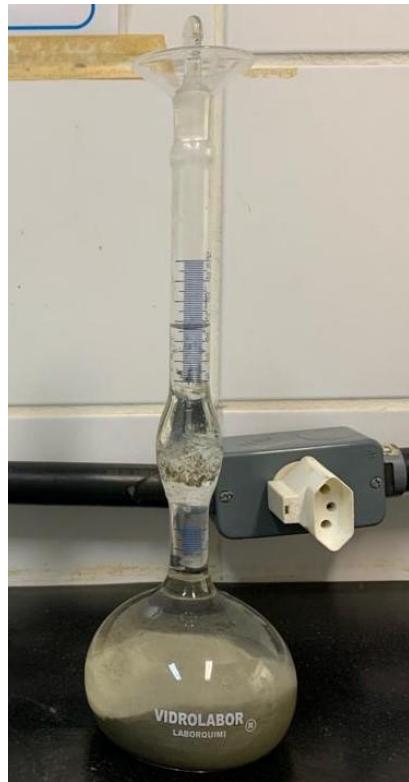


Fonte: Autores (2023)

### 3.3.1.3 Cimento

Para a caracterização do cimento foi feito ensaio de massa específica de acordo com as recomendações da NBR 16605 (ABNT, 2017). Utilizou-se frasco volumétrico de Le Chatelier onde o volume de um corpo é medido através do deslocamento de água (Figura 33). Inicialmente, foi inserido querosene até a graduação de 0,6 ml e em seguida foram adicionados 60g de cimento. O volume atingido e lido foi de 20,6ml com um fator de correção de 1,0.

Figura 33 – Ensaio de massa específica do cimento utilizando frasco volumétrico de Le Chatelier



Fonte: Autores (2023)

A equação utilizada para o calculo da massa específica do cimento é apresentada a seguir pela equação 4:

$$\text{Massa específica} = \frac{M}{V} \times F, \quad (4)$$

sendo:

M = Massa, em gramas;

V = Variação do volume, em cm<sup>3</sup>;

F = Fator de correção.

De acordo com os dados apresentados e utilizando a equação 4, têm-se:

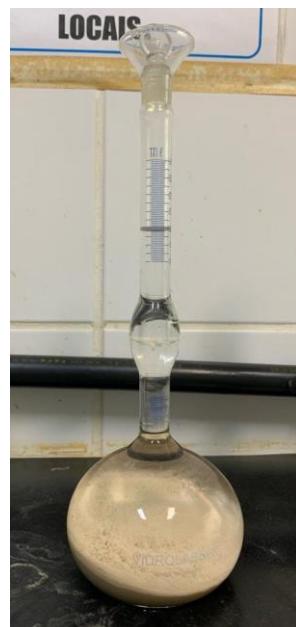
$$\text{Massa específica do cimento} = dc = \frac{60}{20,6 - 0,6} \times 1 = 3g/cm^3$$

Portanto foi possível obter um resultado de 3g/cm<sup>3</sup> para a massa específica do cimento utilizado nessa pesquisa.

### 3.3.1.4 Metacaulim

A caracterização do metacaulim foi realizada a partir do ensaio de massa específica, seguindo as recomendações da NBR 16605 (ABNT, 2017). Utilizando o frasco volumétrico graduado de Le Chatelier, foi colocado querosene até a graduação inicial de -0,2ml, e após isso, foram adicionados 50,02g de metacaulim. O volume final atingido e lido foi de 19,85ml com um fator de correção F de 1,0358 (Figura 34).

Figura 34 – Ensaio de massa específica do Metacaulim utilizando frasco volumétrico de Le Chatelier



Fonte: Autores (2023)

De acordo com os dados apresentados e utilizando a equação 4, têm-se:

$$\text{Massa específica do metacaulim} = dm_k = \frac{50}{19,85 - (-0,2)} \times 1,0358 = 2,58 \text{ g/cm}^3$$

Portanto foi possível obter um resultado de 2,58g/cm<sup>3</sup> para a massa específica do metacaulim utilizado nessa pesquisa.

### 3.3.2 Caracterização dos compósitos no estado fresco

De acordo com as recomendações da norma NBR 13276 (ABNT, 2016), a caracterização dos compósitos quanto ao seu índice de consistência foi realizada a

partir de ensaio de fluidez da argamassa, denominado “flow table”. Para a realização deste ensaio, os materiais utilizados foram mesa de abatimento, molde de aço em formato de tronco de cone, pano úmido, soquete de aço, espátula de aço e paquímetro. A Figura 35 a seguir, apresenta a mesa de abatimento e o tronco de cone que foram utilizados para este ensaio.

Figura 35 – Tronco de cone sobre a mesa de abatimento



Fonte: Autores (2023)

Este ensaio foi realizado para cada uma das seis variações de compósitos, além da matriz de referência.

O ensaio de caracterização do estado fresco iniciou-se logo após o procedimento de mistura da argamassa chegar ao fim, como descrito nos itens 3.2.2, 3.2.3 e 3.2.4. Com a mesa de abatimento untada com água, o molde de aço foi apoiado em seu centro e a argamassa começou a ser colocada (Figura 36) de acordo com a seguinte sequência:

- Inserir argamassa até 1/3 da altura do molde de aço;
- Aplicar 15 golpes com o soquete de aço para compactar a argamassa, de modo que os golpes sejam distribuídos por toda a argamassa;
- Inserir argamassa até 2/3 da altura do molde de aço;
- Aplicar mais 10 golpes com o soquete de aço;
- Inserir argamassa até completar todo o molde de aço;

- Aplicar mais 5 golpes com o soquete de aço;
- Realizar o rasamento da argamassa com o auxílio da espátula de aço em movimentos curtos de vai-e-vem por toda superfície;
- Eliminar partículas de argamassa que estejam em volta do molde com pano.

Figura 36 – Argamassa disposta no molde em formato de tronco de cone



Fonte: Autores (2023)

Com a superfície nivelada, o molde foi retirado e foram aferidas duas medidas de diâmetro ao redor da argamassa, com o auxílio do paquímetro, em pares de pontos uniformemente distribuídos ao longo do perímetro (Figura 37).

Figura 37 – Medição do diâmetro da argamassa antes dos golpes



Fonte: Autores (2023)

Após as duas medidas, foram aplicados 30 golpes com auxílio da mesa de abatimento durante 30 segundos e posteriormente foram realizados mais duas medições de diâmetro. A Figura 38 apresenta o espalhamento da argamassa que contém fibras de sisal e microcelulose, sendo feita as medições de diâmetro com auxílio do paquímetro.

Figura 38 – Espalhamento da argamassa e medição dos diâmetros após os golpes



Fonte: Autores (2023)

A determinação final do índice de consistência, tanto antes quanto depois da aplicação dos golpes, será dado pela média entre os pares de valores obtidos das medições de diâmetro.

### **3.3.3 Caracterização dos compósitos no estado endurecido**

Todos os corpos de prova produzidos neste estudo foram submetidos a ensaios para avaliar suas propriedades mecânicas, tais como resistência à compressão e resistência à tração na flexão em três pontos. Tanto os corpos de prova da matriz cimentícia quanto dos compósitos produzidos foram ensaiados com o auxílio de uma máquina disponibilizada pelo LEMAC. A máquina utilizada foi uma máquina universal de ensaios com transitor elétrico, da marca EMIC e modelo DL 30000. Um computador, também disponibilizado pelo LEMAC, conectado à máquina, e, através

do software “Tesc”, foi realizada a leitura dos dados.

Todos os corpos de prova, após serem moldados, foram colocados na câmara úmida com umidade controlada de 95% por 24 horas, e após, ficaram submersos em tanque com água potável adicionada com cal, ao longo de vinte sete dias e então retirados e colocados em uma prateleira dentro da própria câmara, para que no vigésimo oitavo dia pudessem ser ensaiados.

Na Figura 39 a seguir, é apresentada a máquina EMIC, utilizada para realizar os ensaios de caracterização dos corpos de prova produzidos no estado endurecido.

Figura 39 – Máquina EMIC



Fonte: Autores (2023)

Como mencionado em outras oportunidades, foram produzidos neste estudo três corpos de prova da matriz de referência. Para o compósito cimentício reforçado com fibras de sisal, foram produzidos três corpos de prova para cada teor de sisal, sendo estes 0,34%, 0,67% e 1,12%, totalizando nove corpos de prova. Por fim, para os compósitos cimentícios reforçados tanto com fibras de sisal quanto com microcelulose, foram produzidos três corpos de prova para cada teor de microcelulose, sendo estes 0,5%, 1% e 1,5%. Nestes, o teor de fibras de sisal foi de 0,34%, considerado como o teor de dosagem ótima e será descrito melhor posteriormente no

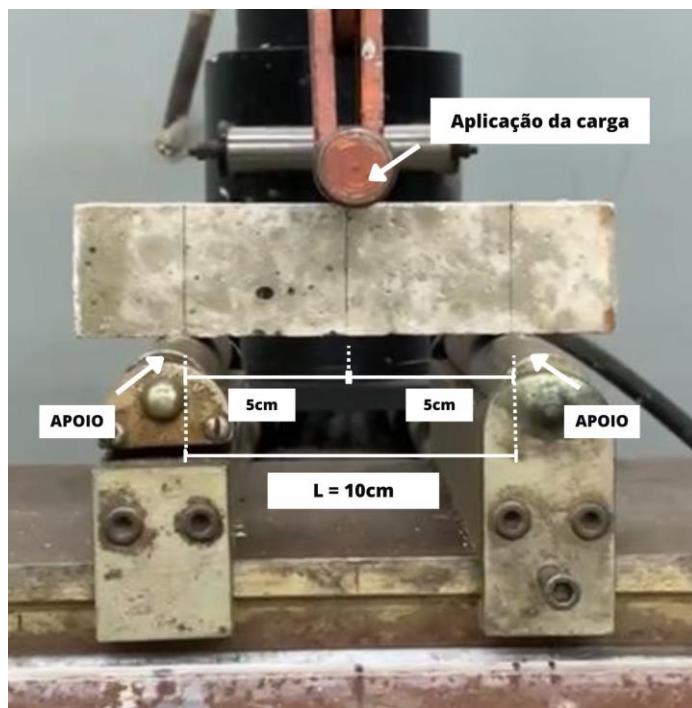
item 4.1.2.

### 3.3.3.1 Resistência mecânica à tração na flexão em 3 pontos

O primeiro ensaio realizado foi o de flexão em três pontos. Para isso, houveram alguns procedimentos nos corpos de prova para torná-los adequados. Primeiramente, com o auxílio de uma espátula de aço, retirou-se pequenas rebarbas dos corpos de prova a fim de torná-los simétricos e poder mantê-los nivelados quando estiverem posicionados na máquina de ensaio. Os procedimentos que envolveram os ensaios de rompimento tanto de tração na flexão quanto de compressão seguiram as recomendações da norma NBR 13279 (ABNT, 2005).

Já nivelados, marcações de caneta foram realizadas nos corpos de prova com a intenção de facilitar no momento de acoplar os mesmos nos roletes de aço da máquina. A Figura 40 a seguir aponta como o corpo de prova era disposto na máquina, além de apresentar as marcações de caneta e suas respectivas distâncias. Os roletes inferiores foram espaçados em 10 centímetros.

Figura 40 – Corpo de prova acoplado no dispositivo de carga para realização do ensaio de resistência à tração na flexão.



Fonte: Autores (2023)

Para a realização do ensaio, a máquina EMIC foi programada com taxa de

carregamento em 0,5 mm/min. Com o corpo de prova corretamente acoplado no dispositivo de carga, uma força de pré-carga de intensidade mínima era desenvolvida sobre o corpo de prova a fim de mantê-lo completamente estabilizado e garantir que toda sua base estivesse sendo apoiada sobre os roletes do dispositivo de carga. Garantido isso, iniciou-se o ensaio com a força sendo gradativamente desenvolvida sobre o corpo de prova e posteriormente havendo o rompimento do mesmo, como mostrado na Figura 41.

Figura 41 – Rompimento do corpo de prova



Fonte: Autores (2023)

A determinação da tensão de ruptura à flexão de 3 pontos dos corpos de prova foi calculada utilizando a equação 5, representada a seguir:

$$\text{Tensão de ruptura à flexão de 3 pontos} = \sigma_f = \frac{3 \times P \times L}{2 \times B \times H^2}, \quad (5)$$

sendo:

P = Carga no instante da ruptura do corpo de prova, dado em newton;

L = Distância entre os apoios do corpo de prova, dado em milímetros;

B = Largura do corpo de prova, em milímetros;

H = Altura do corpo de prova, em milímetros.

Os resultados finais das resistências à tração na flexão de 3 pontos para cada variação serão apresentados com desvio padrão de cálculo. Este, por sua vez, foi calculado utilizando a equação 6, apresentada a seguir:

$$\text{Desvio padrão} = Dp = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Xi - Ma)^2}{n}}, \quad (6)$$

sendo:

$\sum$  = Somatório de todos os dados, desde a primeira posição “i=1” até a posição “n”;

$Xi$  = Valor individual na posição “i” no conjunto de termos;

$Ma$  = Média aritmética dos termos;

n = Quantidade de termos.

No caso, os termos significam a resistência à tração de cada corpo de prova.

A Figura 42 a seguir, exibe o corpo de prova que teve adição de fibra de sisal com teor de 0,67 %, após ser ensaiado. Na Figura, ainda é possível observar a disposição das fibras de sisal por entre a matriz cimentícia.

Figura 42 - Corpos de prova com 0,67 % de fibras de sisal



Fonte: Autores (2023)

### 3.3.3.2 Resistência à compressão

Os ensaios de compressão foram realizados novamente na máquina EMIC após o término dos ensaios de flexão, ajustando-se o aparato de apoio.

Como no ensaio de flexão os corpos de prova se dividiram em duas partes, foi realizado para cada corpo de prova, seja ele da matriz de referência ou dos compósitos cimentícios, dois ensaios de resistência à compressão.

A máquina EMIC foi programada com taxa de carregamento em 0,5 mm/min e o procedimento de aplicação de pré-carga também realizado de forma similar.

Uma alteração na máquina EMIC precisou ser efetuada. Agora, o dispositivo de carga utilizado para realização dos ensaios de flexão deram espaço para outro dispositivo de carga, apropriado para ensaios de compressão. Este, por sua vez, possui prato inferior onde corpo de prova se apoia, e prato superior que desenvolve a carga sobre o mesmo. O prato superior tem dimensões 4 cm x 4 cm e encosta no corpo de prova de forma que fique alinhado com as laterais, a fim de desenvolver a força igualmente distribuída.

A Figura 43 a seguir mostra o dispositivo de carga para ensaios de compressão e como foram acoplados os corpos de prova junto aos pratos superiores e inferiores.

Figura 43 - Dispositivo de carga para ensaios de compressão



Fonte: Autores (2023)

A determinação resistência à compressão dos corpos de prova foi calculada utilizando a equação 7, representada a seguir:

$$\text{Resistência à compressão} = \sigma_c = \frac{F}{A}, \quad (7)$$

sendo:

F = Carga no instante da ruptura do corpo de prova, dado em newton;

A = Área da seção transversal do corpo de prova, dado em milímetro quadrado.

Como mencionado acima, os resultados finais das resistências à compressão para cada variação serão apresentados com desvio padrão de cálculo, que pode ser calculado conforme apresentado anteriormente pela equação 6.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1 RESULTADOS

Estão apresentados e discutidos neste capítulo os resultados obtidos dos ensaios realizados para a caracterização dos materiais e matrizes, bem como um comparativo entre as variações produzidas. Primeiramente, os resultados dos ensaios realizados para caracterização dos materiais são apresentados. Em seguida, são apresentados os resultados dos ensaios realizados para a caracterização dos compósitos no estado fresco por meio do índice de consistência. Por fim, são apresentados os resultados de resistência à tração na flexão e à compressão. A partir desses resultados, espera-se avaliar o efeito da inclusão da fibra de sisal e da microcelulose.

#### 4.1.1 Caracterização dos materiais

No capítulo 3, mais especificamente no item 3.3.1 desta pesquisa, foi discutido todos os ensaios que foram realizados para a caracterização dos materiais, como o cimento, a areia, metacaulim e a fibra de sisal. Naquele momento, foi demonstrado os cálculos realizados e exposto com detalhes a realização dos ensaios de caracterização. Esta exposição se fez necessária por conta dos cálculos realizados quanto ao consumo de cimento. Portanto, este item traz de forma breve os resultados acerca da caracterização dos materiais. O Quadro 6 a seguir apresenta os resultados dos ensaios de massa específica aparente dos materiais utilizados.

Quadro 6 – Massa específica dos materiais utilizados na pesquisa

Material	Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )
sisal	2,01
areia	2,64
cimento	3
metacaulim	2,58

Fonte: Autores (2023)

Quanto ao resultado referente à massa específica aparente do sisal, verifica-se

que este se encontra ligeiramente acima aos dados presentes no trabalho de Pickering et al. (2016), que atribui ao sisal massa específica que varia entre 1,3 a 1,5 g/cm<sup>3</sup>. Porém, o autor menciona em sua pesquisa que as massas específicas de fibras vegetais apresentam valores amplamente variáveis, sendo bastante sensíveis a fatores como local do plantio e a forma como o ensaio foi realizado.

Quanto à análise granulométrica da areia utilizada nesta pesquisa, a seguir, é apresentado o Quadro 7 onde é possível observar as malhas das peneiras utilizadas, a massa retida em cada uma delas e as porcentagens acumuladas. Os dados apresentados são referentes a uma amostra.

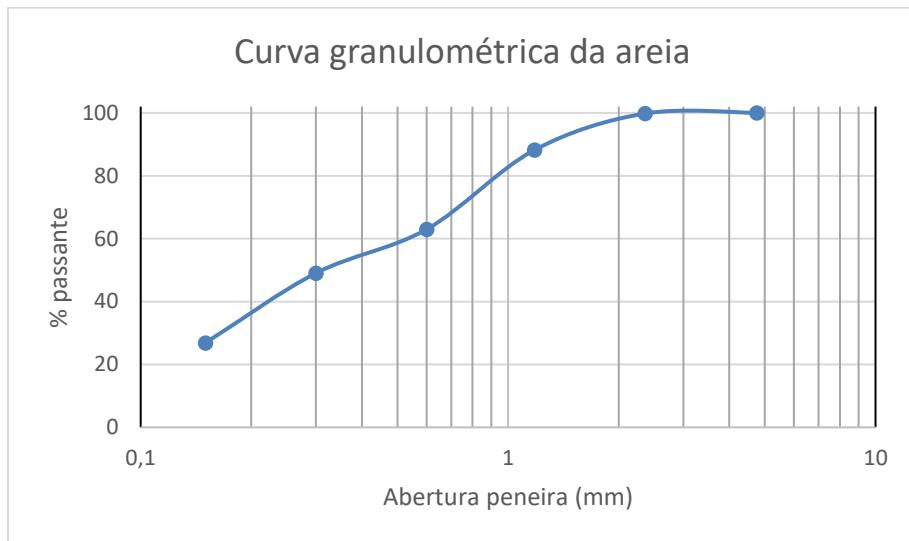
Quadro 7 – Análise granulométrica da areia

Malha (mm)	Massa (g)	Porcentagem (%)	Material retido acumulado (%)	Material passante acumulado (%)
4,75	0	0	0	100
2,36	0,59	0	0	100
1,18	34,75	12	12	88
0,6	75,66	25	37	63
0,3	41,67	14	51	49
0,15	66,46	22	73	27
Fundo + Pó	80,56	27	100	0
Total	299,69			

Fonte: Autores (2023)

Os resultados revelaram-se satisfatórios, considerando que ocorreu uma diferença inferior a 0,3% em cada amostra e que a distribuição granulométrica permaneceu dentro da zona utilizável especificada na NBR 7211 (ABNT, 2009). A seguir, na Figura 44, é mostrada a curva granulométrica da areia.

Figura 44 - Curva granulométrica da areia



Fonte: Autores (2023)

Ainda, foi obtido o módulo de finura da amostra ao utilizar a equação 3, mostrada a seguir:

$$\text{Módulo de finura} = \frac{\text{Soma da porcentagem retida acumulada}}{100}, \quad (3)$$

Portanto, têm-se:

$$\text{Módulo de finura} = \frac{0 + 0 + 12 + 37 + 51 + 73}{100} = 1,73$$

O módulo de finura obtido foi de 1,73.

#### 4.1.2 Caracterização dos compósitos no estado fresco

Como mencionado no item 3.3.2, para a caracterização das matrizes no estado fresco foi realizado ensaio de índice de consistência, de acordo com as orientações da norma NBR 13276 (ABNT, 2016). Através deste ensaio, foi possível analisar como a adição das fibras de sisal e também da microcelulose pode influenciar na fluidez e trabalhabilidade das argamassas produzidas, em comparação com a matriz de referência.

Para cada ensaio realizado foram obtidos dois resultados de medições de

diâmetro da argamassa antes de serem aplicados os golpes pela mesa de abatimento, e mais dois resultados de medições de diâmetro após serem aplicados os golpes.

Os resultados são apresentados a seguir no Quadro 8 e o índice de consistência está representado pelo resultado médio das duas medições.

Quadro 8 - Resultados dos ensaios de índice de consistência das variações produzidas

Matriz cimentícia	Variação	Diâmetros antes dos golpes (mm)	Índice de consistência antes dos golpes (mm)	Diâmetros depois dos golpes (mm)	Índice de consistência depois dos golpes (mm)
<b>Matriz de referência</b>	Referência	145,000	<b>146,250 ± 1,768</b>	343,000	<b>345,500 ± 3,536</b>
		147,500		348,000	
<b>Compósito cimentício reforçado com fibras de sisal</b>	Sisal 0,34%	136,000	<b>136,050 ± 0,071</b>	290,400	<b>289,050 ± 1,909</b>
		136,100		287,700	
	Sisal 0,67%	129,400	<b>130,200 ± 1,131</b>	272,500	<b>263,550 ± 12,657</b>
		131,000		254,600	
	Sisal 1,12%	130,000	<b>129,000 ± 1,414</b>	234,500	<b>231,250 ± 4,596</b>
		128,000		228,000	
<b>Compósito cimentício reforçado em multiescala, com fibras de sisal e microcelulose</b>	Sisal 0,34% e MCC 0,5%	135,100	<b>134,800 ± 0,424</b>	284,000	<b>279,500 ± 6,364</b>
		134,500		275,000	
	Sisal 0,34% e MCC 1%	131,800	<b>132,250 ± 0,636</b>	221,000	<b>224,550 ± 5,020</b>
		132,700		228,100	
	Sisal 0,34% e MCC 1,5%	129,800	<b>129,200 ± 0,849</b>	183,600	<b>187,350 ± 5,303</b>
		128,600		191,100	

Fonte: Autores (2023)

As Figuras 45, 46 e 47 a seguir, mostram como ficou o espalhamento das argamassas após a aplicação dos golpes. A fim de melhor comparação, as variações dos compósitos são as de maior concentração de cada material de reforço.

Figura 45 - Argamassa da matriz de referência



Fonte: Autores (2023)

Figura 46 - Compósito reforçado apenas com fibras de sisal, com teor de 1,12 %



Fonte: Autores (2023)

Figura 47 - Compósito reforçado com fibras de sisal e microcelulose, com teor de 1,5% de microcelulose



Fonte: Autores (2023)

#### **4.1.2 Caracterização dos compósitos no estado endurecido**

O intuito deste trabalho foi avaliar o comportamento de algumas propriedades, como a trabalhabilidade, resistência à tração na flexão e à compressão, da matriz de referência quando reforçada com fibras de sisal e microcelulose. Contudo, o objetivo de adicionar esses materiais é para, em um primeiro momento, analisar a viabilidade de utilizá-los para resistirem a esforços de tração quando encorporado em compósitos cimentícios. Como visto na revisão bibliográfica, este é o principal parâmetro modificado pela adição de fibras.

Como já demonstrado em alguns trabalhos expostos na revisão bibliográfica, a resistência à compressão não é necessariamente aumentada quando adicionamos macrofibras. Portanto, o ensaio que mais interessa ao propósito deste trabalho é o de resistência à tração na flexão de 3 pontos.

A partir do ensaio de flexão, foi selecionado o teor de dosagem ótima de sisal que seria aquele que geraria a resistência à tração na flexão máxima, dentre as variações produzidas de sisal. Portanto, esse foi o parâmetro adotado para a obtenção do teor de dosagem ótima de sisal e, definido isso, seguiu-se para a fabricação dos compósitos com reforço em multiescala, reforçados com fibras de sisal e microcelulose.

##### **4.1.2.1 – Resistência à tração na flexão de 3 pontos**

A seguir, no Quadro 9, são apresentados os resultados acerca do ensaio à flexão de 3 pontos.

O resultado dos ensaios de resistência à tração na flexão de 3 pontos para cada variação produzida nesta pesquisa, somada ao desvio padrão de cálculo, será representada no Quadro 9 pela média das tensões de ruptura à flexão de 3 pontos dos corpos de prova de cada variação. Ainda no Quadro 9, é possível observar a leitura aferida da força que resultou no rompimento de cada corpo de prova.

Quadro 9 - Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão de 3 pontos de todos os corpos de prova produzidos

Resistência mecânica à tração na flexão de 3 pontos					
Matriz cimentícia	Variação	Espécime	Força (kgf)	Tensão de ruptura à flexão de 3 pontos (MPa)	Média das tensões de ruptura calculadas (MPa)
Matriz de referência	Referência	CP1	133,000	3,057	$2,819 \pm 0,241$
		CP2	112,000	2,574	
		CP3	123,000	2,827	
Compósito cimentício reforçado com fibras de sisal	Sisal 0,34%	CP1	190,340	4,375	$4,734 \pm 0,324$
		CP2	209,860	4,823	
		CP3	217,670	5,003	
	Sisal 0,67%	CP1	186,430	4,285	$4,405 \pm 0,247$
		CP2	204,000	4,689	
		CP3	184,480	4,240	
	Sisal 1,12%	CP1	187,410	4,307	$4,453 \pm 0,206$
		CP2	200,100	4,599	
		CP3	S.D.	S.D.	
Compósito cimentício de multiescala reforçado com fibras de sisal e microcelulose	Sisal 0,34% e MCC 0,5%	CP1	S.D.	S.D.	$4,902 \pm 1,126$
		CP2	178,630	4,106	
		CP3	247,930	5,699	
	Sisal 0,34% e MCC 1%	CP1	201,080	4,622	$4,128 \pm 0,437$
		CP2	164,960	3,791	
		CP3	172,770	3,971	
	Sisal 0,34% e MCC 1,5%	CP1	169,800	3,903	$4,457 \pm 0,505$
		CP2	212,790	4,891	
		CP3	199,120	4,577	

Fonte: Autores (2023)

Os corpos de prova que não foram possíveis de terem seus resultados registrados devido a algum incidente ou que não puderam ser ensaiados, são observados no Quadro 9 com a sigla "S.D", que significa "sem dados".

#### 4.1.2.2 – Resistência à compressão

O resultado do ensaio de compressão para cada variação produzida nesse trabalho é proveniente da média dos resultados da resistência à compressão calculada para os seis corpos de prova de cada variação, somada ao desvio padrão de cálculo. Tanto como o resultado da resistência à compressão de cada corpo de prova quanto para cada variação, são exibidos no Quadro 10. Além dos resultados, no Quadro 10 é possível visualizar o valor da carga máxima de ruptura.

Os corpos de prova que não foram possíveis de terem seus resultados registrados devido a algum incidente ou que não puderam ser ensaiados, são

observados no Quadro 10 com a sigla “S.D”, que significa “sem dados”.

Quadro 10 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão de todos os corpos de prova produzidos

Resistência mecânica à compressão					
Matriz cimentícia	Variação	Espécime	Força (kgf)	Resistencia à compressão (MPa)	Média das resistência calculadas (MPa)
Matriz de referência	Referência	CP1	6107,440	37,433	<b>35,627 ± 1,057</b>
		CP2	5812,660	35,627	
		CP3	5804,850	35,579	
		CP4	S.D	S.D	
		CP5	S.D	S.D	
		CP6	S.D	S.D	
Compósito cimentício reforçado com fibras de sisal	Sisal 0,34%	CP1	5006,400	30,685	<b>29,533 ± 1,468</b>
		CP2	4732,120	29,004	
		CP3	5199,670	31,870	
		CP4	4704,790	28,836	
		CP5	4530,060	27,765	
		CP6	4904,890	30,063	
	Sisal 0,67%	CP1	4682,340	28,699	<b>28,567 ± 1,753</b>
		CP2	5074,730	31,104	
		CP3	4639,390	28,436	
		CP4	4228,450	25,917	
		CP5	4478,330	27,448	
		CP6	4792,630	29,375	
	Sisal 1,12%	CP1	4265,540	26,144	<b>27,715 ± 0,769</b>
		CP2	4496,880	27,562	
		CP3	4574,960	28,041	
		CP4	4546,660	27,867	
		CP5	4489,070	27,514	
		CP6	4625,720	28,352	
Compósito cimentício de multiescala reforçado com fibras de sisal e microcelulose	Sisal 0,34% e MCC 0,5%	CP1	4120,100	25,253	<b>25,887 ± 1,716</b>
		CP2	3906,340	23,943	
		CP3	4731,140	28,998	
		CP4	4403,170	26,988	
		CP5	4187,550	25,666	
		CP6	4259,690	26,108	
	Sisal 0,34% e MCC 1%	CP1	4868,770	29,841	<b>30,089 ± 2,053</b>
		CP2	4845,340	29,698	
		CP3	4412,930	27,048	
		CP4	S.D	S.D	
		CP5	5300,210	32,486	
		CP6	5118,650	31,373	
	Sisal 0,34% e MCC 1,5%	CP1	3590,080	22,004	<b>25,890 ± 2,909</b>
		CP2	3759,920	23,045	
		CP3	4575,940	28,047	
		CP4	4451,980	27,287	
		CP5	3996,140	24,493	
		CP6	4761,400	29,183	

Fonte: Autores (2023)

## 4.2 ANÁLISES

Neste item são apresentadas comparações dos resultados obtidos acerca do comportamento mecânico e da consistência das argamassas mediante o incremento de sisal e, posteriormente, de microcelulose, em relação a matriz de referência.

### 4.2.1 Modificações na consistência

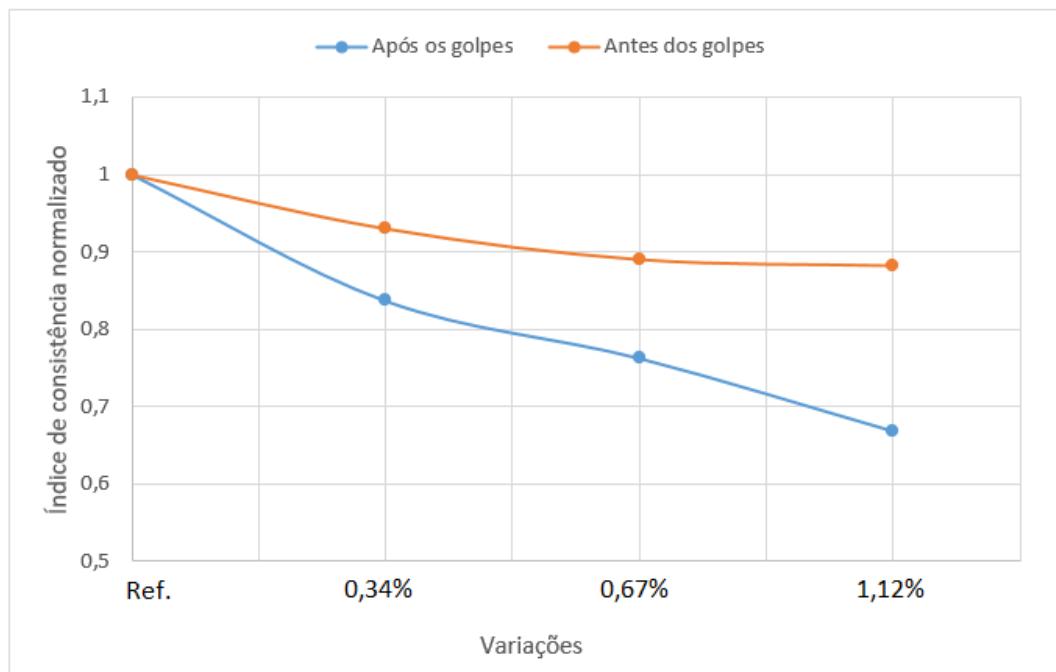
Um parâmetro estudado nesta pesquisa foi a como a consistência das matrizes são modificadas ao serem incrementadas por fibras de sisal e microcelulose.

Avaliando os resultados apresentados no item 4.1.2, observa-se que em um primeiro momento, o incremento da fibra de sisal ocasionou a redução do índice de consistência quando comparado com a matriz de referência. A consistência diminuiu em percentual de 16% e 33% nos compósitos com 0,34 e 1,12 % de sisal. Estes resultados são semelhantes a de artigos encontrados na literatura. Na literatura, os autores Colonetti e Godinho (2017) e Okeola et al. (2018), relatam em seus artigos que a trabalhabilidade da matriz foi diminuída quando adicionaram fibras de sisal, em percentuais cada vez maiores conforme aumentava o teor de fibras inseridas (COLONETTI; GODINHO, 2017; OKEOLA et al., 2018).

Em um segundo instante, matrizes que foram adicionadas fibras de sisal e microcelulose tiveram redução ainda maior da trabalhabilidade, de 45%, no compósito com maior quantidade de MCC, 1,5%. Ainda na literatura, é possível encontrar artigos que apresentam dados parecidos. Parveen et al. (2018) em seu artigo, observou uma redução máxima de 20% em compósitos com 1% de teor de microcelulose. Ferreira (2016) ao adicionar microcelulose em matrizes cimentícias, notou a redução da trabalhabilidade suficiente para passar a adicionar aditivos químicos e aumentar a relação água/cimento a fim de poder conduzir seu trabalho (PARVEEN et al., 2018; FERREIRA, 2016).

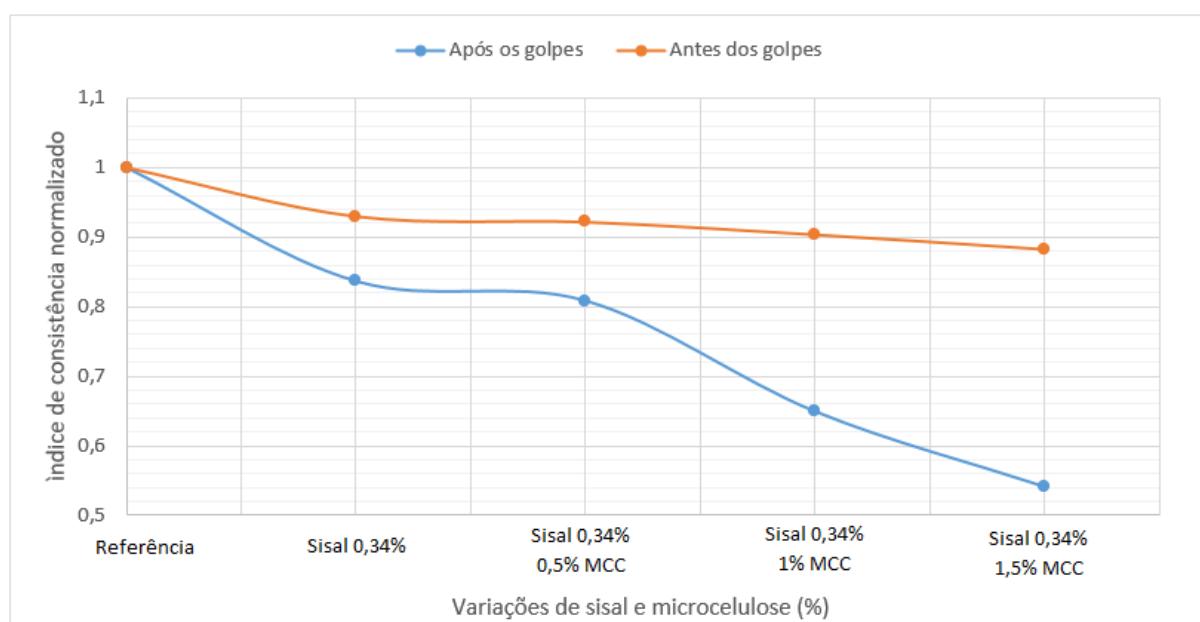
A seguir, as Figura 48 e 49 apresentam gráficos de linhas comparando os índices normalizados de consistência da referência com os demais compósitos, tanto antes quanto depois dos golpes. A Figura 48 compara a matriz de referência com os compósitos reforçados com fibras de sisal. Já a Figura 49 compara a matriz de referência com a variação definida como teor de dosagem ótima de fibras de sisal, 0,34 %, e por fim, com as variações que incluíam a microcelulose.

Figura 48 - Comparativo entre índices normalizados de consistência da matriz de referência com compósitos reforçados com fibras de sisal



Fonte: Autores (2023)

Figura 49 - Comparativo entre índices normalizados de consistência da matriz de referência com a variação de teor de dosagem ótima de fibras de sisal e com compósito reforçado em multiescala



Fonte: Autores (2023)

Uma possível razão para essas modificações ocorrerem é que os materiais naturais, tanto em escala macro quanto micro, têm a capacidade de absorver água. Portanto, quando esses materiais são adicionados a uma argamassa fresca, parte da água que deveria ser utilizada para a mistura da argamassa é absorvida pelas fibras. Como resultado, uma porção dessa água não está mais disponível para a mistura, o que acarreta na redução da trabalhabilidade da argamassa. Como mencionado por Toledo Filho et al. (2011), as fibras naturais são hidrofílicas por possuirem grupos de hidroxilos em sua composição e, devido a isso, faz com que absorbam grande quantidade de água levando a redução da aderência física entre a fibra e a matriz (TOLEDO FILHO et al., 2011). Bergado et al. (2010) menciona que as hemiceluloses são responsáveis pela absorção de água das fibras, mesmo que a celulose cristalina e a lignina possuam papéis importantes nesse âmbito. Ou seja, quanto mais hemicelulose haver na composição física da fibra, maior será a absorção de água da mesma (BERGADO et al., 2010).

Observado por Izquierdo (2011), as fibras de sisal utilizadas em sua pesquisa passaram por ensaio de determinação da absorção de água, na qual foi registrada absorção de até 139% ao fim das primeiras 24 horas de imersão em água (IZQUIERDO, I. S, 2011). Este valor foi menor do que o encontrado por Toledo Filho (1997) e Savastano (2000), que em seus ensaios obtiveram 193% e 151% nas primeiras 24 horas (TOLEDO FILHO, 1997; SAVASTANO, 2000).

A diminuição do índice de consistência foi ainda mais expressivo nos compósitos reforçados em multiescala, com redução gradativa conforme aumentou-se o teor de microcelulose. Isso é devido ao incremento da microcelulose, que somado ao efeito da inclusão das fibras, reduziu ainda mais a trabalhabilidade da argamassa. O comportamento de diminuição da trabalhabilidade da argamassa proveniente da adição de MCC pode ser explicado devido a presença de água em estado livre nos poros capilares, uma vez que, a medida que a concentração de MCC aumenta, é provável que o tamanho dos poros capilares também aumentam, junto com a formação de alguns poros maiores que seriam provenientes dos aglomerados de MCC, resultando num aumento expressivo da absorção de água.

Como observado por Parveen et al. (2018) em sua pesquisa desenvolvida, o compósito reforçado com baixa concentração de MCC (0,2%) obteve redução da absorção de água. Isso pode ser atribuído ao fato de que os poros capilares destes corpos de prova apresentaram dimensão inferior quando comparados com a matriz

de referência produzida e, devido a isso, a água estava presente em menor quantidade. Conforme aumentou-se o teor de MCC para teores acima de 0,8%, foi possível observar que os poros capilares também aumentaram juntamente com a formação de poros ainda maiores devido ao efeito de aglomeração, resultando em aumento de absorção de água e consequentemente diminuição da trabalhabilidade (PARVEEN et al., 2018).

#### **4.2.2 Modificações no comportamento mecânico**

##### **4.2.2.1 Resistência à tração na flexão**

Resultados positivos foram obtidos com os ensaios à flexão realizados em todas as variações, como observado no Quadro 9. A resistência à tração na flexão de todos os compósitos reforçados com sisal e com microcelulose foram aumentadas quando comparadas com a matriz de referência. Para o compósito reforçado apenas com fibras de sisal, o aumento da resistência foi mais significativo quanto menor foi o teor de fibras, tendo percentual máximo de 68% com o teor de 0,34%. Estes resultados mostram-se compatíveis com a literatura. Beskopylny et al. (2022) expôs em seu artigo que após os ensaios de flexão, foi possível notar que amostras com 1% de teor de fibras de sisal obtiveram aumento máximo de resistência de 33% quando comparado à amostra convencional produzida. Já na pesquisa de Okeola et al. (2018), o aumento percentual máximo foi de 47% com teor de 1% de fibras de sisal (OKEOLA et al., 2018; BESKOPYLNY et al., 2022).

As modificações que ocorreram por conta do uso de fibras de sisal como reforço nestes compósitos podem ser atribuídas ao comportamento dúctil que o compósito adquire após as primeiras fissuras na matriz. As fibras formam pontes entre as fissuras e transferem as tensões entre elas, atrasando a velocidade de propagação das mesmas (PEREIRA, 2017; FIGUEIREDO, 2011).

Contudo, conforme os resultados obtidos, em ambos os tipos de compósitos o aumento dos teores não ocasionou o aumento gradativo da resistência à tração na flexão. Isso pode ser explicado devido ao fenômeno de aglomeração, que consiste na formação de aglomerados de fibras quando estas são adicionadas em altas proporções no compósito cimentício, resultando em uma redução da resistência devido ao aumento da porosidade. À medida que a quantidade de fibras incorporadas na matriz aumenta, ocorre uma maior formação de pontes entre as fissuras, o que

resulta em um aumento da resistência. No entanto, altas concentrações de fibras podem levar ao fenômeno de aglomeração. Esses dois efeitos, causados pela adição de fibras, passam a competir entre si e, em determinado momento, resultam em uma diminuição da resistência à tração (PARVEEN et al., 2020).

A seguir, nas Figuras 50 e 51, são apresentadas as superfícies de ruptura de corpos de prova do compósito reforçado apenas com fibras de sisal, nos teores de 0,34 % e 1,12 %, respectivamente. De acordo com as Figuras, é possível observar como a aglomeração das fibras ficou mais evidente no corpo de prova com maior teor de fibras, 1,12 %.

Figura 50 - Corpos de prova com 0,34 % de fibras de sisal



Fonte: Autores (2023)

Figura 51 - Corpos de prova com 1,12 % de fibras de sisal



Fonte: Autores (2023)

Somado tais efeitos descritos acima, outro fator que pode ter impedido o aumento contínuo da resistência à tração foi o índice de consistência, que diminuiu a medida que aumentava-se os teores de fibras de sisal e microcelulose. Quanto maior o teor de fibras e de MCC, menor foi a consistência das argamassas. Isso resultou em maiores dificuldades quando da mistura e da moldagem. Devido a isso, no processo de moldagem, algumas partes dos compósitos com teores elevados podem ter ficado menos compactos, ocasionando o possível aumento da porosidade.

Já para os compósitos reforçados em multiescala, o resultado foi ainda mais expressivo. O aumento da resistência à tração foi mais perceptivo no menor teor contendo MCC, chegando a 74%. No artigo dos autores Parveen et al. (2018), foi possível observar melhoria de até 20,5% de resistência à tração, valor este encontrado em teores que envolviam menor quantidade de MCC, de 0,2 %. Parveen et al. (2020) adicionou tanto fibras de sisal quanto microcelulose em matrizes cimentícias, e percebeu melhoria máxima de 30,1% na resistência à flexão utilizando teores de 0,25% e 0,1% de fibras de sisal e MCC, respectivamente (PARVEEN et al., 2018; PARVEEN et al., 2020).

É possível notar que a resistência à tração na flexão aumentou consideravelmente com a inclusão de microcelulose, principalmente quando inserida em teores menores, 0,5%.

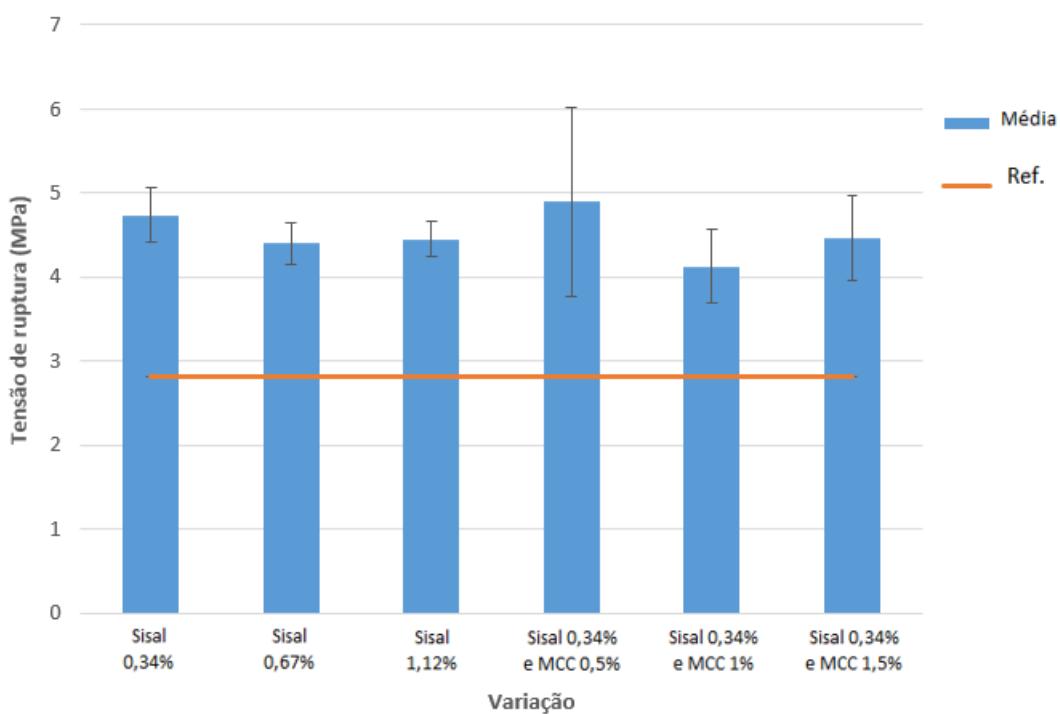
Uma possível razão para tal fato pode ser atribuída às modificações na microestrutura da matriz e o desenvolvimento de reforço na escala micro. Esse efeito de reforço pode ser explicado que, quando adicionado em baixas concentrações, a matriz do compósito pode apresentar um grande número de cristais de MCC individualmente dispersos, sem haver aglomerados significativos. Como resultado, têm-se um aprimoramento do desempenho mecânico devido aos cristais individuais de MCC apresentarem maior área de superfície quando comparados aos aglomerados de MCC, melhor desenvolvimento da transferência de força entre a microcelulose e a matriz do compósito, além de haver tamanho de poro menor por entre toda a matriz (PARVEEN et al., 2018; PARVEEN et al., 2020).

Porém, o que explicaria a diminuição da resistência à tração na flexão, é que, com o aumento da concentração de microcelulose, a quantidade de MCC bem dispersa diminui, passando a existir maior número de aglomerados. Assim, como consequência, existiria uma matriz mais porosa e com desempenho mecânico inferior. Somado a isso, têm-se ainda o efeito de aglomeração das fibras de sisal quando

adicionadas em teores elevados, como já explicado anteriormente (PARVEEN et al., 2018; PARVEEN et al., 2020).

A seguir, a Figura 52 apresenta um gráfico de barras comparando a média da resistência à tração na flexão de cada compósito com a da matriz de referência. É possível observar que os compósitos contendo menor quantidade de fibras de sisal e de microcelulose obtiveram maior resistência à flexão.

Figura 52 - Gráfico de barras comparando os valores médios das resistências à flexão dos compósitos produzidos e da matriz de referência



Fonte: Autores (2023)

#### 4.2.2.2 Resistência à compressão

Conforme os resultados mostrados no Quadro 10, os valores obtidos de resistência à compressão de todos os compósitos reforçados com fibras e com microcelulose foram menores que a da matriz de referência.

Os compósitos reforçados apenas com fibras de sisal tiveram perda proporcional de resistência à compressão conforme aumentava-se o teor de fibras. O percentual máximo observado foi no teor de 1,12 %, com diminuição de 22% de

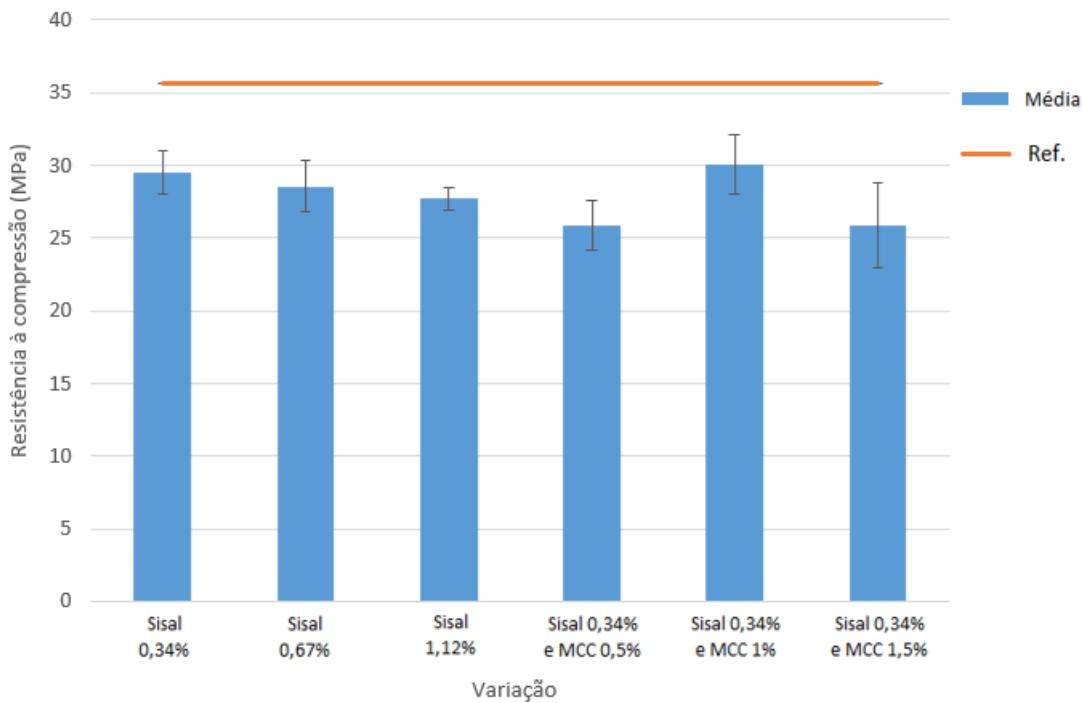
resistência. A variação com menor teor de fibras apresentou perda de 17%. A diminuição de resistência à compressão neste tipo de compósito não é novidade, visto que pode ser encontrado na literatura dados parecidos. Okeola et al. (2018) notaram perda da resistência à compressão em seus compósitos com teores variados de fibras de sisal, entre 0,5% a 2% em massa de cimento. Já Colonetti e Godinho (2017) observaram que quanto maior o teor de fibra, maior a redução da resistência, chegando a 84,9% com teor de 0,6% de fibra (OKEOLA et al., 2018; COLONETTI; GODINHO, 2017).

Contudo, alguns artigos na literatura mostram resultados distintos, como por exemplo, a pesquisa desenvolvida por Beskopylny et al. (2022), que observou aumento de até 22% maiores na resistência à compressão em teores de fibras que chegam até 1,5% (BESKOPYLNY et al., 2022).

As resistências foram ainda menores nas variações produzidas do compósito reforçado em multiescala. Os teores contendo 0,5% e 1,5% de MCC obtiveram redução bem parecida, próximo aos 27%, enquanto que o teor de 1% foi de 15,54%. Porém, artigos científicos na literatura mostram resultados contrários. O artigo dos autores Parveen et al. (2020) apresentaram aumento de 18,4% de resistência à compressão em compósito reforçado em multiescala, enquanto que Parveen et al. (2018) notou aumento de 19,8% de resistência em compósito reforçado com MCC. Já Ferreira (2016) observou aumento de até 33,7% na resistência usando teor de 0,5% de MCC (PARVEEN et al., 2020; PARVEEN et al., 2018; FERREIRA, 2016).

A Figura 53 a seguir, apresenta um gráfico de barras comparando a média dos valores de resistência à compressão de cada variação produzida com o da matriz de referência.

Figura 53 - Gráfico de barras comparando os valores médios das resistências à compressão dos compósitos produzidos e da matriz de referência



Fonte: Autores (2023)

De acordo com a Figura 53, é possível observar que houve uma tendência de diminuição da resistência à compressão comparado com a referência, de modo proporcional conforme a inclusão dos materiais de reforço na matriz, considerando a variação de 1% de MCC como um ponto fora da curva.

Em relação as modificações descritas anteriormente, um motivo que explicaria a diminuição da resistência à compressão, mesmo em pequenas concentrações dos materiais, seria o surgimento de novas zonas interfaciais entre fibra e matriz cimentícia que são naturalmente enfraquecidas quando solicitadas à esforços de compressão. Somado a isso, devido à adição de fibras de sisal por entre a matriz, têm-se a substituição da matriz cimentícia, que é composta por material resistente à compressão, pela fibra de sisal, que é pouco resistente à compressão.

Como consequência do surgimento de novas zonas interfaciais e da substituição de material resistente à compressão por material pouco resistente, o desempenho mecânico passa a ser reduzido devido a menor compacidade, aumento da porosidade e aumento do índice de vazios na matriz cimentícia (PARVEEN et al.,

2020; IZQUIERDO, 2011). Ademais, há o fato das fibras possuírem caráter hidrofílico, podendo levar a redução da hidratação do cimento e prejudicar a consistência do compósito quando inseridas em teores elevados. Assim, pode haver falhas nos corpos de prova durante a moldagem. Portanto, esses fatores podem ter causado a diminuição da resistência à compressão dos compósitos produzidos.

Ao ser incluída numa matriz juntamente com as fibras de sisal, acredita-se que a microcelulose possa melhorar as condições da interface entre fibra e matriz. Isso pode ser atribuído ao fato de que em baixas concentrações a MCC fica bem dispersa por toda a matriz. Também espera-se que a MCC esteja presente em torno das fibras de sisal e passa a ser um forte material de ligação na interface, levando a uma maior formação de produtos de hidratação. Esse conjunto de ações pode reduzir a porosidade ao redor das fibras e, consequentemente, melhorar os contatos entre fibra e matriz (PARVEEN et al., 2018; PARVEEN et al., 2020).

Como visto, mesmo com a adição de microcelulose os resultados de resistência à compressão continuaram diminuindo. Embora o MCC possua caráter hidrofílico semelhante as fibras de sisal, ele pode melhorar a resistência à compressão de matrizes cimentícias se utilizado em concentrações baixas. O aumento da resistência pode acontecer devido aos cristais de MCC estarem bem dispersos sem apresentar aglomeração, reduzindo o tamanho dos poros e causando efeito positivo na microestrutura e densidade da argamassa. Contudo, maiores concentrações de MCC podem resultar em maior aglomeração e, consequentemente, maior índice de vazios, reduzindo a resistência à compressão (PARVEEN et al., 2018; PARVEEN et al., 2020). Para tais afirmações, uma série de ensaios físicos deveriam ser performedos no presente trabalho.

Portanto, mesmo que a microcelulose possa melhorar a resistência à compressão quando incluída em concentração menores e, embora também possua a capacidade de desenvolver melhor interface fibra-matriz em compósitos multiescala, não foi possível observar isso em nossos resultados.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES

Com o intuito de analisar e comparar as propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados em multiescala, foram moldados corpos de prova da matriz de referência e dos compósitos cimentícios com diferentes teores de reforço, sendo estes fibras de sisal e microcelulose. A avaliação das características dos compósitos foi realizada por ensaios de índice de consistência e a partir de ensaios de compressão e de flexão de 3 pontos, ao 28º dia de hidratação dos corpos de prova. Com base nos resultados e análises realizados ao longo do trabalho, foi possível obter as seguintes conclusões.

A inclusão de fibras na escala macro e micro altera a consistência das argamassas. O resultado obtido a partir do ensaio de índice de consistência foi que nenhuma variação produzida foi capaz de aumentar o índice de consistência dos compósitos:

- A adição de fibras de sisal diminuiu a consistência da argamassa de maneira proporcional conforme maior a concentração de fibras. O teor de 0,34 % reduziu em 16% o índice de consistência do compósito, e a variação contendo 1,12 % apresentou redução de 33%.
- Os números se tornaram ainda mais expressivos com a adição de microcelulose juntamente com fibras de sisal, onde foi notada a redução de até 45% do índice de consistência no teor de maior concentração de MCC, 1,5%. Uma possível explicação para tais modificações é devido a capacidade de absorção de água destes materiais naturais por apresentarem propriedades hidrofílicas.

Os reforços utilizados, sisal e microcelulose, provocaram alterações na resistência à tração dos compósitos. Todas as variações produzidas, em seus diversos teores de materiais naturais, aumentaram a resistência à tração quando comparados com a matriz de referência:

- Com a adição das fibras de sisal, foi possível observar que a variação que apresentou resistência à tração máxima foi o teor de 0,34 %, com aumento de

68% de resistência quando comparado com a matriz de referência. Este, por sua vez, foi caracterizado como o teor de dosagem ótima e assim utilizado para a produção dos compósitos reforçados em multiescala. As outras variações contendo fibras de sisal, nos teores de 0,67 e 1,12 %, tiveram aumento percentual de 56% e 58% respectivamente. As modificações nas propriedades mecânicas advindas da adição das fibras podem ser atribuídas devido as fibras formarem pontes entre as fissuras e transferirem as tensões de tração entre si.

- Com a adição da microcelulose juntamente com as fibras de sisal, o aumento da resistência foi ainda mais perceptivo. Na variação contendo menor concentração de MCC, 0,5%, o percentual de aumento da resistência foi de 74%. O menor resultado obtido foi um aumento de 46,43%, com o teor de 1% de MCC. O efeito da adição da microcelulose pode ser explicado devido as modificações na microestrutura da matriz e um possível desenvolvimento de reforço na escala micro.

Para todas as variações produzidas com fibras de sisal e microcelulose, houve uma redução na resistência à compressão:

- Os compósitos reforçados apenas com fibras de sisal apresentaram redução da resistência à compressão conforme aumentava-se o teor de fibras, chegando a um percentual máximo de perda de 22% utilizando teor de 1,12 %. O surgimento de novas zonas interfaciais devido a adição de fibras e a substituição de material resistente à compressão, por material menos resistente à compressão, é o que pode explicar o decréscimo de resistência, além do efeito de aglomeração que maiores teores de fibras podem apresentar.
- Incluída na matriz junto com as fibras de sisal, o efeito causado pela microcelulose foi reduzir ainda mais a resistência à compressão do compósito. Os teores contendo 0,5% e 1,5% de MCC apresentaram redução de 27% da resistência à compressão, enquanto que o teor de 1% apresentou diminuição de 15,54%. Essas modificações observadas devido a utilização da microcelulose podem ser atribuídas pelo efeito de aglomeração dos cristais de MCC quando utilizados em concentrações elevadas.

## 5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como forma de dar prosseguimento ao trabalho desenvolvido no decorrer da elaboração da presente pesquisa, em tópicos a seguir são feitas algumas sugestões para novos trabalhos a serem desenvolvidos futuramente.

- Utilização de quantidade maior de super plastificante para moldagem de compósitos reforçados em multiescala, a fim de facilitar a moldagem dos corpos de prova e possivelmente melhorar a microestrutura da matriz;
- Utilização de teores com menores concentrações de sisal e microcelulose almejando uma gama diferente de resultados;
- Utilização de outro tipo de fibra natural;
- Realização de ensaios físicos para microestrutura, incluindo ensaios de porosidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- \_\_\_\_\_. **NBR 16697.** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 52.** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massaespecífica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 248.** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13279.** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13276.** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes etetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7211.** Agregados para Concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16605.** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

A importância da construção civil para a economia nacional. **CBIC**, 2021. Disponível em: <<https://cbic.org.br/a-importancia-da-construcao-civil-para-a-economianacional/#:~:text=A%20constru%C3%A7%C3%A3o%20civil%2C%20por%20ser,capaz%20de%20proporcionar%20desenvolvimento%20social.>>. Acesso em: 13/06/2023.

DA SILVA, F.; VARGAS BENVEGNÚ, A.; FERNANDES DOS SANTOS, F. **Emissão de CO<sub>2</sub> na Construção Civil.** Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 5, n. 1, 14 fev. 2020.

PAULA, G. M. de. **Economia de baixo carbono: avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnológicas: produção independente de ferro-gusa (“guseiros”): relatório final.** Ribeirão Preto: Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, 2014.

ARDANUY M, CLARAMUNT J, DIAS R, FILHO T. **Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research.** Construction and Building Materials 2015;79: 115–28. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites.** 2.ed. Taylor & Francis, 2007.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto Reforçado Com Fibras.** São Paulo, 2011. Livre Docência - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com Fibras de Aço.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2000, Boletim Técnico.

FIGUEIREDO, A. D. **Os desafios para o uso do concreto reforçado com fibras como material estrutural.** Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto - Ibracon, no. 1, pp. 1–19, 2014.

PEREIRA, E. V. **Influência de Fibras de Aço no Comportamento Mecânico e nos Mecanismos de Fissuração de Concretos Autoadensáveis.** Rio de Janeiro, 2017. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica

PICKERING, K.L.; ARUAN EFENDY, M.G.; LE, T.M. **A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance.** Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 83, pp. 98-112. 2016.

SAVASTANO Jr., H. **Fibras vegetais para construção civil: a fibra de coco,** Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

BERGSTROM, S. G.; GRAM, H. **Durability of alkali-sensitive fibres in concrete.** The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, vol. 6, no. 2, pp. 75–80, 1984.

CASTOLDI, R. S. **Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos reforçados com fibras de polipropileno e sisal.** 2018. Dissertação de mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2018.

TONOLI GHD, SANTOS SF, JR HS, DELVASTO S, GUTIÉRREZ RM DE, LOPEZ MM, et al. **Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition of cementitious roofing tiles reinforced with fique fibre.** Cem Concr Composites 2011; 33:225–32. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.10.013.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 544.1R: State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete.** United States, 2002.

HERAKOVICH CT. **Mechanics of Fibrous Composites.** 1997.

KAW AK. **Mechanics of Composite Materials.** 2 ed. 2006.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials.** 3.ed. McGraw-Hill, 2006.

AUERSVALDT, B. L.; LAY, L. A.; MIRANDA, T. L. **Incorporação de Fibras Vegetais de Bambu ao Concreto em Substituição à Fibras Sintéticas.** In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Ponta Grossa, 2019.

SALVADOR, R. P.; FIGUEIREDO, A. D. Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. **Revista Matéria**, vol. 18, no. 2, pp. 1273– 1285, 2013.

WEI J, MEYER C. **Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites.** Cement Concrete Research 2015;73:1–16. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres>>. Acesso em: 18/05/2023

BENTUR, A., MINDESS, S., **Fibre Reinforced Cementitious Composites.** United Kingdom. Barking, Elsevier. 1990.

JOHNSTON, C. D.: **Fibre-reinforced cement and concrete.** In: V. M. Malhotra. Advances in concrete technology. 2ed.: V. M. Malhotra. p.603-673. Ottawa. 1994.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. **Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview.** Macromolecular Materials and Engineering, vol. 276–277, pp. 1–24, 2000.

Fibra sintética para reforço concreto. **TECMACHINE**, 2011. Disponível em: <<https://www.tecmachinefm.com.br/fibra-sintetica-reforco-concreto>>. Acesso em: 15 de jun. de 2023.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14889-2:** Fibres for concrete - Part 2: Polymer fibres - Definition, specification and conformity. Brussels, 2006.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 10002-1:** Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at ambient temperature. Brussels, 2001.

LÓPEZ-BUENDÍA, A. M.; ROMERO-SÁNCHEZ, M. D.; CLIMENT, V.; GUILLEM, C. Surface treated polypropylene (PP) fibres for reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, vol. 54, pp. 29–35, 2013.

ZHENG, Z.; FELDMAN, D. Synthetic fibre-reinforced concrete. **Progress in Polymer Science**, vol. 20, no. 2, pp. 185–210, 1995.

PANDEY JK, NAGARAJAN V, MOHANTY AK, MISRA M. **Commercial potential and competitiveness of natural fiber composites.** Fourteenth. Elsevier Ltd.; 2015. doi:10.1016/B978-1-78242-373-7.00001-9.

KICINSKA- JAKUBOWSKA A, BOGACZ E, ZIMINIEWSKA M. **Review of Natural Fibers . Part I — Vegetable Fibers.** Journal of Natural Fibers 2012;9:150–67. doi:10.1080/15440478.2012.703370.

ASHBY, M.; SHERCLIFF, H.; CEBON, D. **Materials: Engineering, Science, Processing and Design**. Butterworth-Heinemann, Oxford. 2013.

JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, vol. 71, no. 3, pp. 343–364, 2008.

SILVA, R. V. **Compósito de Resina Poliuretano Derivada de Óleo de Mamona e Fibras Vegetais**. Tese (Doutorado). USP- São Carlos-SP, 2003.

YAN L, KASAL B, HUANG L. **A review of recent research on the use of cellulosic fibres , their fibre fabric reinforced cementitious , geopolymers and polymer composites in civil engineering**. Composites Part B 2016;92:94–132. doi:10.1016/j.compositesb.2016.02.002.

CONAB. **Sisal**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 06/06/2023.  
LADCHUMANANANDASIVAM, R. Apostila - **Ciências dos Polímeros e Engenharia de Fibras I**, Capítulo 2, março, 2005, 39p.

HOLANDA, E. B. N. **A morfologia e as propriedades mecânicas da fibra de sisal unidirecional e em sobreposição de compósito com resina epóxi são tópicos relevantes para o estudo de materiais compósitos**. 2013. Dissertação de mestrado – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

PEREIRA, A. V.; OLIVEIRA, F. M.; MACHADO, T.; G.; MONTEIRO, F. M. **Estudo do potencial das fibras de sisal da macrorregião da Chapada Diamantina – BA para produção de compósitos**, 2016, 14p. 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – IFBA- Instituto Federal da Bahia, 2016.

SANTOS, R. A., BRANDÃO, W. N. Sisal. **EMBRAPA**, 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/territorios/territorio-sisal/atividades-economicas/cultivos/sisal>>. Acesso em: 15/06/2023.

AZWA ZN, YOUSIF BF, MANALO AC, KARUNASENA W. **A review on the degradability of polymeric composites base on natural fibres.** Materials Design 2013;47:424–42. doi:10.1016/j.matdes.2012.11.025.

ZIMMERMANN T, PÖHLER E, GEIGER T. **Cellulose Fibrils for Polymer Reinforcement.** Adv Eng Mater 2004;754–61. doi: 10.1002 /adem.200400097.

DITTENBER DB, GANGARAO HVS. **Critical review of recente publications on use of natural composites in infrastructure.** Composites Part A 2012;43:1419–29. doi:10.1016/j.compositesa.2011.11.019.

JAWAID M, KHALIL HPSA. **Cellulosic / synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites : A review.** Carbohydr Polym 2011;86:1–18. doi:10.1016/j.carbpol.2011.04.043.

KOMURAIAH A, KUMAR NS, PRASAD BD. **Chemical Composition of Natural Fibers and its Influence on Their Mechanical Properties.** Mechanics Composite Materials 2014;50:359–76.

WONG KJ, YOUSIF BF, LOW KO. **The effects of alkali treatment on the interfacial adhesion of bamboo fibres.** Materials Design Applicatios 2010;224:139–48. doi:10.1243/14644207JMDA304.

COLONETTI, L. M.; GODINHO, D. S. S. **Estudo do efeito da adição de fibras de sisal nas propriedades do concreto.** 2017. Monografia – Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2017.

OKEOLA, A. A., ABUODHA, S. O., MWERO, J. **Experimental Investigation of the Physical and Mechanical Properties of Sisal Fiber-Reinforced Concrete.** 2018. Civil Engineering Department, Pan African University Institute for Basic Science. Nairobi, 2018. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-6439/6/3/53>>. Acesso em 18/05/2023.

BESKOPYLNY, A. N. et al. **Enhanced Performance of Concrete Dispersedly Reinforced with Sisal Fibers.** Appl. Sci. 2022, 12, 9102. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app12189102>>. Acesso em 18/05/2023.

FERREIRA, S. P. C. **Desenvolvimento de compósitos cimentícios reforçados por celulose microcristalina.** 2016. Dissertação de mestrado – Universidade do Minho, Braga, 2016.

DUFRESNE, A. Nanocellulose: A new ageless bionanomaterial. **Materials Today**, v. 16, n. 6, p. 220–227, 2013.

XU, X. et al. Cellulose Nanocrystals vs. Cellulose Nano fi brils: A Comparative Study on Their Microstructures and Effects as Polymer Reinforcing Agents. **ACS applied materials & interfaces**, v. 5, p. 2999–3009, 2013.

FU, C. et al. A comparative study on the effects of three nano-materials on the properties of cement-based composites. **Materials**, v. 13, n. 857, 2020.

PARVEEN, S. et al. **Mechanical and micro-structural investigation of multi-scale cementitious composites developed using sisal fibres and microcrystalline cellulose.** Elsevier, University of Huddersfield, Huddersfield, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112912>>. Acesso em 12/06/2023.

PARVEEN, S. et al. **A facile approach of developing micro crystalline cellulose reinforced cementitious composites with improved microstructure and mechanical performance.** University of Minho, Braga, Elsevier, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.07.076>>. Acesso em 14/06/2023.

MAZAHERIPOUR, H.; GHANBARPOUR, S.; MIRMORADI, S. H.; HOSSEINPOUR, I. The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 25, no. 1, pp. 351–358, 2011.

BOULEKBACHE, B.; HAMRAT, M.; CHEMROUK, M.; AMZIANE, S. Flexural behaviour of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading. **Construction and Building Materials**, vol. 126, pp. 253–262, 2016.

ONUAGULUCHI, O.; BANTHIA, N. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. **Cement & Concrete Composites**, vol. 68, pp. 96–108, 2016.

SOUZA, L. O. **Mecanismos de fissuração e autocicatrização de compósitos cimentícios reforçados com tecido de curauá**. 2017. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2017.

DIAZ JPV. **Comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras de pupunha** 2016:148.

FILHO, R. D. T. et al. **Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates**. 2007. Civil Engineering Department, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Elsevier, 2009.

THE EUROPEAN PROJECT GROUP. **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete**. p. 63, 2005.

BASF. **Glenium 51**. Disponível em: <<https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/bASF/glenium%2051.pdf>>. Acesso em 02/06/2023.

SILVA, F. A.; MOBASHER, B.; SORANAKOM, C.; TOLEDO FILHO, R. D. **Effect of fiber shape and morphology on interfacial bond and cracking behaviors of sisal fiber cement based composites**. Cement & Concrete Composites, vol. 33, no. 8, pp. 814–823, 2011.

METHACANON, P.; WEERAWATSOPHON, U.; SUMRANSIN, N.; PRAHSARN, C.; BERGADO, D. T. **Properties and potential application of the selected natural fibers as limited life geotextiles.** *Carbohydrate Polymers*, vol. 82, no. 4, pp. 1090–1096, 2010.

IZQUIERDO, I. S. **Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural.** 2011. Dissertação de mestrado - Departamento de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

TOLEDO FILHO, R. D. **Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: caracterização experimental.** 1997, 93p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

SAVASTANO, H. J. **Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo.** 2000, 7p, 22 p. Tese (Livre-Docência em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.