

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

ANDRÉ FERREIRA DE MORAES

ESTUDOS COMPARATIVOS DE ENSAIOS DE FLEXÃO EM PLACAS  
CIMENTÍCIAS REFORÇADAS COM FIBRAS NATURAIS PARA USO NA  
CONSTRUÇÃO CIVIL

Manaus  
2023

ANDRÉ FERREIRA DE MORAES

ESTUDOS COMPARATIVOS DE ENSAIOS DE FLEXÃO EM PLACAS  
CIMENTÍCIAS REFORÇADAS COM FIBRAS NATURAIS PARA USO NA  
CONSTRUÇÃO CIVIL

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à coordenação do Curso de  
Engenharia Civil da Universidade Federal  
do Amazonas como requisito parcial para  
obtenção do Grau de em Bacharel em  
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho

Manaus  
2023

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

M827e Moraes, André Ferreira de  
Estudos comparativos de ensaios de flexão em placas cimentícias reforçadas com fibras naturais para uso na construção civil / André Ferreira de Moraes . 2023  
64 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: João de Almeida Melo Filho  
TCC de Graduação (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Compósito. 2. Sisal. 3. Curauá. 4. Juta. 5. Ensaio de flexão. I. Melo Filho, João de Almeida. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

## DEDICATÓRIA

Ao Senhor Jesus Cristo, aos meus amados pais e irmãs e minha amada e preciosa esposa.

*“Não a nós Senhor, não a nós, mas ao teu nome dá glória, por amor da tua benignidade e da tua verdade” (Sl 115.1)*



## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, minha gratidão a Deus pelo seu precioso sustento ao longo de todo o curso. Muitas foram as dificuldades, mas em cada momento senti a sua bondosa mão.

Aos meus amados pais, José Ribamar Batista de Moraes e Sara Costa Ferreira que sempre foram a base de minha vida. Com seus preciosos conselhos e incentivos constantes, motivaram-me a continuar persistindo. E as minhas irmãs, Ádria Fernanda Ferreira de Moraes e Amanda Karina Siqueira Pereira pelas palavras de encorajamento, que foram igualmente importantes.

A minha amada esposa, Nayra Olinda de Oliveira Moraes que desde sempre me incentivou, inspirou e apoiou nos momentos mais singulares de minha caminhada acadêmica e que sonha junto comigo.

Aos membros da Igreja Batista Bom Jardim que sempre me motivaram a finalizar o curso e que sempre oraram por mim.

Aos importantes colegas que o curso de engenharia civil me deu, sempre companheiros nos trabalhos, seminários, monitorias e no incentivo mútuo.

Aos queridos professores da Universidade Federal do Amazonas, do curso de Engenharia Civil, que contribuíram em minha formação acadêmica e cidadã.

Ao querido Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho, pelo incentivo e orientação e paciência. Posso dizer que tornou-se ao longo do tempo um amigo do coração, a quem muito prezo.

## RESUMO

O presente trabalho apresenta uma pesquisa comparativa no que se refere ao ensaio de flexão a quatro pontos em compósitos cimentícios reforçados com três tipos de fibras: sisal, curauá e juta. A pesquisa apresentou primeiramente um panorama do uso dos materiais compósitos, assim como as aplicações das fibras naturais, de modo geral, em matrizes cimentícias. Além da descrição das três fibras analisadas, foi também exposto a análise da interação existente entre a fibra e a matriz cimentícia, assim como o comportamento mecânico das matrizes reforçadas com fibras naturais no ensaio de flexão. Em razão de ser uma pesquisa de cunho bibliográfico, foi realizada a descrição de três estudos envolvendo as fibras de sisal, curauá e juta, destacando o tratamento das fibras, a produção da argamassa e do compósito. Em seguida, foi observado os resultados de tensão máxima resistente à flexão e chegou-se a conclusão que os compósitos reforçados com fibras de curauá tratadas com óxido de alumínio e areia, tiveram um melhor desempenho no ensaio de flexão, por consequência da melhor aderência da fibra na matriz, proporcionada pelo tratamento realizado e também por características de alta resistência à tração da própria fibra.

**Palavras chave:** Compósito, Sisal, Curauá, Juta, Ensaio de flexão.

## **ABSTRACT**

The present work presents a comparative research regarding the four-point bending test on cementitious composites reinforced with three types of fibers: sisal, curauá and jute. The research first presented an overview of the use of composite materials, as well as the applications of natural fibers, in general, in cement matrices. In addition to the description of the three fibers analyzed, the analysis of the interaction between the fiber and the cementitious matrix was also presented, as well as the mechanical behavior of matrices reinforced with natural fibers in the flexural test. Due to this being a bibliographical research, three studies were described involving sisal, curauá and jute fibers, highlighting the treatment of the fibers, the production of mortar and the composite. Then, the results of maximum tension resistant to flexion were observed and it was concluded that the composites reinforced with curauá fibers treated with aluminum oxide and sand, had a better performance in the flexion test, as a consequence of the better adhesion of the fiber in the matrix, provided by the treatment carried out and also by the high tensile strength characteristics of the fiber itself.

**Keywords:** Composite, Sisal, Curauá, Juta, Flexural test.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Materiais utilizados na produção de um avião 787.....	18
Figura 02 - Concreto armado .....	18
Figura 03 - Viga reforçada com fibra de carbono.....	19
Figura 04 - Classificação geral das fibras têxteis.....	20
Figura 05 - Classificação das fibras vegetais.....	20
Figura 06 - Tipos de distribuição de reforço fibroso: (a) Fibras curtas distribuídas aleatoriamente, (b) Fibras contínuas unidirecionais e (c) Fibras contínuas bidimensionais.....	23
Figura 07 - Diagrama esquemático do processo de degradação alcalina das fibras vegetais.....	24
Figura 08 - Desenho ilustrativo de compósito reforçado por fibra. (a) Fibra contínua; (b) Fibra descontínua; (c) Fibra descontínua randomicamente orientada.....	25
Figura 09 - A planta do sisal.....	26
Figura 10 - Colheita e desfibramento.....	27
Figura 11 - Secagem.....	27
Figura 12 - Bobinas de Fibra de Sisal.....	28
Figura 13 - Curauá branco e roxo-avermelhado.....	28
Figura 14 - Desfibradora “Tapuia”.....	29
Figura 15 - A planta da Juta (a) e a fibra de juta (b).....	30
Figura 16 - (a) Linhas de tensões no compósito; (b) Distribuição das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz.....	31
Figura 17 - Representação das tensões tangenciais de cisalhamento na interface da fibra-matriz.....	32
Figura 18 - Compósito com fibras de coco. Seta 1: descolamento por diminuição de volume de fibra; Seta 2: fissura que contorna a fibra, atravessando a zona de transição.....	33
Figura 19 - Diagrama carga x deslocamento do corpo de prova sem reforço.....	34

Figura 20 - Diagrama carga x deslocamento do corpo de prova com reforço.....	34
Figura 21 - Fio de sisal 700 usado na pesquisa.....	36
Figura 22 - Tear de pente liso.....	36
Figura 23 - Confecção do tecido de sisal.....	36
Figura 24 - Lavagem e secagem do tecido de sisal, respectivamente.....	37
Figura 25 - Obtenção da massa do tecido de reforço.....	37
Figura 26 - Processos de moldagem: a) Medição da espessura da camada de argamassa; b) Acomodação do tecido de sisal; c) Impregnação do tecido; d) Posicionamento da camada de argamassa; e) Moldagem finalizada.....	39
Figura 27 - Compósitos com três camadas de tecidos (a) e com uma camada de tecido (b).....	40
Figura 28 - Arranjo do corte nas placas e momento do corte, respectivamente.....	40
Figura 29 - Placas depois de cortadas.....	40
Figura 30 - Ensaio de flexão em quatro pontos.....	41
Figura 31 - Processo de separação dos filamentos de curauá: a) Pente metálico; b) Aspecto das fibras antes e após a separação.....	42
Figura 32 - Óxido de alumínio e areia utilizados no tratamento do tecido de curauá	42
Figura 33 - Processo de aplicação do tratamento de óxido de alumínio: a) aplicação do adesivo epóxi; b) pulverização do óxido de alumínio; c) espalhamento do óxido de alumínio.....	43
Figura 34 - Mistura e produção da argamassa.....	44
Figura 35 - Tecido de curauá: a), b) e c) dimensões das camadas de reforço de uma placa para ensaio de tração.....	45
Figura 36 - Molde para confecção dos compósitos e esquema de moldagem.....	46
Figura 37 - Arranjo experimental do ensaio de flexão a quatro pontos.....	46
Figura 38 - Geometria do ensaio de flexão a quatro pontos.....	47
Figura 39 - Equações.....	47
Figura 40 - Configuração dos moldes: desenho esquemático de todas as peças da forma.....	49
Figura 41 - Moldagem das placas: (a) Colocação de uma das camadas de	

argamassa sobre as fibra (b) Espalhamento da argamassa na forma.....	50
Figura 42 - Preparação das placas para ensaios mecânicos: (a) corte das placas, (b) Amostras para ensaio de flexão.....	50
Figura 43 - Ensaio de flexão nos compósitos: início do ensaio de flexão na posição inicial do corpo de prova.....	51
Figura 44 - Ensaio de flexão em quatro pontos. Uma camada de reforço.....	52
Figura 45 - Ensaio de flexão em quatro pontos, Três camadas de reforço.....	53
Figura 46 - Curva tensão versus deflexão das amostras MK40, SCA40, CBC20 e SCA20.....	56
Figura 47 - Curva tensão versus deflexão das amostras MK40, MK_OA e MK_AR..	56
Figura 48 - Curvas dos ensaios de flexão dos compósitos reforçados com juta.....	58
Figura 49 - Curva típica de tensão x deflexão para compósitos reforçados com juta	58
Figura 50 - Gráficos do ensaio de flexão a quatro pontos. (a) Fibra de Sisal; (b) Fibra de Curauá;.....	60
(c) Fibra de Juta.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais.....	22
Tabela 02 - Propriedades mecânicas das fibras naturais.....	22
Tabela 03 - Carga de ruptura à flexão das pastas.....	35
Tabela 04 - Traço da argamassa.....	38
Tabela 05 - Composição da fase dos aglomerantes.....	44
Tabela 06 - Traço da matriz e do compósito produzido.....	49
Tabela 07 - Tipo de tecido e quantidade de camadas nas placas.....	51
Tabela 08 - Comportamento médio das placas quando submetidas a flexão.....	54
Tabela 09 - Resposta dos compósitos à flexão.....	57
Tabela 10 - Resultados médios e coeficientes de variação das propriedades mecânicas obtidas da curvas de tensão x deflexão para os compósitos reforçados com juta (CJ).....	59

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

COSIBRA - Companhia Sisal do Brasil

RCD - Resíduos da Construção Civil

CPV - ARI - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

VMA - Agente Modificador de Viscosidade

SA - Sílica Ativa

ASTM - American Society for Testing and Materials

LVDT - Transformador Diferencial Variável Linear



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1 Objetivos.....	16
1.1.1 Objetivo Geral.....	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	16
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
2.1 Materiais Compósitos.....	16
2.2 Matriz cimentícia e fibras vegetais.....	19
2.2.1 Matriz cimentícia.....	19
2.2.2 Fibras vegetais.....	20
2.2.3 Matrizes cimentícias reforçadas com fibras vegetais.....	22
2.2.4 Compósitos reforçados com fibras contínuas e descontínuas.....	25
2.3 Fibras de sisal, curauá e juta.....	26
2.3.1 A fibra de sisal.....	26
2.3.2 A fibra de curauá.....	28
2.3.3 A fibra de juta.....	29
2.4 Interação Fibra-Matriz.....	30
2.5 Comportamento à flexão de compósitos reforçados com fibras vegetais.....	33
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>35</b>
3.1 A metodologia adotada.....	35
3.2 Pesquisa 1 - Reforço com fibra de sisal.....	35
3.2.1 Produção dos reforços.....	35
3.2.2 Produção da argamassa.....	37
3.2.3 Produção do compósito.....	38
3.2.4 Ensaio de flexão em quatro pontos.....	40
3.3 Pesquisa 2 - Reforço com fibra de curauá.....	41
3.3.1 Produção dos reforços.....	41
3.3.2 Produção da argamassa.....	43

3.3.3	Produção do compósito.....	44
3.3.4	Ensaio a flexão em quatro pontos.....	46
3.4	Pesquisa 3 - Reforço com fibra de juta.....	48
3.4.1	Produção do reforço.....	48
3.4.2	Produção da argamassa.....	48
3.4.4	Ensaio de flexão em quatro pontos.....	50
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>51</b>
4.1	Pesquisa 1 - Resultado de ensaio de flexão em quatro pontos (sisal).....	51
4.2	Pesquisa 2 - Resultado de ensaio de flexão em quatro pontos (curauá).....	55
4.3	Pesquisa 3 - Resultado de ensaio de flexão em quatro pontos (juta).....	57
4.4	Discussão dos resultados.....	59
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES FUTURAS.....</b>	<b>61</b>
5.1	Conclusão.....	61
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	62
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>63</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem se percebido um avanço significativo na área da pesquisa dos materiais no que se refere à produção e investigação dos chamados materiais compósitos. Esse material é uma junção de duas matérias primas distintas, que quando somadas às suas características produzem um composto de qualidades superiores às que lhe deram origem. É preciso destacar que esse procedimento não é algo novo, uma vez que compósitos reforçados com fibras sintéticas, por exemplo, são originárias do século XIX, quando foi produzido o primeiro polímero, o fenol-formaldeído (MELO FILHO, 2012).

A razão pela qual existe o interesse na pesquisa desse tipo de material são as vantagens no sentido da economia e, claro, da performance: Materiais que possuam um baixo custo e ao mesmo tempo propriedades físico-químicas satisfatórias. É evidente que este conceito é de interesse do mercado e considerando o que dizem, o maior mercado dos compósitos são o dos transportes (31%), seguido pela construção civil (19,7%), marinha (12,4%), equipamentos eletroeletrônicos (9,9%) e produtos de consumo (5,8%) (PEIXOTO, 2019).

Nota-se que a construção civil faz parte do segundo maior mercado dos compósitos, e a razão para isso é o interesse no custo benefício. Não há nenhuma dúvida de que esse conceito é uma das filosofias da engenharia civil e há diversas pesquisas que miram a produção de materiais que se adequam a esse conceito. Um tipo de pesquisa, por exemplo, é a utilização de fibras em matrizes cimentícias. Segundo Silva *et.al* (2012):

“A adição de fibras nas matrizes pode melhorar as suas propriedades mecânicas, como a resistência à tração, à flexão e ao impacto. Além disso, altera seu comportamento após fissuração diminuindo os efeitos de uma ruptura brusca da matriz cimentícia.”

Existem diversas fibras que podem ser utilizadas na produção de novos materiais, como por exemplo: fibras de aço, fibras de carbono, fibras de vidro e fibras naturais. Quanto às fibras naturais, existem alguns motivos razoáveis para utilizá-las. Primeiro por uma questão ambiental. Nos últimos anos discussões

referentes ao meio ambiente têm sido de grande destaque e por conta disso tem-se despertado o interesse pelo desenvolvimento das novas tecnologias. De acordo com Pinto *et al.* (2017) materiais que envolvem baixo consumo de energia, são renováveis e biodegradáveis possuem uma maior importância no aspecto da produção.

É importante destacar que apesar das fibras naturais possuírem uma resistência mecânica inferior à das fibras sintéticas é vantajosa no que diz respeito a sua baixa densidade, fonte abundante e de rápida renovação (OLIVEIRA, 2016). No Brasil, existe uma abundância na quantidade dessas fibras, além de serem de fácil produção (OLIVEIRA, 2016). Pode-se destacar que muitas delas têm sido objeto de estudo como a juta, sisal, malva, curauá, coco. Cada uma delas com suas características e possíveis aplicações, inclusive na construção civil. Neste trabalho, utilizou-se das fibras de sisal, curauá e juta em razão de interesses pessoais, além das mesmas possuírem boas resistências à tração.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Realizar uma pesquisa bibliográfica com a intenção de fazer uma análise comparativa dos ensaios de flexão em placas cimentícias reforçadas com fibras de sisal, curauá e juta com a finalidade de aplicá-las para uso na construção civil.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar pesquisas cujas fibras de sisal, curauá e juta foram aplicadas como reforço em placas cimentícias.
- Observar os ensaios de flexão realizados entre as placas pesquisadas a fim de destacar os resultados obtidos.
- Apresentar, após conclusões, sugestões para futuras pesquisas comparativas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1 Materiais Compósitos

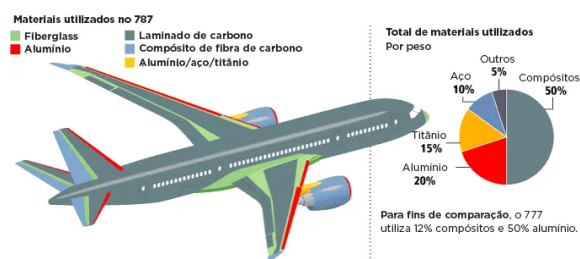
Os materiais compósitos são definidos como um tipo de material que foi originado da junção de duas matérias primas distintas que quando somadas suas melhores características formaram um terceiro material, com atributos superiores àqueles que lhe deram origem. De forma mais técnica, os compósitos constituem-se em uma classe de materiais heterogêneos, poliméricos ou não, em que um dos componentes, descontínuo, dá a principal resistência ao esforço, chamado de reforço e o outro contínuo é o meio de transferência desse reforço, chamado de matriz (MANTOVANI, 2017). Segundo o mesmo autor já citado, quanto aos componentes estruturais e matriciais do compósito, pode-se dizer que:

O componente estrutural ou reforço pode ser um material orgânico ou inorgânico (metálico ou cerâmico), de forma regular ou irregular, fibroso (tecido ou não tecido) ou pulverulento (esférico ou cristalino), com os fragmentos achatados (como flocos) ou como fibras muito curtas, de dimensões quase moleculares. Já o componente matricial ou matriz é quase sempre um polímero orgânico macio ou duro, termoplástico ou termofixo.

Embora pareça que essa tecnologia é recente, sua origem remonta a antiguidade. É documentado que em épocas antigas, os egípcios e Israelitas utilizavam-se de feixes de palha para aumentar a integridade das alvenarias, assim como a produção manual de tecidos moles e fibras de fiação como o algodão para utilização como vestes associados as peles de animais. Essas invenções marcaram o início dos compósitos (VIRINO, 2018).

Apesar de sua antiguidade, os compósitos foram sendo desenvolvidos ao longo das décadas, até que na década de 60, a busca por aeronaves mais leves possibilitou que mais pesquisas fossem realizadas e conseqüentemente a produção de materiais de alto desempenho entraram definitivamente no mercado (VIRINO, 2018). A figura 01 demonstra, por exemplo, os diferentes materiais utilizados para a produção de um avião 787.

Figura 01 - Materiais utilizados na produção de um avião 787



Fonte: Gatron (2018)

No mercado da construção civil não foi diferente. O uso dos materiais compósitos estão mais presentes do que se parece. O concreto em si é um material denominado de “compósito particulado”. Sua fase matriz é o cimento e o reforço são os agregados graúdos e miúdos (CALLISTER, 2002). O concreto armado é outro material compósito, como ilustra a figura 02. O concreto é definido como a matriz de altíssimas resistências à compressão, enquanto que o aço, definido como o reforço, possui elevadas resistências à tração. A junção das melhores características de ambos formam o concreto armado.

Figura 02 - Concreto armado



Fonte: carluc.com.br/materiais de construção (2023)

No que tange ao uso das fibras há também diversas aplicações na construção civil. Quando se refere a fibras sintéticas, já existem estudos e experimentos realizados com fibras de carbono para utilização em reforços estruturais (Figura 03). Em razão de erros de projeto ou mesmo de execução, as peças que constituem a edificação como vigas, pilares e lajes podem contar com fissurações e deformações excessivas que obviamente necessitarão de reforços para contê-las. Fibras de carbono, por exemplo, são os reforços ideais para absorver as tensões presentes nessa situação. (VIRINO, 2018).

Figura 03 - Viga reforçada com fibra de carbono



Fonte:techniques.com.br (2023)

## 2.2 Matriz cimentícia e fibras vegetais

### 2.2.1 Matriz cimentícia

Os componentes básicos para a produção da matriz cimentícia comumente utilizada em compósitos reforçados com fibras vegetais são: cimento Portland, água e agregados miúdos (areia). É possível também o uso de adições minerais como a pozolana e alguns aditivos para modificações de reologia da pasta (superplastificantes) (MELO FILHO, 2012).

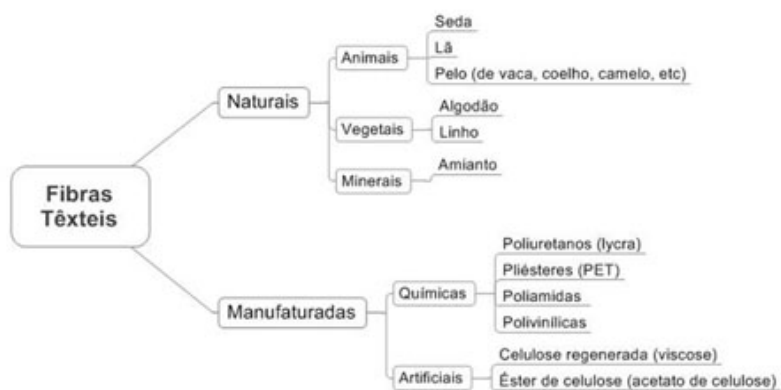
O cimento, em destaque, enquanto atuante na fase contínua do compósito, possui como características: baixo custo, boa durabilidade, elevada resistência à compressão, além de apresentar rigidez condizente com as normas vigentes brasileiras, baixa resistência à tração, ruptura característica frágil e com baixa capacidade característica de deformação (RODRIGUES, 2015).

A realidade é que com tal material é possível a produção de pastas, argamassas, concretos, grautes e outros elementos para uso estrutural ou mesmo pré-fabricados. A versatilidade do cimento explica o seu uso em larga escala, a ponto de existir a expectativa do alcance de 5 bilhões de toneladas/ano em 2050 (TAVARES, 2023).

## 2.2.2 Fibras vegetais

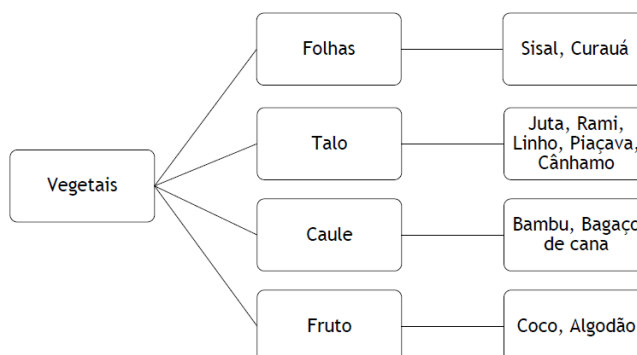
De modo geral, as fibras podem ser definidas como materiais de pequenos diâmetros e de comprimento alongado. A sua classificação é dada de acordo com a sua matéria prima de origem, conforme a figura 04. Existem as fibras que são definidas como manufaturadas e as naturais. As manufaturadas, que podem ser artificiais e sintéticas, tem como matéria prima materiais químicos e as naturais como o nome sugere são advindos da natureza. Portanto, podem ser de origem vegetal (Figura 05), mineral ou mesmo animal (OLIVEIRA, 2016).

Figura 04 - Classificação geral das fibras têxteis



Fonte: e-publicações UERJ (2018)

Figura 05 - Classificação das fibras vegetais



Fonte: (Borges, 2017)



O uso de fibras naturais têm tido um certo destaque, por conta de ser uma material renovável. Além desses, destacam-se o baixo custo, baixa densidade, boa resistência térmica e mecânica, e serem biodegradáveis (FURLAM, 2012). Em questões econômicas, as fibras naturais são mais vantajosas se comparadas às fibras sintéticas. Seu benefício depende diretamente das aplicações utilizadas. Nas ciências aeronáuticas, aeroespaciais, e biomédicas, por exemplo, o desempenho estrutural do material tem maior relevância se comparado ao custo, porém na construção civil, o baixo custo se torna um fator importantíssimo (BORGES, 2017).

Além das questões econômicas, a construção civil tem utilizado as fibras vegetais também por conta do interesse nas "tecnologias verdes", buscando a redução de impactos ao meio ambiente, afinal, a produção de materiais sintéticos exige um elevado uso de energia. Um fator que contribui para o uso desse tipo de tecnologia é o fato do Brasil possuir um grande potencial na produção de recursos naturais, como por exemplo, produtos agrícolas, florestais e resíduos lignocelulósicos, como o bagaço da cana-de-açúcar, palhas de trigo e arroz, cascas de aveia e as aparas de madeira. (PEIXOTO, 2019).

É evidente que a resistência das fibras naturais são inferiores às fibras sintéticas, mas isso não significa que não existam resistências consideráveis. Embora, seja necessário considerar que pelo fato de serem de origem renovável, as variações são acentuadas. Savastano Jr (2000) afirma que as fibras naturais estão na ordem de variação de 40%, como descrito na tabela 01. A tabela 02, também apresenta, de maneira complementar, as propriedades mecânicas das fibras naturais.

Tabela 01 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais

Tipo de fibra	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na ruptura (%)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Sisal	126 - 800	3,8 - 62,0	2,8 - 10	1,27 - 1,5
Coco	95 - 149	2,8 - 13,7	3,3 - 5,1	1,18 - 1,45
Juta	320 - 500	12,0 - 100	1,3 - 2,8	1,5
Malva	160	17,4	5,2	1,41
Rami	393 - 900	7,3 - 25,0	1,8 - 5,3	1,51
Piaçava	143	5,6	5,9	1,05

Fonte: (Borges, 2017)

Tabela 02 - Propriedades mecânicas das fibras naturais

Fibras Vegetais	Autores	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Def. na Ruptura (%)
Curauá	Picanço (2005)	195,00 - 832,50	12,45	3,02
Juta	Picanço e Ghavami (2004)	137,78 - 533,24	-	-
Bagaço-de-cana	Racines (1978)	170,00 - 290,00	15,00 - 19,00	-
	Guimarães (1982)	177,00	4,90	5,11
Bambu	Guimarães (1982)	564,00	28,20	3,22
	Beaudoin (1990)	440,00	37,00	-
Coco	Ghavami (1985)	105,00 - 198,00	2,00 - 6,00	16,00
	Savastano Jr. e Agopyan (1998)	95,00 - 118,00	2,80	23,90 - 51,40
Juta	Chand (1988)	240,00	17,40	1,20
	Beaudoin (1990)	250,00 - 350,00	26,00 - 32,00	1,50 - 2,00
Linho	Coutts (1983)	1000,00	100,00	1,80 - 2,20
Piaçava	Toledo Filho (1990)	50,00 - 90,00	-	4,00 - 6,00
	CEPED (1982)	143,00	5,60	6,00
Sisal	Toledo Filho (1997)	577,50	11,00 - 27,00	2,10 - 4,20
	Ghavami et al. (1999)	580,00	18,00	6,00

Fonte: (Sales, 2015)

### 2.2.3 Matrizes cimentícias reforçadas com fibras vegetais

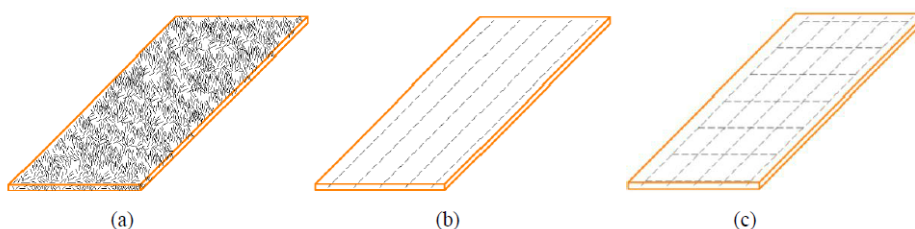
A questão do uso das fibras naturais não é por conta da sua elevada resistência à tração, ou de resistências térmicas, mas ao seu baixo custo de produção. O uso das tecnologias verdes tem sido uma das bandeiras levantadas nos últimos anos em virtude da preocupação com o meio ambiente e a construção adota esse conceito a fim de baratear os custos e não perder na qualidade. Matrizes cimentícias reforçadas com fibras naturais têm sido o objeto de muitas pesquisas, em virtude da baixa resistência à tração e pouca deformabilidade (BORGES, 2017).

No Brasil, a pesquisa pioneira sobre a utilização de fibras naturais em matrizes cimentícias, coube ao Centro de pesquisa e Desenvolvimento (CEPED), Camaçari, Bahia, com início nos anos 80 (OLIVEIRA, 2013). Com tais pesquisas, foi notado que a utilização de fibras vegetais em laminados cimentícios, com baixo módulo de elasticidade e baixa aderência fibra-matriz, possibilitava resultados satisfatórios em relação aos ensaios de tração e flexão, quando comparados com uma matriz cimentícia convencional. (OLIVEIRA, 2013).

Ainda segundo explicado por Oliveira (2013), os compósitos mais produzidos são os de fibras curtas no interior da matriz. Consequentemente, a contribuição nas

propriedades mecânicas pelas fibras é inferior se comparada às longas orientadas perpendicularmente ao carregamento, quando submetidos à flexão. A figura 06 mostra, para fins de ilustração, os diferentes tipos de distribuição de reforço nos compósitos.

Figura 06 - Tipos de distribuição de reforço fibroso: (a) Fibras curtas distribuídas aleatoriamente, (b) Fibras contínuas unidirecionais e (c) Fibras contínuas bidimensionais.



Fonte: (Cabral, 2013)

OLIVEIRA (2013) apresenta que, de modo geral, os elementos cimentícios reforçados com fibras curtas apresentam menores números de fissuras do que os reforçados com fibras longas. Os compósitos reforçados com fibra longa suportam maiores esforços com maior número de fissuras e menor espaçamento de fissuras. Conseqüentemente, a aplicação dessa configuração por última citada em estruturas sujeitas a maiores esforços é fundamental.

As propriedades dos compósitos ditos fibrosos dependem de alguns fatores. De acordo com Oliveira (2013), os fatores são:

- Resistência mecânica do material empregado na fabricação do compósito;
- Característica geométrica da fibra;
- Teor de fibras adicionadas na matriz cimentícia;
- Orientação e distribuição das fibras dentro da matriz cimentícia;
- Dimensão máxima do agregado utilizado para confecção da matriz cimentícia;
- Tensão de aderência entre as fibras e a matriz.

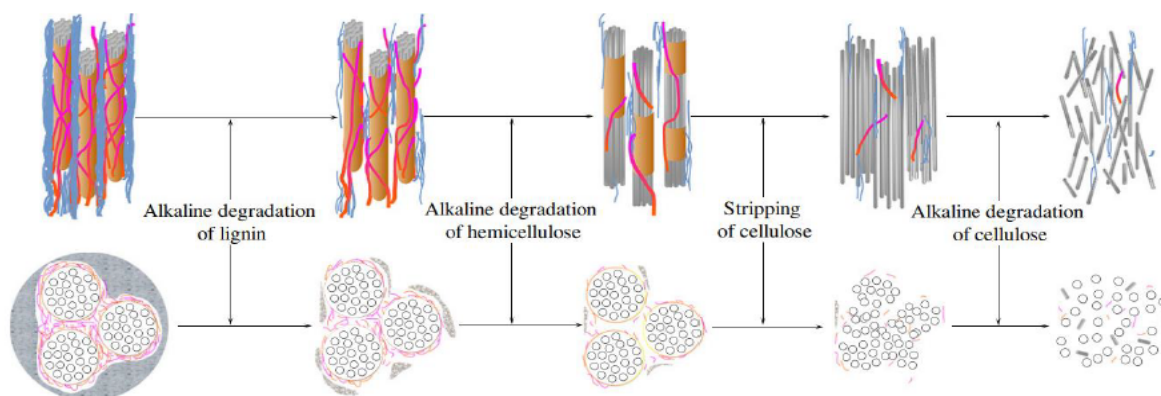
BALAGURU (1989) afirma que quando o compósito fibroso é submetido à esforços de tração ou flexão, resulta em ruptura com o aparecimento de inúmeras microfissuras na estrutura. Quando as fibras interceptam as fissuras, elas atuam

como uma ponte de transferência de tensões. As tensões são transferidas ao longo da superfície da fibra, onde são desenvolvidas tensões de aderência. Ao passo em que as tensões são transferidas às fibras, mais microfissuras surgem na peça.

Apesar da vantagem existente no uso das fibras vegetais, ou naturais, em compósitos cimentícios, TAVARES (2023) aponta duas questões que devem ser consideradas. A primeira é que apesar do crescente número de pesquisas, a produção em escala industrial não é significativa e a razão para tal fato são os custos de adaptação dos processos produtivos (BERALDO, CHEN; AZZINI, 2003). A segunda razão se dá pela incompatibilidade química entre a matriz cimentícia e os constituintes responsáveis pelo reforço, por parte das fibras vegetais, acrescido o alto teor de extrativos das fibras, o que pode ocasionar no retardo do processo de pega, ou no seu impedimento (MACEDO; SOUZA; NETO, 2012).

Ainda nesse contexto, Ardanuy *et al.* (2011) afirma que a médio e longo prazo é observada no compósito a perda de resistência mecânica, em razão das alterações, da composição e das propriedades mecânicas em decorrência das reações químicas que ocorrem na matriz de cimento Portland hidratada. Em adição, Tavares (2023), aponta que a causa da degradação das fibras é a hidrólise alcalina, que provoca uma divisão de cadeia molecular e reduz a polimerização da celulose. A água alcalina presente nos poros da matriz dissolve a lignina e a hemicelulose, quebrando, assim, as ligações entre as fibrocélulas. A figura 07 abaixo ilustra o processo de degradação das fibras vegetais em meios alcalinos.

Figura 07 - Diagrama esquemático do processo de degradação alcalina das fibras vegetais



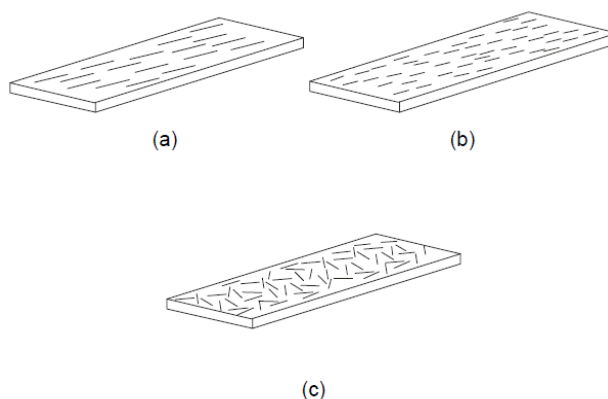
Fonte: (Tavares, 2023 )

#### 2.2.4 Compósitos reforçados com fibras contínuas e descontínuas

Quanto a classificação dos compósitos, são definidos pelo comprimento da fibra. As curtas, também chamadas de descontínuas e as longas, chamadas de contínuas. As fibras descontínuas tem comprimentos menores e resistência mecânica menor do que as fibras contínuas. Segundo Quirino (2010), o arranjo e a concentração da fibra exercem influência sobre a resistência mecânica e outras propriedades de compósitos reforçados por fibra.

Existem duas maneiras de disposição das fibras: o alinhamento paralelo do eixo longitudinal das fibras (Figura 8a e 8b) e um alinhamento randômico (Figura 8c). As fibras contínuas estão geralmente alinhadas enquanto as descontínuas podem ser agrupadas randomicamente orientadas. As fibras contínuas (Figura 08a) tem comprimentos maiores e possui resistência mecânica maior, se comparada às fibras descontínuas (Figura 08b) ou curtas. A ligação interfacial fibra-matriz é excelente e a deformação ocorre igualmente tanto da matriz quanto das fibras, ou seja, uma isodeformação. Nas fibras descontínuas, as tensões apresentam-se de forma heterogênea (QUIRINO, 2010)

Figura 08 - Desenho ilustrativo de compósito reforçado por fibra. (a) Fibra contínua; (b) Fibra descontínua; (c) Fibra descontínua randomicamente orientada.



Fonte: (Quirino, 2010)

## 2.3 Fibras de sisal, curauá e juta

### 2.3.1 A fibra de sisal

O sisal de nome científico *agava sisalana* é uma espécie de planta da família da *Asparagaceae*. É uma planta com uma altura de cerca de 0,9 metros e um diâmetro de caule de cerca de 38 centímetros (Figura 09). O sisal começa a florescer em 4 a 8 anos após o plantio. Suas folhas são de tonalidade cinza a verde escuras em forma de lança, de 0,6 a 1,8 metros (BARBOSA E ALVES, 2020).

Figura 09 - A planta do sisal



Fonte: Embrapa

A produção da fibra de sisal é uma das principais do mundo, sendo cerca de 70% da produção mundial (BARBOSA E ALVES, 2020). No Brasil, alguns estados como Paraíba e Pernambuco são fortes produtores, porém a produção da fibra é predominante no estado da Bahia. A produção chega na margem de 140 mil toneladas ao ano e emprega cerca de 700 mil agricultores familiares. (EMBRAPA, 2021). A planta ainda possui como características: A capacidade de retenção do dióxido de carbono; a proteção do solo contra erosão e retenção por conta de suas raízes radiculares; a possibilidade de cultivo ao longo das margens dos campos de outras culturas. Há um visível potencial futuro para atuação da fibra como um recurso renovável (NEIRA, 2005).

A fibra do sisal para ser produzida, segue alguns processos. A empresa brasileira COSIBRA, situada em Santa Rita, Paraíba, descreve em seu site<sup>1</sup> duas grandes fases no processo de fabricação da fibra de Sisal. Na primeira fase inclui a

---

<sup>1</sup> <https://www.cosibra.com.br/processos.php>. Acesso em 02 de Agosto de 2023

colheita que segundo a empresa leva algo em torno de três anos para o primeiro corte, em seguida vem o desfibramento em que são desfiados cerca de 200 Kg de fibra seca em dez horas de trabalho e trinta folhas por minuto (Figura 10). Ainda na primeira fase, segue a limpeza, seleção e classificação. Nessa última etapa da primeira fase, a fibra é transportada para um tanque a qual permanece imersa por doze horas e após o processo de lavagem são expostas ao sol por dez horas para secagem, conforme a figura 11 apresenta.

Figura 10 - Colheita e desfibramento



Figura 11 - Secagem



Fonte: COSIBRA (2023)

Na segunda etapa da produção da fibra de sisal, uma etapa na fábrica, seguem-se dois processos. O primeiro é chamado de “penteamento e estiragem” em que se faz a produção do fio agrícola do sisal e também a produção do tapete de sisal. Em seguida, é realizado a última etapa que é o processo de fiação e bobinagem. Após o processo iniciado na fazenda e terminado na fábrica, o produto está pronto para a comercialização em bobinas (Figura 12).



Figura 12 - Bobinas de Fibra de Sisal



Fonte: COSIBRA (2023)

### 2.3.2 A fibra de curauá

Segundo Sales (2015), o curauá é uma planta cujo nome científico é *ananas erictipholius* e sua produção é predominante na região amazônica, especificamente na região do Lago Grande do Curuai, no município de Santarém, Estado do Pará. Tecnicamente existem dois tipos de curauá, conforme mostra a figura 13, a de folha roxa-avermelhada, que se desenvolve mais e de folha verde-claro, denominado de curauá branco. O curauá possui um fruto semelhante ao abacaxi, porém mais fibroso e menor e impróprio para o consumo humano (SALES, 2015).

Figura 13 - Curauá branco e roxo-avermelhado



Fonte: (Sales, 2015)

Segundo Sales (2015), a planta de curauá produz algo em torno de 20 a 24 folhas por ano, proporcionando 2Kg de fibra de cada planta e aproximadamente 98 folhas, em cinco anos que é a média do seu ciclo de vida. As máquinas usadas para fazer o desfibramento são exatamente as mesmas usadas para o sisal, chamadas popularmente de “tapuia” (Figura 14), porém por conta do baixo rendimento e grande desperdício, tem sido substituídas por equipamentos mais modernos.



Figura 14 - Desfibradora “Tapuia”



Fonte: (Santos, 2013)

Ainda de acordo com Sales (2015), após o procedimento de desfibramento que envolve a lavagem em tanques com água corrente e secagem em varais e em seguida direcionada para a secagem em estufas, a folha seca é embalada em fardos de até 30 Kg que são destinadas às fábricas e lá são direcionadas aos mais diversos fins, como a indústria automobilística. Não apenas nessa indústria, mas são úteis para fins comuns, como a produção de redes de dormir, cordas, linhas de pesca, cestas e tapetes. A razão do uso é a resistência e a leveza do material (SALES, 2015).

No caso das indústrias automobilísticas, as fibras de curauá servem como reforço nas matrizes de polipropileno. Seu uso específico está na parte interna e nos tetos de automóveis modelo Fox e Pólo da Volkswagen do Brasil (SALES, 2015).

### 2.3.3 A fibra de juta

A juta, também conhecida pelo seu nome científico (*Corchorus capsularis*) é da classe das herbáceas e pode atingir de 3 a 4 metros (Figura 15a). Segundo Quirino (2010), para o plantio da juta é necessário um clima quente e úmido, um solo drenado e fértil. Considera-se que as temperaturas elevadas ajudam na fermentação, facilitando a separação da fibra da parte lenhosa do caule.

De acordo com Quirino (2010), a juta foi introduzida no Brasil por imigrantes japoneses e é considerada uma das principais atividades econômicas das populações ribeirinhas da região amazônica. No entanto, de acordo com Costa Filho et.al (2022) a produção de juta está sob risco, uma vez que os custos para a produção são altos e não possuem os devidos incentivos, inclusive dos poderes

públicos, que poderiam agir no incentivo aos produtores e consumidores. O resultado é um baixo estímulo para a produção da juta.

Apesar disso, a fibra da juta (Figura 15b), juntamente com as demais, é uma das principais fibras vegetais utilizadas como reforço em matrizes poliméricas, ao lado das fibras de algodão, rami e coco. Elas são removidas por meio da ação microbiana que enfraquecem as tramas das fibras, processo denominado de *retting* e em seguida, as fibras são extraídas manualmente e colocadas para secar (QUIRINO, 2010).

Figura 15 - A planta da Juta (a) e a fibra de juta (b)



Fonte: (Quirino, 2010)

## 2.4 Interação Fibra-Matriz

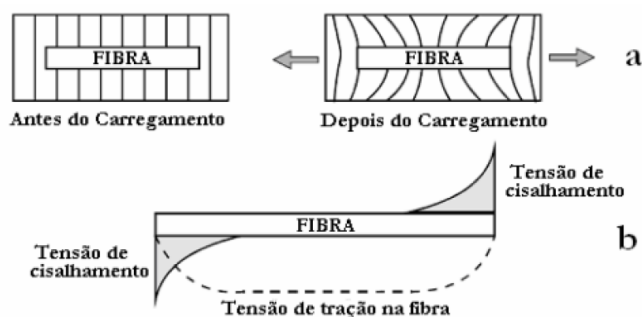
Sabe-se que os concretos convencionais apresentam limitações quando se refere à esforços de tração e por conta disso o seu comportamento fica comprometido em razão das microfissuras na chamada zona de transição (agregado graúdo) que precisam, inclusive, de pouca energia para que a falha no material ocorra (OLIVEIRA, 2023). Na expectativa de minimizar essa deficiência, usa-se reforços, como já exposto neste trabalho.

De acordo com Oliveira (2023), a capacidade de “ligar as fissuras” está diretamente relacionada com o teor de fibras dispersas na mistura, assim como a eficiência da interação fibra-matriz, que tem influência do diâmetro e do comprimento em que a fibra é embebida no compósito, e pela ancoragem da matriz. O compósito, então, terá uma maior absorção de energia influenciada pela fibra e consequentemente maior capacidade de fissuração (FIGUEIREDO, 2011).

Segundo Oliveira (2023), o comportamento do compósito cimentício é controlado pelos processos de transferência de tensão da matriz para as fibras. Em matrizes frágeis, por exemplo, a transferência de tensão é influenciado por fatores como: o comprimento de embebiamento da fibra, capacidade de ancoragem da fibra pela matriz, condição da matriz, condições geométricas do material fibroso como: diâmetro, forma e o teor de fibra que de acordo com Oliveira (2023) podem influenciar diretamente na transferência das tensões do compósito. As figuras 16a e 16b ilustram as linhas de tensão no compósito e a distribuição das tensões de cisalhamento na interface fibra matriz, respectivamente.

É preciso dizer que a transferência de tensão antes da fissuração pode se caracterizar em regime elástico, onde a compatibilidade entre os deslocamentos longitudinais na ligação da fibra com a matriz e as tensões tangenciais desenvolvidas na interface da fibra não são uniformes (BENTUR E MINDESS, 2006).

Figura 16 - (a) Linhas de tensões no compósito; (b) Distribuição das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz.



Fonte: (Oliveira, 2023)

Em complemento, após o surgimento da primeira fissura no material a tensão de atrito é desenvolvida na interface da fibra, sendo assim uniformemente distribuída. Isso traz ao compósito uma capacidade de carga após a falha da matriz. As fibras recebem o carregamento e as transmitem para a matriz. Segundo Oliveira (2023), o mecanismo de transição da tensão elástica para transferência de tensão por atrito ocorre quando a resistência última de aderência entre fibra e matriz ultrapassada ( $T_{au}$ ) não fissura e em seguida, a tensão prevalecte é a tangencial de atrito, onde a máxima a ser aplicada é denominada de ( $T_{fu}$ ), conforme descrita na figura 17.

Figura 17 - Representação das tensões tangenciais de cisalhamento na interface da fibra-matriz.

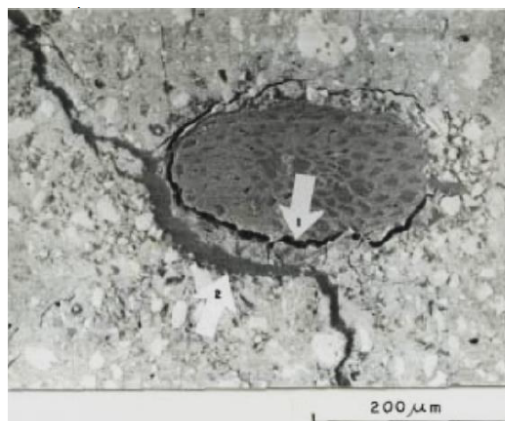


Fonte: (Oliveira, 2023)

Um ponto também a ser considerado é a zona de transição entre a matriz e a pasta de cimento Portland. TAVARES (2023) observou bem que Barnes *et al.* (1978) verificou que a chamada zona de transição interfacial (ZTI) entre a pasta de cimento e adições, como agregados e fibras, possuem características diferenciadas do volume da pasta. No estado fresco é formada uma película de água no entorno dos agregados e fibras (efeito parede), o qual sofre a influência das propriedades físicas da fibra, tais como tensão superficial ou mesmo a capacidade de absorção de água. A maior quantidade de água livre nessa região de interface, eleva a relação água/cimento e conseqüentemente resulta em uma difusão preferencial de alguns íons, como os de cálcio, sódio, potássio, aluminatos e sulfatos (TAVARES, 2023 *apud* BARNES *et al.*, 1978).

As fibras vegetais com absorção elevada de água induzem grande porosidade característica que pode variar entre 50  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ . Ocorre que, também por conta dessa alta absorção, a perda de aderência é observada, diminuindo assim a resistência de aderência e ancoramento das fibras pela interface fibra-matriz (TAVARES, 2023). Observa-se na figura 18, um exemplo que ilustra esta zona de transição e o descolamento por diminuição de volume de fibra no caso de um compósito reforçado com fibras de coco.

Figura 18 - Compósito com fibras de coco. Setas 1: descolamento por diminuição de volume de fibra; Setas 2: fissura que contorna a fibra, atravessando a zona de transição.



Fonte: (Tavares, 2023)

## 2.5 Comportamento à flexão de compósitos reforçados com fibras vegetais

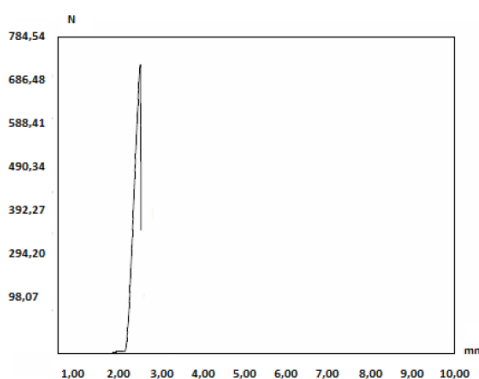
Embora existam diversos ensaios que poderiam ser aplicados nas matrizes com fibras vegetais, esse trabalho se deterá a abordar apenas o comportamento à flexão, que é o objeto de estudo desta pesquisa, em particular.

Segundo SALES (2015), a maioria das aplicações de materiais compósitos com matrizes à base de cimento está sujeita à flexão. Segundo o mesmo autor, a atuação desse tipo de carregamento nas matrizes é marcante depois de atingida a carga de pico, que é correspondente ao início da fissuração da argamassa. Isso significa que a matriz não teria uma ruptura brusca, mas o compósito continuaria a suportar a carga. A presença da fibra muda o modo de ruptura do material e aumenta a sua capacidade de absorver energia (Idem, 2015).

O que é notável é que com a presença das fibras naturais o modo de ruptura da matriz é mudado. A razão é que as fibras em si contribuem para um aumento na capacidade de absorção de energia. Ainda segundo SALES (2015), o uso na matriz cimentícia de fibras longas ou curtas, pode até mesmo ter a sua carga máxima triplicada em relação à carga da primeira fissura. É preciso ainda acrescentar que as matrizes à base de cimento Portland são vantajosas no que diz respeito a resistência à compressão e rigidez, mas baixa capacidade de deformação, sua ruptura é abrupta, e possui baixa resistência a tração. (Sales, 2015 apud Ventura et.al, 2006). Nesse caso, em particular, o uso das barras de aço ou o acréscimo de fibras naturais servem de incremento à resistência a tração.

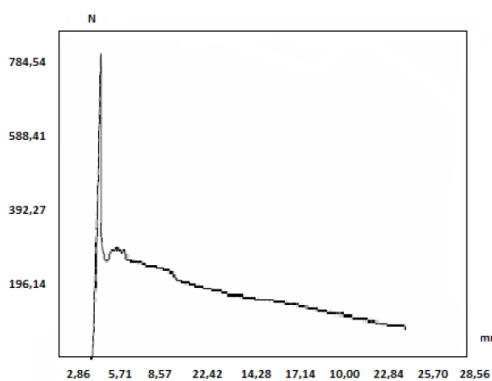
A fim de ilustrar tal descrição, Ventura et. al (2006), apresenta um experimento em que consta a produção de compósitos com fibras curtas de sisal, de 45mm. No estudo foi produzido uma referência, isto é, sem fibras, que obviamente tiveram ruptura frágil, conforme mostrado na figura 19 e um compósito com 1% de fibra, que obteve melhor desempenho por distribuir melhor as tensões e consequentemente proporcionar melhor capacidade de deformação (figura 20).

Figura 19 - Diagrama carga x deslocamento do corpo de prova sem reforço



Fonte: (Ventura *et.al*, 2006)

Figura 20 - Diagrama carga x deslocamento do corpo de prova com reforço



Fonte: (Ventura *et.al*, 2006)

Um segundo experimento apresentado por Carneiro (2010) mostra que a adição de 1% de fibra de coco em pastas produzidas com cimento, metacaulinita, resíduo cerâmico e filler de RCD incrementou em 9,5% a carga de ruptura na flexão da matriz. Houve queda na resistência da matriz 30% e 19,3% para 2% e 3% de fibra, como mostrado na tabela 03.

Tabela 03 - Carga de ruptura à flexão das pastas

MISTURA	CARGA DE RUPTURA (N)- CV (%)
SEM REFORÇO	901,57 (21,37)
1% DE FIBRA	987,20 (42,04)
2% DE FIBRA	631,08 (43,49)
3% DE FIBRA	727,26 (13,79)

Fonte: (Sales, 2015)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 A metodologia adotada

Por se tratar de uma pesquisa de cunho bibliográfico, foram analisados três trabalhos acadêmicos referentes à aplicação de fibras naturais como reforço em matrizes cimentícias. A primeira pesquisa tem como título: “Comportamento a flexão de placas cimentícias reforçadas com tecidos estruturais de sisal”; a segunda: “Estudo da interface de fibras de curauá em diferentes matrizes cimentícias”; e a terceira: “Propriedades mecânicas, físicas e químicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras longas de juta e de malva”.

Das pesquisas citadas, foi analisado principalmente o resultado de cada uma delas no quesito “ensaio de flexão em quatro pontos. Com fins de complementaridade, foram avaliados os compósitos em si, tal como a produção das matrizes e disposição das fibras.

#### 3.2 Pesquisa 1 - Reforço com fibra de sisal

##### 3.2.1 Produção dos reforços

A pesquisa realizada por Oliveira (2016) utilizou-se de fios de sisal de número 700 (Figura 21), a qual posteriormente foram confeccionados manualmente tecidos em um aparelho mecânico próprio para a tecelagem (Figura 22). Segundo a autora, no urdume foi utilizado a linha de algodão e na trama, onde o esforço ocorre, o fio de sisal. (Figura 23).



Figura 21 - Fio de sisal 700 usado na pesquisa



Fonte: (Oliveira, 2016)

Figura 22 - Tear de pente liso



Fonte: (Oliveira, 2016)

Figura 23 - Confeção do tecido de sisal



Fonte: (Oliveira, 2016)

O tecido de sisal então foi lavado em água a 50 °C por 20 minutos, a fim de retirar as impurezas, que poderiam reagir com a matriz cimentícia, impedindo ou retardando a sua cura (OLIVEIRA, 2016). A lavagem do tecido e seu procedimento de secagem à temperatura ambiente de 24h, são demonstrados na figura 24.



Figura 24 - Lavagem e secagem do tecido de sisal, respectivamente



Fonte: (Oliveira, 2016)

O tecido de sisal foi cortado de acordo com as medidas da placa e sua massa medida em balança de precisão (Figura 25).

Figura 25 - Obtenção da massa do tecido de reforço



Fonte: (Oliveira, 2016)

### 3.2.2 Produção da argamassa

Na pesquisa em análise, a argamassa utilizada teve como traço 1:1:2 (CPV-ARI; Sílica ativa; Areia). Todas as massas, CPV-ARI, microssílica, areia, VMA (agente modificador de viscosidade), superplastificante e a água, foram devidamente pesadas em balança de precisão, conforme a Tabela 04.

Tabela 04 - Traço da argamassa

<b>Traço</b>	<b>Massa [g]</b>
CPV-ARI	770,12
Sílica Ativa	770,12
Areia	1540,25
VMA	1,08
Superplastificante	65,71
Água	816,53

Fonte: (Oliveira, 2016)

OLIVEIRA (2016) descreve em sua pesquisa a seguinte sequência que foi tomada:

1. O cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) foi misturado a Sílica ativa (SA), em um saco fechado, até ser impossível visualizar, a olho nu, as diferenças entre eles. Em seguida foi colocada na argamassadeira.
2. O superplastificante foi misturado à água antes de ser colocado na argamassadeira.
3. Quando começou a adicionar a água junto com o superplastificante aos aglomerantes, iniciou-se o cronômetro e a argamassadeira foi ligada na velocidade lenta de  $140 \pm 5$  rpm.
4. A areia foi adicionada durante o primeiro minuto.
5. Ao completar 4 minutos, a argamassadeira foi desligada e com a colher foi possível desmanchar os grumos formados e desgrudar o material das bordas e do fundo.
6. Aos 5 minutos o VMA foi adicionado, em seguida, a argamassadeira foi novamente ligada, na velocidade rápida de  $285 \pm 10$  rpm.
7. Ao completar 10 minutos a argamassa estava pronta para uso.

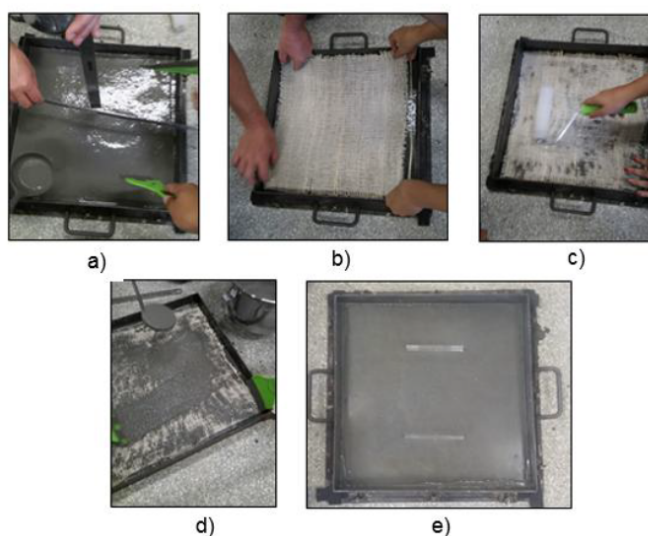
### 3.2.3 Produção do compósito

O molde metálico utilizado na pesquisa possui dimensão de 400mm x 400mm. Nele foi aplicado desmoldante líquido, a fim de facilitar a separação do compósito do molde após a secagem inicial. Quanto a forma de moldagem, Oliveira

(2016) explica que foram moldados dois tipos de compósitos sisal-argamassa, um com uma camada e outro com três camadas de tecido de sisal, sendo intercalados com a argamassa.

As placas tiveram aproximadamente 14 mm de espessura. Para a moldagem, iniciou-se com uma camada de argamassa de 2 mm de espessura sobre o molde metálico, em seguida, acomodando a primeira camada de reforço. A figura 26 demonstra todo o processo de moldagem realizado na pesquisa, desde a medição da espessura da camada de argamassa (Figura 26a), acomodação do tecido de sisal (Figura 26b), impregnação do tecido (Figura 26c), posicionamento da camada de argamassa (Figura 26d) e finalização da moldagem (Figura 26e).

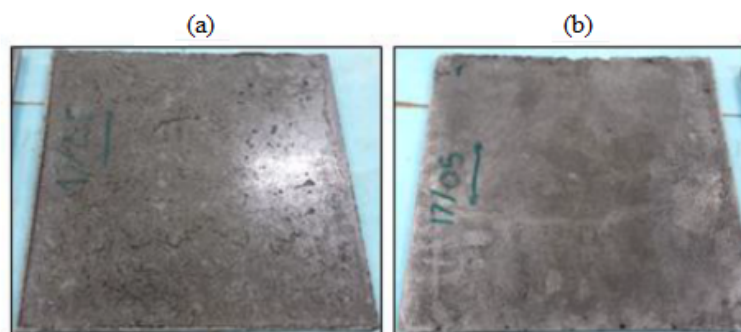
Figura 26 - Processos de moldagem: a) Medição da espessura da camada de argamassa; b) Acomodação do tecido de sisal; c) Impregnação do tecido; d) Posicionamento da camada de argamassa; e) Moldagem finalizada.



Fonte: (Oliveira, 2016)

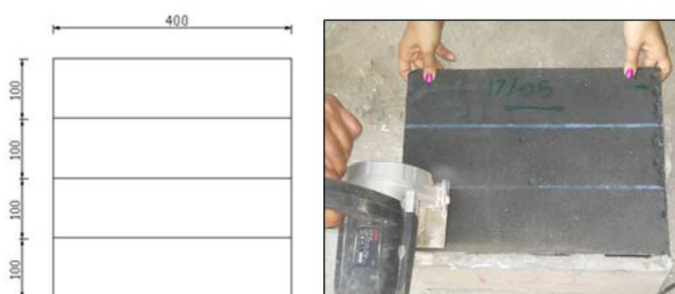
De acordo com Oliveira (2016), após 48 de moldagem, as placas foram retiradas dos moldes (Figura 27) e foram colocadas dentro de um reservatório e submersas em água, para a cura até o 28º dia. Após esse período, elas foram marcadas e cortadas em formato prismático para formar os corpos de prova de dimensões 400 mm x 100 mm (Figura 28 e 29)

Figura 27 - Compósitos com três camadas de tecidos (a) e com uma camada de tecido (b)



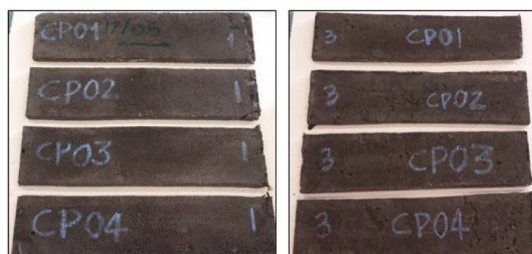
Fonte: (Oliveira, 2016)

Figura 28 - Arranjo do corte nas placas e momento do corte, respectivamente



Fonte: (Oliveira, 2016)

Figura 29 - Placas depois de cortadas



Fonte: (Oliveira, 2016)

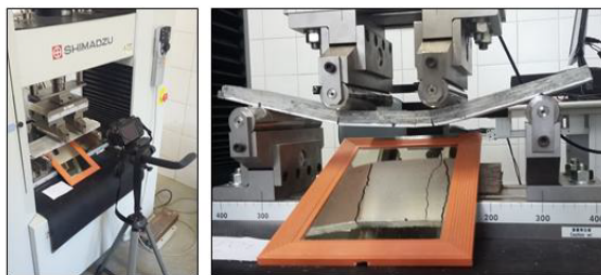
### 3.2.4 Ensaio de flexão em quatro pontos

OLIVEIRA (2016) descreve que após os 28 dias de cura, as placas foram submetidas ao ensaio de flexão em quatro pontos, em conformidade com a norma ASTM D790. Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaio universal estática servo-elétrica modelo Autograph AGS-X, fabricante Shimadzu, com capacidade de carga de 100 KN, acoplada a um microcomputador com software específico Trapesium X. Segundo Oliveira (2016), a velocidade de deslocamento da

ponte da máquina de ensaio universal foi de 0,5 mm/min e a distância entre os pontos de aplicação de carga foi 100mm e entre os apoios foi de 300mm.

Com a finalidade de obter uma maior precisão no ensaio, Oliveira (2016) afirma que foi utilizado um equipamento de nome LVDT (Transformador Diferencial Variável Linear), que permitiu medir a flecha formada na placa.

Figura 30 - Ensaio de flexão em quatro pontos



Fonte: (Oliveira, 2016)

### 3.3 Pesquisa 2 - Reforço com fibra de curauá

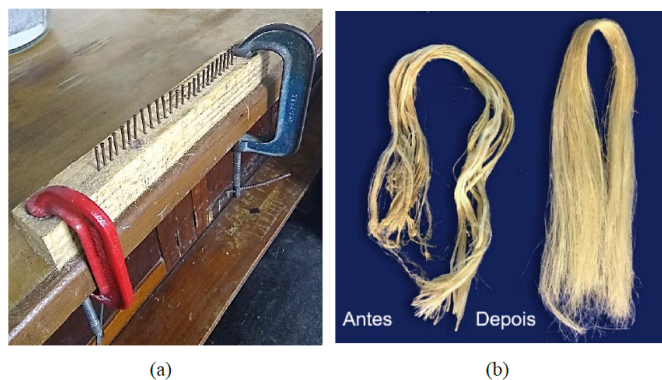
#### 3.3.1 Produção dos reforços

As fibras de curauá utilizadas na pesquisa de Martel (2019) foram fornecidas pelo campo experimental da Tramontina, localizado no município de Aurora do Pará, Pará, onde são realizados diversos estudos sobre a potencialidade de plantios florestais para fins de reflorestamento.

Após a extração das fibras por processos mecânicos, elas foram estiradas em cordas para a secagem ao sol por aproximadamente 48 horas, lavadas para a retirada de impurezas por meio de água quente, com temperaturas variando entre 70 a 80°C durante uma hora. MARTEL (2019) afirma que após esse período, o aquecimento é desligado e, ao atingir a temperatura ambiente, as fibras são retiradas e estiradas em varal para secagem ao ar livre, sem exposição ao sol, por 48 horas.

Segundo Martel (2019), para a produção do tecido para reforço do compósito, é necessário que as fibras passem por um processo manual de separação em um aparato composto por placa de madeira e pregos, que se assemelha a um pente (figura 31), com a finalidade de impedir que as fibras, que possuem pequenos diâmetros se entrelacem facilmente.

Figura 31 - Processo de separação dos filamentos de curauá: a) Pente metálico; b) Aspecto das fibras antes e após a separação

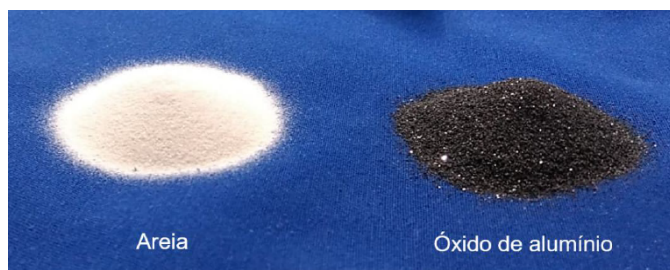


Fonte: (Martel, 2019)

MARTEL (2019) ainda descreve que as fibras de curauá utilizadas na pesquisa receberam um tratamento de óxido de alumínio eletrofundido para abrasivos, nº 50, fornecido pela Zirtec Indústria e Comércio LTDA, São Paulo, além de areia especial britada fina fornecida pela Minérios Lorena, São Paulo (Figura 32). Para a adesão das partículas abrasivas na superfície das fibras foi utilizado o adesivo epóxi Sikadur 32, de média viscosidade, com densidade de 1,5 g/ml, fornecido pela Sika, São Paulo.

Para a aplicação do tratamento, Martel (2019) descreve que as camadas de tecido foram fixas por uma das extremidades, na mesma forma metálica utilizada na confecção dos compósitos, para que após o processo de impregnação, o tecido possua as mesmas dimensões do molde (Figura 33),

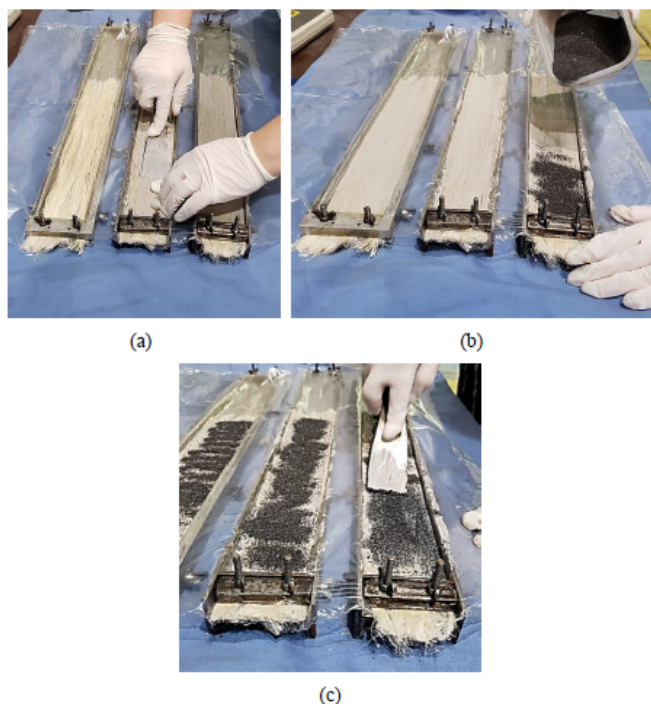
Figura 32 - Óxido de alumínio e areia utilizados no tratamento do tecido de curauá



Fonte: (Martel, 2019)



Figura 33 - Processo de aplicação do tratamento de óxido de alumínio: a) aplicação do adesivo époxi; b) pulverização do óxido de alumínio; c) espalhamento do óxido de alumínio.



Fonte: (Martel, 2019)

### 3.3.2 Produção da argamassa

De acordo com Martel (2019), a matriz de argamassa foi produzida com baixo teor de hidróxido de cálcio aos 28 dias, apresentando uma dosagem 1:1:0,4, em massa, (material cimentício: areia: relação a/c), com 25% de superplastificante Plastol, fornecido pela Viapol, com teor de sólidos de 40%, e substituição parcial em massa de cimento (40% metacaulim e 10% de cinza volante).

No trabalho de Martel (2019), foram produzidas 7 matrizes distintas, variando em relação ao teor de substituição e adição mineral, como especificado na tabela 04. Os teores de substituição de cimento Portland foram ajustados conforme o desempenho mecânico das matrizes e compósitos. A autora ainda coloca que foi fixado o teor de 50% de cimento Portland por pozolana e, desse percentual, 10% é composto por cinzas volantes, que por possuírem um “efeito filler” conferem um melhor empacotamento das partículas, melhorando assim os aspectos reológicos da mistura.

A sílica de arroz, utilizada também na pesquisa de Martel (2019), apresentou plasticidade favorável com teor de 40% e nenhuma segregação, mas, com o intuito

de ter uma margem compatível de comparação entre as matrizes, foi produzido também uma matriz com teor de 20% de SCA, denominanda SCA 20%. Assim, foram confeccionadas versões com teores de substituição de 20% para metacaulim e cinzas volantes, MK20 e FA20, respectivamente. A tabela 05 apresenta a composição da fase dos aglomerantes e a figura 34 a mistura e produção da argamassa.

Tabela 05 - Composição da fase dos aglomerantes

Amostra	Teor de Cimento (%)	Teor de adição (%)	Teor de Cinza Volante (%)	Teor de Superplastificante (%)
CPV	100	-	-	0,25
MK40	50	40	10	2,50
SCA40	50	40	10	0,45
CBC20	70	20	10	0,25
MK20	70	20	10	1,25
SCA20	70	20	10	0,38
FA20	80	-	20	0,14

Fonte: (Martel, 2019)

Figura 34 - Mistura e produção da argamassa



Fonte: (Martel, 2019)

### 3.3.3 Produção do compósito

MARTEL (2019) descreve que a moldagem dos corpos de prova se deu primeiramente pela preparação das camadas de tecido de curauá. As fibras foram devidamente penteadas e cortadas. Para os ensaios de flexão, as dimensões da área da base dos moldes era de 350mm x 60mm.



As camadas de tecido foram imersas em água em temperatura ambiente por duas horas, até ficarem saturadas. A razão era para que, segundo Martel (2019), evitasse que as fibras naturais sem tratamento, que também foram utilizadas na pesquisa, absorvessem a água presente na matriz, e alterassem a relação água/cimento da mesma. Após esse processo, as fibras foram penteadas, ficando assim alinhadas (Figura 35).

Figura 35 - Tecido de curauá: a), b) e c) dimensões das camadas de reforço de uma placa para ensaio de tração.



(a)



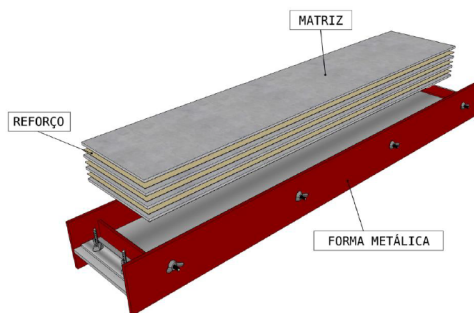
(b)

(c)

Fonte: (Martel, 2019)

Em seguida a esse processo de saturação, os compósitos foram moldados em formas metálicas de 1cm de espessura, previamente untada com desmoldante. O método usado por Martel (2019) foi de intercalação de matriz e tecido, como evidenciado na Figura 36, iniciando e terminando por uma camada de matriz, totalizando 4 camadas de matriz e 3 de tecido. Ao final, os corpos de prova foram envolvidos com plástico filme e uma lâmina de água por 24 horas. Após o desmoldante, foram envolvidos novamente no plástico filme e levados para curar em câmara úmida à temperatura e umidade constantes até o dia anterior ao ensaio. Foram moldados 7 corpos de prova para a amostra de referência e 4 para as amostras com tratamento, resultando em 15 corpos de prova para ensaio de tração e 23 para ensaio de flexão à quatro pontos.

Figura 36 - Molde para confecção dos compósitos e esquema de moldagem

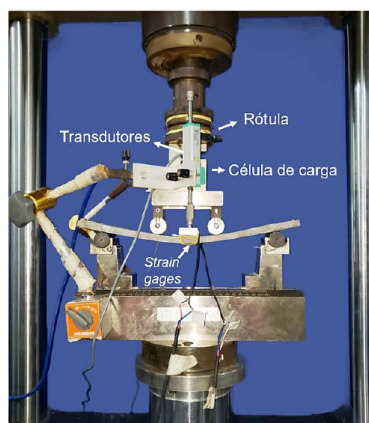


Fonte: (Martel, 2019)

### 3.3.4 Ensaio a flexão em quatro pontos

MARTEL (2019), descreve que os ensaios de flexão a quatro pontos foram realizados em máquina universal de testes MTS, modelo 810/500, com capacidade de 500 KN, aos 28 dias de idade. Com a finalidade de parametrizar a sensibilidade da aquisição de dados do atuador, foi acoplada um sistema de célula de carga de 2,5 KN, e, com o intuito de amenizar qualquer excentricidade entre os pontos de aplicação de carga, foi também inserida uma rótula (Figura 37).

Figura 37 - Arranjo experimental do ensaio de flexão a quatro pontos



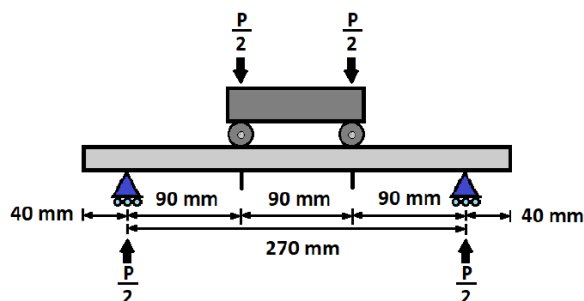
Fonte: (Martel, 2019)

De acordo com Martel (2019), a geometria do arranjo experimental foram baseadas nas recomendações da ASTM C1341 - 13 [104], seguindo a geometria IIB, que consistiu em um sistema de carregamento centralizado, de dois pontos de aplicação de força, igualmente espaçados entre si e entre os pontos de apoio

adjacentes, sendo esses espaços equivalentes a  $\frac{1}{3}$  do comprimento total do vão de 270mm.

As dimensões dos corpos de prova foram de 350 mm x 60 mm x 10 mm (comprimento x largura x espessura). Ainda de acordo com Martel (2019), a deflexão do nó central da amostra foi medida por dois transdutores de deslocamento GEFRAN de curso de 50 mm, posicionados em chapa metálica acoplada transversalmente no meio do vão, um em cada extremidade, como ilustrado na figura 38.

Figura 38 - Geometria do ensaio de flexão a quatro pontos



Fonte: (Martel, 2019)

A partir, então, dos valores obtidos através do ensaio, como a força aplicada e deslocamento dos transdutores, foi possível calcular a tensão ( $\sigma$ ) e a deflexão ( $D$ ) máximas, por meio das equações presentes na figura 39.  $P$  é a força total aplicada;  $L$  é o comprimento do vão;  $b$  e  $d$  são a largura e a espessura do corpo de prova, respectivamente;  $\Delta L_1$  e  $\Delta L_2$  são os deslocamentos dos transdutores.

Figura 39 - Equações

$$\sigma = \frac{PL}{bd^2}$$

$$D = \frac{(\Delta L_1 + \Delta L_2)}{2}$$

Fonte: (Martel, 2019)

### 3.4 Pesquisa 3 - Reforço com fibra de juta

#### 3.4.1 Produção do reforço

As fibras de Juta utilizadas por Oliveira (2013) em seu trabalho de pesquisa foram obtidas na empresa COOPERFIBRAS, localizada a aproximadamente 84 km da cidade de Manaus, no município de Manacapuru, estado do Amazonas, Brasil. Segundo o autor, as fibras são beneficiadas em dois momentos, primeiramente na zona rural pelos trabalhadores (ribeirinhos) e depois nas indústrias locais. Porém, o processo de limpeza consistiu na lavagem e penteamento das fibras. As fibras utilizadas na pesquisa foram obtidas em março de 2011, e o período experimental realizado no período de julho a agosto de 2011.

#### 3.4.2 Produção da argamassa

OLIVEIRA (2013), na seção em que descreve os materiais utilizados em sua pesquisa. O cimento Portland utilizado foi o CP II F-32, que se trata de um cimento composto que tem como adição mineral o filler (calcário moído). A areia utilizada foi uma quartzosa de rio com massa específica de  $2.67 \text{ g/cm}^3$ . Foi utilizada a metacaulinita, fornecida pela empresa METACAULIM do Brasil Indústria e Comércio LTDA. O superplastificante foi do tipo PA (Poliacrilato, Glenium 51), com teor de sólidos de 31,20%, massa específica de  $1.073 \text{ kg/m}^3$  e pH 6.2. A água, era proveniente da rede de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.

Antes de produzir os compósitos, Oliveira (2013) informa que foi buscada uma matriz cimentícia mais adequada e a utilizada em sua pesquisa foi a desenvolvida por Melo Filho (2012), o qual produziu uma matriz livre de hidróxido de cálcio com a substituição de 50% do cimento por metacaulinita obtendo em sua pesquisa bons resultados no quesito durabilidade dos compósitos reforçados com fibra de sisal, além de proporcionar um compósito mais resistente, menos poroso, com menor absorção de água e preservando as propriedades mecânicas das fibras vegetais. Abaixo, na tabela 06, consta o traço utilizado por Oliveira (2013).

Tabela 06 - Traço da matriz e do compósito produzido

Matriz				Compósito
MK (%)	CP (%)	a/mc	SP (%)	Fibras longas
50	50	0,45	2,0	Vf (%)
				8

Onde:

MK –metacaulinita;

SP - Superplastificante;

CP –Cimento Portland;

Vf – volume de fibra adotado na mistura;

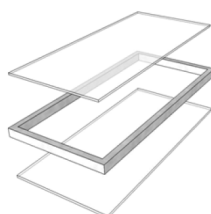
a/mc – fator água/material cimentante;

Fonte: (Oliveira, 2013)

### 3.4.3 Produção do compósito

Para a produção do compósito, Oliveira (2013), depreve que os moldes utilizados tinham as dimensões de 400 x 250 x 150 mm, com fundo e tampa de acrílico, da primeira camada de argamassa que era espalhada no molde com auxílio de uma espátula. Na sequência, foi aplicada sobre a camada de argamassa uma camada de fibra unidirecionalmente no sentido longitudinal e outra de argamassa. Ao final, a placa tinha cinco camadas de fibras e seis camadas de argamassa intercalada com as fibras. Ao final, as amostras foram envolvidas por uma manta úmida para fins de cura até o momento da desforma. A figura 40 apresenta a configuração do molde utilizado, assim como a figura 41 demonstra a moldagem das placas e a figura 42 a preparação das placas para os ensaios mecânicos.

Figura 40 - Configuração dos moldes: desenho esquemático de todas as peças da forma.



Fonte: (Oliveira, 2013 *apud* Ferreira, 2012)

Figura 41 - Moldagem das placas: (a) Colocação de uma das camadas de argamassa sobre as fibra  
(b) Espalhamento da argamassa na forma.



Fonte: (Oliveira, 2013)

Figura 42 - Preparação das placas para ensaios mecânicos: (a) corte das placas, (b) Amostras para ensaio de flexão.



Fonte: (Oliveira, 2013)

Com a desforma realizada, as placas foram encaminhadas a câmara úmida, que tinha temperatura de  $22 \pm 1^\circ\text{C}$  e umidade relativa de 100% e ficaram por 28 dias. Em seguida, Oliveira (2013) descreve que os compósitos foram cortados com o auxílio de uma serra de bancada, resultando em amostras com dimensões de 80x400x12mm (largura, comprimento, espessura) para o ensaio de flexão.

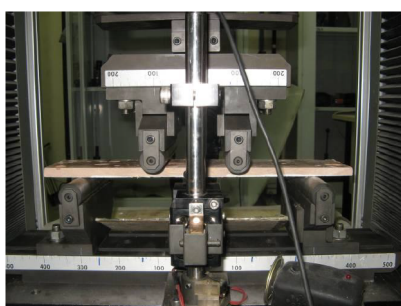
#### 3.4.4 Ensaio de flexão em quatro pontos

OLIVEIRA (2013), descreve que em sua pesquisa, os ensaios de flexão foram realizados em máquina de ensaios mecânicos utilizada para os ensaios de tração direta - Universal Shimadzu, modelo AGX - 100KN, com célula de carga de 100 KN (Figura 43). Neste ensaio, foram realizadas três repetições para cada tipo de reforço fibroso.

O sistema de aquisição de dados, contínuo, foi baseado no programa Trapézio, obtendo-se a carga e a flecha no meio do vão por meio de um LVDT (transdutor de deslocamento variável linear). Segundo Oliveira (2013), os pontos de carga distavam 100 mm e o vão entre apoios distava 300 mm. Os resultados foram

expressos em tensão de tração na flexão. Foram ainda calculados os índices de tenacidade pelo método de RILEM (1984), calculando-se a área sob a curva do gráfico carga x deslocamento até a carga de ruptura e dividindo-se o valor encontrado pela área da seção transversal.

Figura 43 - Ensaio de flexão nos compósitos: início do ensaio de flexão na posição inicial do corpo de prova.



Fonte: (Oliveira, 2013)

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Pesquisa 1 - Resultado de ensaio de flexão em quatro pontos (sisal)

OLIVEIRA (2016), descreve que foram utilizados três corpos de prova para cada um dos dois tipos de placas. As que possuíam apenas uma camada levaram o nome de “1CP” e as com três camadas de tecido, “3CP”. Os tecidos foram confeccionados com Fio 700 e urdume com espaçamento de 2,5 mm. A tabela 07 mostra os tipos de tecido e as quantidades de camadas utilizadas nas placas.

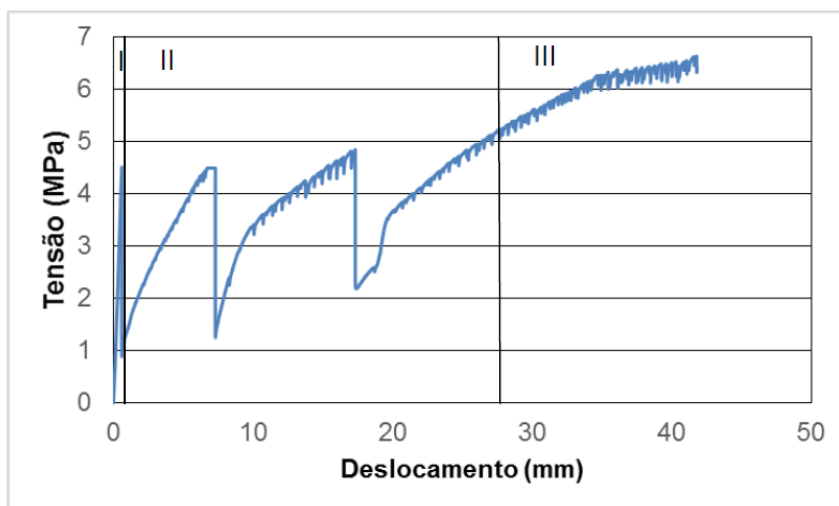
Tabela 07 - Tipo de tecido e quantidade de camadas nas placas

Designação	Espaçamento		Gramatura [g/mm <sup>2</sup> ]	N° de camadas de reforço	Volume de Reforço [%]
	Urdume	Trama			
1 CP	2,5 mm	2,5 mm	0,05	1	2,015 %
3 CP	2,5 mm	2,5 mm	0,05	3	6,063 %

Fonte: (Oliveira, 2016)

A figura 44 mostra uma curva típica de Tensão *versus* Deslocamento do ensaio realizado com uma camada de reforço. OLIVEIRA (2016) mostra que mesmo após o aparecimento da primeira fissura, a placa cimentícia continuou a suportar uma carga cada vez maior. A placa suportou uma tensão de 6,64 MPa no ensaio de flexão.

Figura 44 - Ensaio de flexão em quatro pontos. Uma camada de reforço

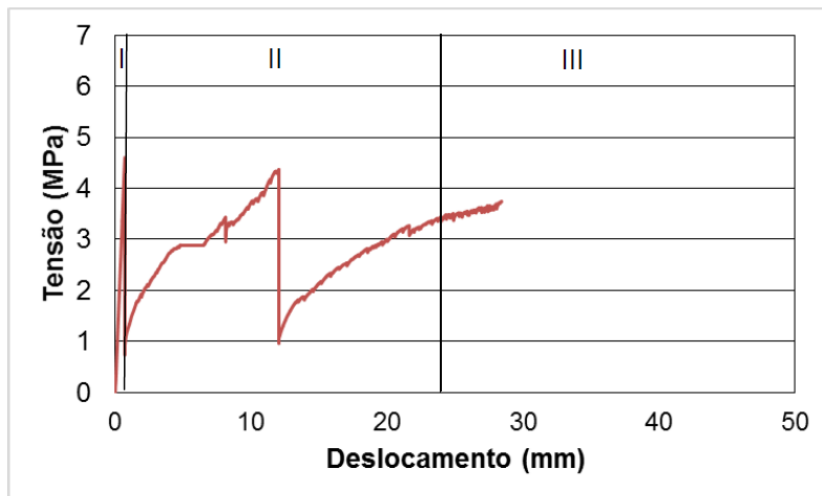


Fonte: (Oliveira, 2016)

Na figura 45, mostra o gráfico de Tensão *versus* Deslocamento do mesmo ensaio realizado em placa com três camadas de reforço. OLIVEIRA( 2016) afirma que mesmo após a o aparecimento da primeira fissura, a placa cimentícia apresentou uma resistência pós-fissuração, porém inferior a tensão crítica. A placa conseguiu suportar uma tensão de 4,06 MPa no ensaio de flexão.



Figura 45 - Ensaio de flexão em quatro pontos, Três camadas de reforço.



Fonte: (Oliveira, 2016)

De acordo com Oliveira (2016), na primeira parte das curvas (I), não há o aparecimento de fissuras visíveis até a matriz atingir a sua capacidade de carga e assim surgir à primeira fissura, provocando uma queda de tensão. Na segunda parte (II) ocorre um aumento da dimensão da fissura até que o reforço suporte cargas adicionais sem que a fissura se propague. Desse modo, a tensão do compósito começa a aumentar até surgir uma nova fissura, provocando novamente uma queda de tensão. Esse ciclo de surgimento de fissuras e combate pelo reforço ocorre diversas vezes. Na terceira parte (III) quase não ocorre abertura de fissuras, porém, ocorreu a propagação da dimensão das fissuras existentes, pois o reforço já não consegue transmitir as tensões para outros pontos da matriz.

OLIVEIRA (2016), apresenta em sua pesquisa os valores do comportamento das placas quando submetidas à flexão (Tabela 08).

Tabela 08 - Comportamento médio das placas quando submetidas a flexão

Placa		Tensão	Tensão	Desloc. na		
		Crítica [MPa]	Máxima [MPa]	Tensão Crítica [mm]	Deslocamento [mm]	Rigidez [GPa]
1CP	Média	4,57	6,47	0,63	50,16	7,37
	D. Padrão	0,07	0,24	0,03	8,28	1,77
	C. V. [%]	1,65	3,69	5,16	16,52	2,40
3CP	Média	4,83	4,83	0,86	39,45	5,90
	D. Padrão	0,32	0,32	0,21	13,09	0,58
	C. V. [%]	6,69	6,69	24,75	33,17	9,83

Fonte: (Oliveira, 2016)

OLIVEIRA (2016), destaca que as médias da tensão crítica e as médias do deslocamento na tensão crítica foram parecidas. A placa com uma camada de reforço obteve a tensão crítica de 4,57 MPa e deslocamento na tensão crítica de 0,63 mm, enquanto a placa com três camadas de reforço obteve tensão crítica de 4,83 MPa e deslocamento na tensão crítica de 0,86mm. De acordo com Oliveira (2016), essa diferença era esperada, pois nessa fase quem suporta a carga é a matriz e ambas as placas tiveram matrizes iguais.

No que se refere a média da tensão máxima, as placas com uma camada obtiveram um valor de 6,47 MPa, que foi superior à média da tensão máxima das placas com três camadas de reforço que foi de 4,83 Mpa. Quando Oliveira (2016) compara a rigidez, observa que o primeiro compósito obteve uma média de 7,37 GPa que foi superior a segunda rigidez de 5,9 GPa do segundo compósito. OLIVEIRA (2016) afirma que, neste caso, especificamente, uma maior quantidade de reforço não resultou em um aumento de desempenho mecânico das placas.

OLIVEIRA (2016) observou que nas placas com menor quantidade de reforço, ocorre em média 4 fissuras com grande espaçamento entre elas. Nas placas com três camadas de reforço, a quantidade de fissuras foi muito maior, em média 8 fissuras, porém com o espaçamento menor entre as mesmas e a espessura destas é pequena. Ainda segundo o autor, o surgimento de novas fissuras indica uma maior interação entre a matriz e o reforço. Quando aparece uma fissura, esta aumenta de dimensão até que o reforço logo consiga impedir de que continue aumentando,

então uma outra fissura aparece em outro lugar e novamente o reforço impede da mesma aumentar de dimensão, e assim o processo se repete.

A conclusão foi que o aumento da quantidade de camadas apresentou uma pequena melhora no desempenho das placas, e o tecido confeccionado teve uma boa impregnação pela matriz, com boa aderência entre as camadas. As placas com três camadas de reforço demonstraram um melhor comportamento, apresentando em média 8 fissuras, enquanto as placas com uma camada apenas de reforço apresentaram uma média de 4 fissuras, ao final do ensaio analisado.

#### 4.2 Pesquisa 2 - Resultado de ensaio de flexão em quatro pontos (curauá)

MARTEL (2019) utilizou em sua pesquisa três camadas de tecido unidirecional de curauá nas placas, denominadas de MK40, SCA40, CBC20 e SCA20. Com a intenção de analisar a influência do tratamento do reforço, a matriz de referência MK40 foi comparada às amostras MK\_OA e MK\_AR.

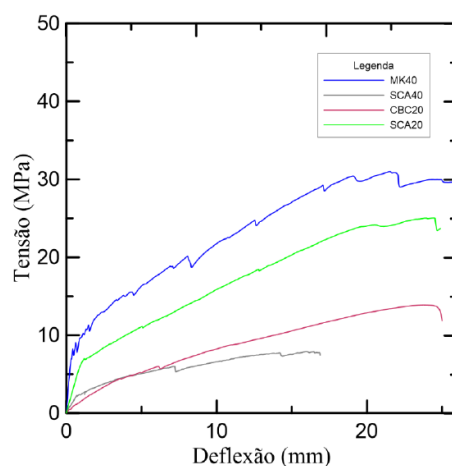
De acordo com Martel (2019), quando descreve os estágios de carregamento dos ensaios de flexão e de tração, afirma que primeiramente tem-se um comportamento elástico-linear do compósito, onde o tecido e matriz trabalham juntos e através de uma aderência integral. Quem governa, nesta zona, são as propriedades da matriz, como o módulo de elasticidade. MARTEL (2019) afirma que o compósito MK40 apresentou maior rigidez na zona linear elástica, seguido do SCA20, SCA40 e CBC20.

Na sequência, observou-se a etapa de propagação de fissuras, culminando com o ponto de saturação de espaçamento entre elas. O reforço então passa a atuar como principal responsável pela terceira zona, até a ruptura do compósito. MARTEL (2019) observou um mecanismo de múltipla fissuração em todos os compósitos e eles apresentaram um comportamento dúctil em todos os ensaios.

Na performance de todos os compósitos na flexão, notou-se que o comportamento *deflection-hardening* foi predominante em todas as amostras. No que se refere a resistência, é possível afirmar que o teor de substituição da sílica da casca de arroz teve alta influência na performance dos compósitos em flexão, sendo as amostras SCA40 e SCA20, as que resultaram em menor e maior valores de resistência à flexão, respectivamente (MARTEL, 2019).

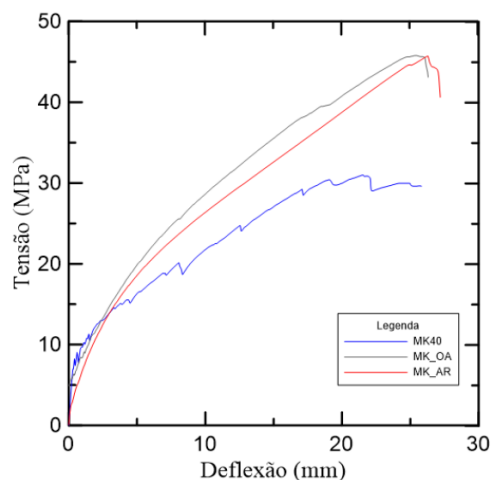
De acordo com Martel (2019), os tratamentos feitos referentes aos reforços das fibras foram efetivos no ganho de resistência e rigidez do compósito. O compósito MK\_OA alcançou a maior resistência entre as três amostras, 65,61 MPa, conferindo um ganho de resistência de 78% em relação ao MK40. No entanto, a tenacidade foi um fator influenciado negativamente pelo tratamento do reforço com óxido de alumínio, com uma perda percentual de aproximadamente 20% em relação à MK40. Abaixo, na figura 46, é demonstrado o resultado do ensaio de flexão das amostras MK40, SCA40, CBC20 e SCA20 e na figura 47 o resultado das amostras MK40, MK\_OA e MK\_AR e os resultados totais na tabela 09.

Figura 46 - Curva tensão *versus* deflexão das amostras MK40, SCA40, CBC20 e SCA20



Fonte: (Martel, 2019)

Figura 47 - Curva tensão *versus* deflexão das amostras MK40, MK\_OA e MK\_AR



Fonte: (Martel, 2019)

Tabela 09 - Resposta dos compósitos à flexão

<b>Amostra</b>	<b>Tensão máx. (MPa)</b>	<b>Deflexão (mm/mm)</b>	<b>Tenacidade (J)</b>
MK40	31,33 (5,46)	48,54 (18,99)	15,68 (0,99)
SCA40	6,68 (1,10)	60,25 (7,73)	2,56 (1,13)
CBC20	10,90 (4,21)	66,18 (10,46)	1,75 (1,01)
SCA20	25,05 (12,96)	53,92 (4,20)	7,69 (4,20)
MK_OA	52,85 (12,76)	34,69 (2,73)	8,73 (4,67)
MK_AR	44,52 (6,82)	49,08 (8,58)	22,64 (4,01)

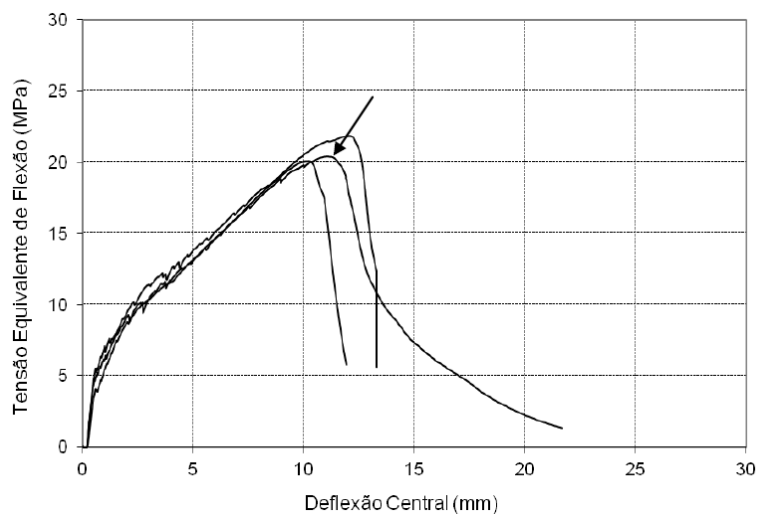
Fonte: (Martel. 2019)

MARTEL (2019), conclui que a fibra de curauá possui propriedades mecânicas e aderência adequadas para reforçar compósitos cimentícios, e os atribuir o comportamento *strain/deflection-hardening* e que modificando a superfície das fibras, foi possível aumentar a aderência fibra-matriz e promover maior rigidez e resistência mecânica aos compósitos. Quanto as matrizes, as que possuíam metacaulim, foram as portadores de melhores características de interface.

#### 4.3 Pesquisa 3 - Resultado de ensaio de flexão em quatro pontos (juta)

OLIVEIRA (2013), apresenta um gráfico como resultado dos ensaios nas matrizes que foram reforçados tanto por juta, quanto por malva. É de interesse dessa pesquisa apenas o comportamento mecânico de compósitos reforçados por juta. A figura 48 demonstra as curvas de ensaio de flexão nas placas reforçadas com juta e a seta indicada no gráfico mostra a curva que foi utilizada para fins de cálculo.

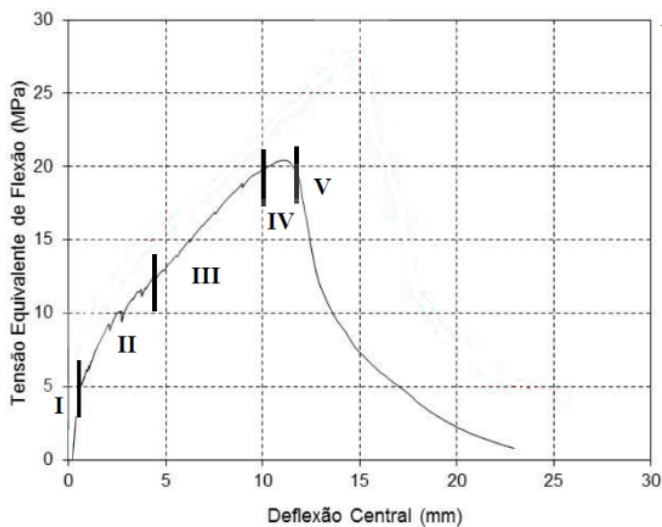
Figura 48 - Curvas dos ensaios de flexão dos compósitos reforçados com juta



Fonte: (Oliveira, 2013)

OLIVEIRA (2013), apresenta ainda em seu trabalho, na figura 49, a análise gráfica da curva escolhida dentre as demais já apresentadas na figura 48.

Figura 49 - Curva típica de tensão x deflexão para compósitos reforçados com juta



Fonte: (Adaptado de Oliveira, 2013)

A região I, corresponde ao trecho onde o material apresenta um comportamento linear elástico. De acordo com Oliveira (2013), nesta área obtém-se a tensão ( $\sigma_{1f}$ ) e deflexão de primeira fissura ( $d_{1f}$ ) e o módulo de elasticidade do compósito ( $E_c$ ), que são dominados pela matriz. A região II inicia-se após o surgimento da primeira fissura sendo caracterizada pela formação de múltiplas fissuras com gradual redução do módulo de elasticidade do compósito. Na região III, a característica é a abertura progressiva das fissuras, com a possibilidade de novas fissuras. OLIVEIRA (2013) acrescenta que a rigidez nessa área denominada rigidez

aparente de endurecimento ( $E_{pf}$ ), é denominada pelo reforço fibroso, visto que a matriz já se encontra multi-fissurada. A região IV, caracterizada pela máxima tensão pós-fissuração, dá início quando a curva formada pelo gráfico de tensão x deflexão apresenta um pronunciado desvio de linearidade e encerra-se quando a capacidade de suporte do compósito ( $\sigma_u$ ) é alcançada. Na última região, a V, há um decaimento rápido da curva tensão x deflexão, com um expressivo aumento das aberturas de fissuras até que uma delas abra de forma predominante até o fim do ensaio.

OLIVEIRA (2013), apresenta os valores médios das propriedades obtidas em cada região estudada com seus respectivos coeficientes de variação, conforme apresenta a tabela 10.

Tabela 10 - Resultados médios e coeficientes de variação das propriedades mecânicas obtidas das curvas de tensão x deflexão para os compósitos reforçados com juta (CJ)

Compósitos	Regiões						
	I			III	IV		
	$\sigma_{1f}$ (MPa) CV (%)	$d_{1f}$ (mm) CV (%)	$E_c$ (GPa) CV (%)	$E_{pf}$ (GPa) CV (%)	$\sigma_u$ (MPa) CV (%)	$D_u$ (mm) CV (%)	$T_{\sigma u}$ (kJ/m <sup>2</sup> ) CV (%)
CJ	4,11 (10,86)	0,40 (11,46)	17,21 (10,68)	2,09 (4,35)	21,23 (5,19)	10,63 (7,77)	6,57 (7,99)

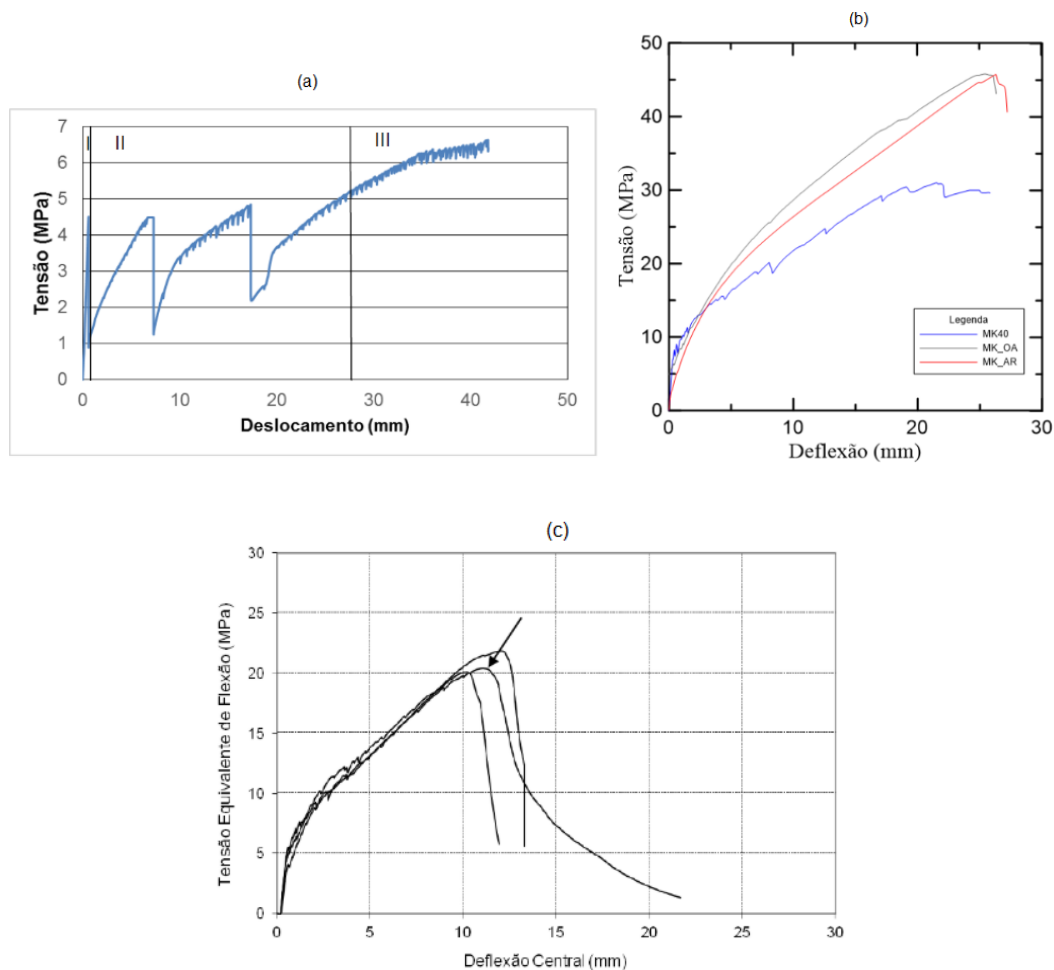
Fonte: (Adaptado de Oliveira, 2013)

OLIVEIRA (2013), então, conclui que no se refere ao comportamento da fibra de juta como reforço, ela atingiu um valor máximo de 21,23 MPa e deflexão de 10,63 mm.

#### 4.4 Discussão dos resultados

Das três pesquisas avaliadas, notou-se que o compósito com fibra de curauá teve o melhor desempenho, seguido dos reforçados com juta e sisal. A figura 50 ilustra os gráficos dos resultados de cada uma dos trabalhos analisados.

Figura 50 - Gráficos do ensaio de flexão a quatro pontos. (a) Fibra de Sisal; (b) Fibra de Curauá; (c) Fibra de Juta



Fonte: (Oliveira, 2016; Martel, 2019; Oliveira, 2013)

Nota-se que a resistência da fibra de sisal à flexão foi a menor dentre as fibras analisadas. A razão pela qual a resistência foi bem inferior as demais se deu por conta da configuração do sisal presente na matriz cimentícia, que estava em fios. TAVARES (2023) em trabalho semelhante, com matriz cimentícia reforçada com três camadas, porém utilizando-se de fibras de sisal em vez de tecido de sisal chegou ao resultado de tensão máxima de 35,76 MPa, enquanto na pesquisa de Oliveira (2016) o resultado foi bem inferior, de 6,47 MPa.

Por outro lado, notou-se que as matrizes reforçadas com fibra de curauá tiveram o maior desempenho no ensaio à flexão, apresentando uma tensão máxima de 65,61 Mpa. A primeira razão para o resultado obtido foi o tratamento recebido pela fibra com óxido de alumínio e areia que proporcionou uma melhor aderência da fibra na matriz, que consequentemente afetou positivamente na rigidez e na



resistência mecânica. Destaca-se também a própria característica da fibra de curauá, que de acordo com a tabela 02, nos ensaios de tração, os resultados enquadram-se entre 195 - 832,50 MPa, uma elevada resistência.

## **5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES FUTURAS**

### **5.1 Conclusão**

Três pesquisas foram analisadas neste trabalho e possuíam em comum o uso de fibras naturais como reforço em matrizes cimentícias. O foco deste trabalho foi avaliar o comportamento mecânico no que diz respeito ao ensaio a flexão em quatro pontos e observou-se que a fibra de curauá foi a que teve um melhor desempenho, seguida da fibra de juta e da de sisal.

Algumas razões levam a crer que o desempenho da fibra de curauá foi superior. Primeiro porque diferente das demais fibras, o curauá foi a única que recebeu um tratamento especial de óxido de alumínio com areia o que melhorou a aderência da fibra na matriz. Segundo porque a própria característica da fibra - que possui altas resistências à tração - levaram o compósito a ter um melhor desempenho no ensaios de flexão.

Quanto a matriz reforçada com sisal, apesar da pesquisa utilizar-se de três camadas de reforço, isso não significou aumento de resistência a flexão, se comparado com demais trabalhos. Ficou evidente que a configuração do sisal, que estava em fios na matriz cimentícia foi fundamental para a baixa resistência à flexão. Quando o reforço está em fios, a matriz acaba por ficar comprometida. A fibra de Juta, no entanto, apesar de não receber nenhum tratamento, assim como a de sisal, obteve uma boa resistência, ficando atrás apenas da fibra de curauá.

Portanto, a conclusão que esta pesquisa chega é que a fibra de curauá, desde que devidamente tratada, traz para o compósito, em termos de resistência à flexão, o melhor desempenho. Tal afirmação leva a crer que as aplicações dessa fibra na construção civil podem ser ainda maiores, uma vez que existem ainda parâmetros a serem pesquisados e comparados com outras fibras.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Algumas possíveis sugestões para trabalhos futuros de cunho comparativo de parâmetros que não foram tratados nesta pesquisa, ou mesmo de pesquisas em laboratório a serem realizadas:

- Comparação entre os ensaios de tração entre as fibras de sisal, curauá e juta.
- Comparação não apenas nos ensaios de flexão, mas também nos de tração nas demais fibras que não foram abordadas nessa pesquisa.
- Avaliar se as fibra naturais, se fossem aplicadas com três camadas teriam um aumento significativo de resistência no ensaio de flexão.
- Avaliar se o tratamento nas fibras com óxido de alumínio e areia elevaria a resistência a flexão dos compósitos com sisal e juta.
- Avaliar quanto o uso de óxido de alumínio e areia vai de encontro ao conceito de “engenharia verde”.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; GARCÍA-HORTAL, J. A.; BARRA, M. **Fiber-Matrix Interactions in Cement Mortar Composites Reinforced with Cellulosic Fibers.** Cellulose, v. 18, p. 281-289, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2014. 238 p.

BALAGURU, P. N., SHAH, S.P., 1992, **Fibre-Reinforced Cement Composites**, McGraw-Hill AMERICAN CONCRETE INSTITUTE Committee 544, 1989, "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concret", (ACI 544.2R-89), American Concrete Institute, Detroit, 11p.

BARBOSA, Carlos Alberto Cunha; ALVES, João Vitor. **Utilização da fibra de sisal no concreto e sua contribuição aos esforços submetidos.** 2020. Disponível em: <https://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/3554.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2023.

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Fibre reinforced cementitious composites.** Crc Press, pág. 31-95, Chapter 3: "Fibre-cement interactions: stress transfer, bond and pull-out", 2006. New York: Elsevier Science Publishers.

BERALDO, A. L.; CHEN, F. H.; AZZINI, A. **Telhas onduladas de bambu-cimento.**, 10 p. In Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis. São Carlos, São Paulo. 2003.

BORGES, Ana Paula Silva Nascentes. **Estudos das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e polipropileno para uso em paredes estruturais.** 2017. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ed. LTC, São Paulo, 2002.

FIGUEIREDO, A. Concreto com Fibras. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. pp. 1328-1365.

FURLAN, L.G. **Avaliação das propriedades de compósitos de polipropileno reforçados com casca de aveia**. Química Nova, v.35, n.8, p.1499-1501, 2012.

MACEDO, A. N.; SOUZA, A. C.; NETO, B. P. **Chapas de cimento madeira com resíduos de indústria madeireira da região Amazônica**. Associação Nacional de Tecnologia de Ambiente Construído. v. 12, p131-150. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2012.

MANTOVANI, Dhyemila de Paula. **Estudo das propriedades mecânicas de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de hemp e biotratamento**. 2017. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos de Goytacazes, 2017.

MARTEL, Wena de Nazaré do Rosário. **Estudo da interface de fibras de curauá em diferentes matrizes cimentícias**. 2019. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

MELO FILHO, João de Almeida. **Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibra de sisal**. 2012. 161 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

NEIRA, Dorivalda Santos Medeiros. **Fibras de Sisal (Agave sisalana) como Isolante Térmico de Tubulações**. 2005, p. 80. Dissertação de Mestrado – Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.

Disponível em:  
<<https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15545/1/DorivaldaSMN.pdf>>.  
Acesso em: 02 ago. 2023.

OLIVEIRA, Marina Rodrigues de Souza. **Comportamento a flexão de placas cimentícias reforçadas com tecidos estruturais de sisal**. 2016. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2016.

OLIVEIRA, Jacson Soares. **Avaliação do tratamento de fibras curtas de sisal em matriz cimentícia**. 2023. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2023.

OLIVEIRA, Igor Roberto Cabral. **Propriedades mecânicas, físicas e químicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras longas de juta e de malva**. 2013. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.

PINTO, Maria V.S *et al.* Resistência ao impacto de compósitos de tecido de juta/algodão reforçando matriz poliéster via RTM (Resin Transfer Molding). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 14., 2017, Águas de Lindóia. **Anais [...]** . Águas de Lindóia: UFRGS, 2017. p. 2254-2258.

PEIXOTO, Daniel Lourenço. **Tipos de materiais compósitos**. 2019. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

QUIRINO, Magnólia Grangeiro. **Estudo de matriz polimérica produzida com resina natural e fibra da semente de açaí (Euterpe precatória)**. 2010. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2010.

RODRIGUES, F. A. **Estudo da influência de diferentes tratamentos (fibra/matriz) nas propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com fibra**

**de malva.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Amazonas, Manaus, 2015.

SALES, Cíntia Gama. **Fibra de curauá como reforço em matriz cimentícia para fabricação de telhas e placas de fibrocimento.** 2015. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

SAVASTANO Jr., H. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo.** Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000.

SILVA, Everton *et al.* **Aplicação de fibra de coco em matrizes cimentícias.** 2012. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/reget/index>. Acesso em: 02 ago. 2023.

TAVARES, Tony Victor Pereira. **Avaliação mecânica e da interface fibra-matriz de compósitos cimentícios e reforçados com fibras vegetais.** 2023. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2023.

VENTURA, O. S. P; PASSOS, O. S; LOBO J. B. A; FUJIYAMA, R.T. **Caracterização mecânica em flexão de compósito de argamassa de cimento reforçada por fibras naturais.** 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil

VIRINO, Francisco Paulo Serpa. **Materiais compósitos na indústria da construção civil.** 2018. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.