

## **Compósitos de fibrocimento reforçados com fibras de malva e juta produzidas na região amazônica - Efeito nas propriedades mecânicas à tração direta**

*Fiber-cement composites reinforced with mallow and jute fibers produced in the Amazonian region - Effect on mechanical properties at direct tensile*

**Igor Roberto Cabral Oliveira, Doutorando, UEL.**

igoroliveira@ufam.edu.br

**Raimundo Pereira de Vasconcelos, Dr., UFAM.**

vasconcelos@ufam.edu.br

**João de Almeida Melo Filho, Dr., UFAM.**

jalmeida26179@gmail.com

**Berenice Martins Toralles, Dra., UEL.**

toralles@uel.br

### **Resumo**

Na tendência da sustentabilidade da construção civil, os compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais lignocelulósicas traz benefícios econômicos e socioambientais. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento mecânica a tração direta de fibras contínuas (longas) unidirecionais de malva (*Urena lobata* L.) e juta (*Corchorus capsularis* L.) em compósitos alternativos de fibrocimento. Através do método narrativo, a pesquisa baseou-se em estudos com compósitos cimentícios com comportamento de endurecimento por deformação, reforçados com fibras naturais lignocelulósicas em argamassas modificadas com materiais pozolânicos. Para o desenvolvimento dos biocompósitos e garantia da durabilidade, substitui parcialmente o cimento Portland CP II F-32 por metacaulim, conforme pesquisas de Silva *et al.* (2010) e Melo Filho (2012). Os resultados indicam que os biocompósitos com fibras de malva e juta apresentaram múltipla fissuração, com tensões últimas de 10,34 MPa e 7,96 MPa, respectivamente. Conclui-se a viabilidade da aplicação de fibras de malva e juta em biocompósitos cimentícios alternativos, para fins semiestruturais e estruturais, sujeitos à tração direta.

**Palavras-chave:** Fibras; Naturais; Propriedades; Compósitos; Argamassa

### **Abstract**

*Em ingl*In the trend of sustainability in civil construction, cement composites reinforced with natural lignocellulosic fibers bring economic and socio-environmental benefits. In this context, the objective of this research is to analyze the mechanical behavior under direct tension of continuous (long) unidirectional fibers of mallow (*Urena lobata* L.) and jute (*Corchorus capsularis* L.) in alternative fiber cement composites. Through the narrative method, the research was based on studies with cement composites with deformation-hardening behavior (SHCC), reinforced with natural lignocellulosic fibers in mortars modified with pozzolanic materials. For the development of biocomposites and guarantee of durability, it partially replaces Portland cement CP II F-32 with metakaolin, according to research by Silva et al. (2010) and Melo Filho (2012). The results indicate that the mallow and jute fiber biocomposites showed multiple cracking, with ultimate stresses of 10.34 MPa and 7.96 MPa, respectively. The feasibility of applying mallow and jute fibers in alternative cementitious biocomposites, for semi-structural and structural purposes, subject to direct traction, is concluded.

**Keywords:** *Fibers; Natural; Properties; Composites; Mortar*

## 1. Introdução

Visando a sustentabilidade da construção, país como a China por exemplo, estabeleceu metas para o desenvolvimento de suas edificações buscando tornar os materiais constituintes de painéis, paredes, telhados, portas e janelas de suas edificações mais sustentáveis (SUN; MA; ZHOU, 2015). Neste contexto, estão inclusos os compósitos cimentícios reforçados com fibras de alto desempenho (HPFRCC) e os compósitos cimentícios com comportamento de endurecimento por deformação (SHCC), termos derivados de *Fiber-Reinforced Composite - FRC* (NAAMAN; REINHARDT, 2003). Dentre as fibras utilizadas nestes compósitos estão as fibras naturais lignocelulósicas, consideradas mais sustentáveis que as fibras sintéticas ou artificiais (ZUKOWSKI; DE ANDRADE SILVA; TOLEDO FILHO, 2018).

Pertencentes as fibras lignocelulósicas obtidas através do caule de plantas, as fibras de malva (*Urena Lobata L*) e juta (*Corchorus capsularis*), são consideradas fundamentais para a economia agrícola da região Amazônica, sobretudo no Amazonas e Pará, assumindo relevância na geração de renda, na fixação do homem no campo e na criação de novos empregos em processos de comercialização e industrialização.

No ano de 2020, o Brasil produziu 5513 toneladas de fibras de juta e malva (IBGE, 2021). Nesta produção são gerados resíduos como talos, estopas e cardas, sendo estas últimas, utilizadas na indústria da construção civil, como reforço em forros de gessos.

Para evitar a degradação das fibras lignocelulósicas na matriz cimentícia, foram pesquisados pré-tratamentos com as fibras (FERREIRA *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2017), tratamentos com matrizes (SILVA *et al.*, 2010; TOLEDO FILHO *et al.*, 2009) e tratamentos com os compósitos (DOS SANTOS *et al.*, 2019). A modificação parcial do cimento por materiais pozolânicos é um tratamento com matrizes cimentícias e auxilia no consumo do hidróxido de cálcio que mineraliza as paredes celulares destas fibras (WEI; MEYER, 2015).

Dentre os potenciais materiais pozolânicos, a metacaulim apresenta-se como mineral financeiro no Brasil. Na região Amazônica estão localizadas as maiores reservas nacionais de metacaulim (BARBOSA, 2019). Muitas pesquisas têm utilizado a metacaulim como material cimentício suplementar pozolânico (LIMA; TOLEDO FILHO; MELO FILHO, 2013; MELO FILHO, 2012; SILVA *et al.*, 2010; ZUKOWSKI; DE ANDRADE SILVA; TOLEDO FILHO, 2018).

Portanto, neste contexto, o presente estudo teve como objetivo, avaliar o comportamento a tração a direta de compósitos cimentícios de fibrocimento reforçados com fibras contínuas de malva e juta, substituindo parcialmente o cimento Portland por metacaulim. A próxima etapa, através do método narrativo, verificou-se pesquisas relacionadas aos compósitos cimentícios reforçados com fibras lignocelulósicas contínuas de alto desempenho com comportamento de endurecimento por deformação, que utilizassem a metacaulim como material cimentício suplementar.

## 2. Referencial Teórico

Compósitos cimentícios SHCC apresentam o comportamento de endurecimento por deformação, resistência, tenacidade, absorção de energia e rigidez geralmente acompanhados por múltiplas fissuras, podendo ser aplicados em diversos elementos estruturais e semiestruturais, tais como vigas, pilares, lajes, formas para estruturas de concreto (LIMA *et al.*,

2018), placas de piso, reforços e telhas (ZUKOWSKI; DE ANDRADE SILVA; TOLEDO FILHO, 2018).

Dentre os reforços adotados, as fibras naturais lignocelulósicas (sisal, curauá, malva, juta e coco) e fibras sintéticas (vidro, carbono e polipropileno) são aproveitadas para fins de otimização de armaduras dos elementos estruturais, semiestruturais, de reparo e reabilitação de construções (HANIF KHAN *et al.*, 2022; PARK *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2010; ZUKOWSKI; DE ANDRADE SILVA; TOLEDO FILHO, 2018).

Sabe-se que as fibras lignocelulósicas apresentam uma natureza hidrofílica que influencia nas propriedades mecânicas do compósito, dependendo da aplicação, do volume, forma de distribuição, do tratamento e das características da matriz, pode-se agregar vantagens na questão da sustentabilidade e na resistência mecânica. No entanto, em contato direto com os álcalis do cimento Portland e o hidróxido de cálcio durante a hidratação, a fibra é degradada afetando sua durabilidade, suas propriedades e fragilizando o compósito (TOLEDO FILHO *et al.*, 2009; WEI; MEYER, 2015). Uma das soluções para diminuir esta degradação é a modificação da matriz cimentícia, com a substituição do cimento comum por materiais cimentícios alternativos, por exemplo a metacaulim (MELO FILHO, 2012; MELO FILHO; SILVA; TOLEDO FILHO, 2013; SILVA *et al.*, 2010).

Melo Filho, Silva, Toledo Filho (2013) investigaram o envelhecimento acelerado de 25, 50, 75 e 100 ciclos por meio de ciclos de umedecimento e secagem, de compósitos reforçados com fibras naturais de sisal, com substituição parcialmente do cimento por metacaulim e resíduos de tijolos de argila calcinada triturados, e obtiveram uma matriz livre de hidróxido de cálcio evitando o processo de fragilização da fibra, mantendo a tenacidade com o tempo, mesmo após 100 ciclos de umedecimento e secagem. Os estudos que nortearam a pesquisa de Melo Filho, Silva, Toledo Filho (2013) foram as pesquisas de Silva *et al.* (2010) e Melo Filho (2012). Na Tabela 1 estão apresentados os resultados mecânicos a tração direta e de fratura dos compósitos fibrocimento HPRCC reforçados com fibras de sisal de Silva *et al.* (2010) e Melo Filho (2012).

Tabela 1: Resumo dos resultados a tração direta dos estudos com compósitos fibrocimento HPRCC.

| Referências                   | Reforço | V <sub>f</sub><br>(%) | σ <sub>1f</sub> (MPa)<br>CV (%) | ε <sub>1f</sub><br>CV (%) | σ <sub>u</sub> (MPa)<br>CV (%) | ε <sub>u</sub><br>CV (%) | N <sub>f</sub> | S <sub>f</sub><br>(mm) |
|-------------------------------|---------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------|------------------------|
| Melo Filho<br>(2012)          | Sisal   | 6                     | 4,08<br>(1,04)                  | -                         | 9,24<br>(0,92)                 | -                        | 10             | 18,69<br>± 5,36        |
|                               |         | 10                    | 4,21<br>(9,92)                  | -                         | 11,25<br>(7,67)                | -                        | 20             | 10,78<br>± 5,04        |
| Silva <i>et al.</i><br>(2010) |         | 10                    | 6,78<br>(1,13)                  | 0,023<br>(0,01)           | 13,95<br>(1,60)                | 1,00<br>(0,05)           | -              | 22,10<br>± 5,50        |

Nota: V<sub>f</sub> – volume de fibras; σ<sub>1f</sub> – tensão na 1ª fissuração; σ<sub>u</sub> – tensão última; ε<sub>u</sub> – deformação últimas; N<sub>f</sub> – número de fissuras; S<sub>f</sub> – espaçamento entre as fissuras; Fontes: Silva *et al.* (2010) e Melo Filho (2012).

No estudo de Silva *et al.* (2010), substituiu o cimento Portland CII F-32 por 30% de metacaulim e 20% de resíduos calcinados de tijolo de argila esmagada, matriz está considerada pelos pesquisadores livre de hidróxido de cálcio, assim como a substituição de 50% do cimento por metacaulim. A matriz (argamassa) produzida consistiu no traço de 1:1:0,4 (material cimentício:areia:água, em peso). Uma das razões para a adoção deste cimento é a ausência de materiais pozolânicos.

Por sua vez, Melo Filho (2012) substituiu o cimento CII F por 50% de metacaulim, adquirindo uma matriz livre de hidróxido de cálcio. O pesquisador utilizou um teor de 2% de superplastificante tipo FOSROC REAX CONPLAST SP 430, com composição baseada em

Naftaleno Sulfonado com teor de sólidos de 44%. Através do ensaio de consistência padrão e de mini-slump de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016) e Kantro *et al.* (1980), Melo Filho (2012) obteve uma matriz com índice de consistência de 390 mm e espalhamento de mini-slump de 290 mm.

Tanto Silva *et al.* (2010) como Melo Filho (2012) desenvolveram compósitos de fibrocimento (400 mm × 50 mm × 12 mm) com múltipla fissuração sujeitos a tração direta, reforçados com fibras de sisal sem tratamento, alinhadas unidirecionais de forma contínua distribuídas em cinco camadas alternadas com a matriz.

Seguindo as recomendações dos estudos de Silva *et al.* (2010) e Melo Filho (2012), a fim de manter a durabilidade e analisar o comportamento mecânico a tração direta de endurecimento por deformação dos biocompósitos, a próxima etapa da pesquisa consistiu em descrever os materiais e os métodos do processo metodológico do programa experimental. Na Tabela 2 estão indicados os parâmetros que foram adotados e determinados através do ensaio a tração direta nesta pesquisa.

Tabela 2: Parâmetros adotados e determinados na presente pesquisa.

| Parâmetros adotados |         |        | Parâmetros determinados |                               |                           |                            |                        |                |                     |
|---------------------|---------|--------|-------------------------|-------------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------|----------------|---------------------|
| Traço               | Reforço | Vf (%) | P (MPa)                 | $\sigma_{1f}$ (MPa)<br>CV (%) | $\epsilon_{1f}$<br>CV (%) | $\sigma_u$ (MPa)<br>CV (%) | $\epsilon_u$<br>CV (%) | N <sub>f</sub> | S <sub>f</sub> (mm) |
| 1:1:0,40            | Malva   | 8      | 0                       | ■                             | ■                         | ■                          | ■                      | ■              | ■                   |
|                     | Juta    | 8      | 0                       | ■                             | ■                         | ■                          | ■                      | ■              | ■                   |

Nota: Traço – material cimentício:areia:água em peso; Vf – volume de fibras; P – pressão de moldagem;  $\sigma_{1f}$  – tensão na 1ª fissuração;  $\sigma_u$  – tensão última;  $\epsilon_u$  – deformação últimas; N<sub>f</sub> – número de fissuras; S<sub>f</sub> – espaçamento entre as fissuras; ■ – Resultados determinados nesta pesquisa. Fonte: Autores

### 3. Procedimentos Metodológicos

#### 3.1. Fibras lignocelulósicas

As fibras utilizadas neste estudo foram coletadas no município de Manacapuru, no estado do Amazonas, Brasil. As fibras já haviam sido extraídas da planta e maceradas pelos agricultores locais. No laboratório, as fibras foram lavadas com água de torneira e penteadas manualmente para alinhamento, com escova de aço carbono com cabo de madeira, secas a temperatura ambiente (tratamento simples) e cortadas em comprimento de 400 mm. As fibras de juta e malva foram costuradas transversalmente por três fibras de algodão para fazer um espaçamento homogêneo entre as fibras, de modo a facilitar o processo de moldagem.

#### 3.2. Cimento Portland, metacaulim e areia

O cimento adotado para a confecção dos compósitos, foi o cimento Portland CP II F-32 composto com filer calcário, definido pela norma brasileira NBR 16697 (ABNT, 2018) com capacidade de suporte de 32 MPa a compressão aos 28 dias. A metacaulim utilizada neste trabalho foi desenvolvida pela METACAULIM do Brasil Indústria e Comercio LTDA. O cimento adotado foi caracterizado por Melo Filho (2012) e as propriedades da metacaulim foram garantidos pela fabricante METACAULIM do Brasil Indústria e Comercio LTDA. Na Tabela 3 estão apresentadas as propriedades químicas e físicas do cimento e da metacaulim utilizados nesta pesquisa.

Tabela 3: Propriedades químicas e físicas do cimento CP II F-32 e da Metacaulim.

| Propriedades químicas e físicas       |                                    | CP II F-32 | Metacaulim |
|---------------------------------------|------------------------------------|------------|------------|
| Óxido de cálcio                       | CaO (%)                            | 71,476     | 0,2        |
| Óxido de silício                      | SiO <sub>2</sub> (%)               | 15,326     | 56,0       |
| Óxido de alumínio                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 3,706      | 36,0       |
| Óxido férrico                         | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 3,777      | 2,0        |
| Óxido de Magnésio                     | MgO (%)                            | 1,344      | 0,20       |
| Óxido de potássio                     | K <sub>2</sub> O (%)               | 0,189      | 1,50       |
| Óxido de Sódio                        | Na <sub>2</sub> O (%)              | 0,331      | 0,1        |
| Massa específica (g/m <sup>3</sup> )  |                                    | 3,08       | 2,58       |
| Perda ao fogo (%)                     |                                    | 4,93       | -          |
| Área Superficial (cm <sup>2</sup> /g) |                                    | -          | 240000     |

Fontes: Melo Filho (2012) e Metacaulim do Brasil.

Observa-se que a metacaulim adotada na pesquisa apresenta um teor de SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de cerca de 90% e um teor de CaO de 0,2%. A granulometria do cimento e da metacaulim foi obtida pelo ensaio de granulometria a laser, utilizando o granulômetro a laser Malvern MasterSizer® 2000, localizado no Laboratório de Estruturas do PEC-COPPE/UFRJ, que mede partículas de tamanhos entre 0,02 µm a 2000 µm. Na Figura 1 estão mostradas as curvas granulométricas do cimento CP II F-32, metacaulim e areia.

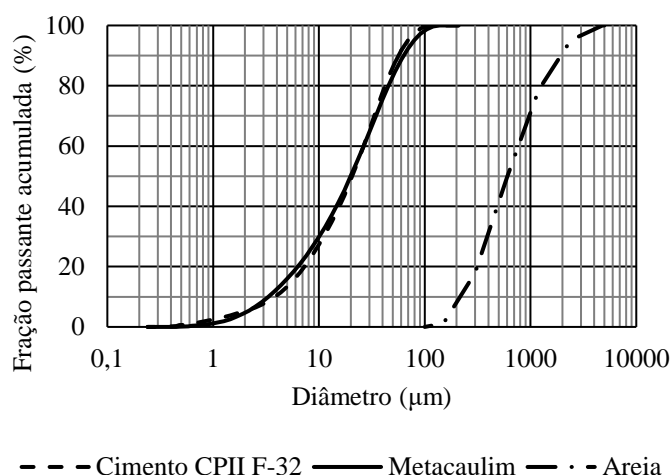


Figura 1: Curvas granulométricas do cimento CP II F-32, metacaulim e areia. Fonte: elaboradas pelos autores.

Constatou-se na distribuição granulométrica do cimento 95% das 29 partículas eram inferiores a 68 µm e 50% inferiores a 18 µm. Com relação a metacaulim, 85% das partículas eram inferiores a 20µm e 65% inferiores a 10µm. Foi utilizada uma areia quartzosa de rio, com massa específica de 2,67 g/cm<sup>3</sup>, com granulometria inferior a 1,18mm e módulo de finura (MF) de 2,43, características semelhantes as utilizadas por Melo Filho, 2012.

### 3.3. Aditivo e água

Utilizou-se como aditivo o superplastificante do tipo PA (Poliacrilato, Glenium 51), com teor de sólidos de 31,20 %, massa específica de 1073 kg/m<sup>3</sup> e pH 6,2, semelhante ao adotado por Melo Filho (2012). A água utilizada em toda a fase experimental foi proveniente da rede de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.

### 3.4. Matriz

A matriz cimentícia utilizada foi semelhante a desenvolvida por Melo Filho (2012), que substituiu parcialmente o cimento CII F-32 por metacaulim. Adotou o traço de 1:1:0,40 (material cimentício:areia:água, em peso) e adição de 2% de superplastificante.

### 3.5. Processamento dos compósitos

A argamassa foi misturada em seus estados secos em um misturador de bancada, com capacidade de 20 L, na seguinte ordem: cimento, metacaulim e areia. Deixou-se misturar por 2 min e em seguida foi adicionada a água com o superplastificante diluído em seu interior, lentamente no misturador, por mais 3 minutos, até que a mistura apresentasse uma homogeneização visível para então ser feita a moldagem das placas.

Os compósitos foram produzidos em formato de placas com dimensões 400x250x120mm, empregando 5 camadas de fibras, com fração volumétrica de 8%, intercaladas com a matriz cimentante. Nenhuma técnica de compressão (pressão) foi aplicada após a moldagem. Foram produzidos 3 corpos de prova para cada tipo de reforço fibroso.

Após a desforma, as placas foram levadas para a câmara úmida, durante 28 dias. Em seguida, os compósitos foram cortados com o auxílio de uma serra de bancada com potência SSP – 75 e jato de água, resultando em amostras com dimensões de 400 mm × 50 mm × 12 mm para o ensaio de tração.

Após o processo de cura, os corpos de prova foram armazenados em uma sala com temperatura controlada de  $21 \pm 1$  ° C por um período de até 40 horas antes da execução dos ensaios. Antes do ensaio, a parte central dos corpos de prova foram pintados em branco com uma tinta à base de PVA para uma melhor visualização das fissuras.

### 3.6. Ensaio de tração direta

O ensaio de tração direta foi realizado em uma máquina de ensaios mecânicos modelo Shimadzu AGX, com célula de carga de 100 kN, e velocidade de deslocamento de 0,1 mm/min. O sistema utilizado para a fixação do corpo de prova consistiu em duas placas metálicas que eram coladas ao corpo-de-prova com uma camada fina de adesivo epóxi (Sikadur 32) conectadas a outra peça metálica por um pino, a qual era presa na garra da máquina de ensaios, conforme mostrado na Figura 2.

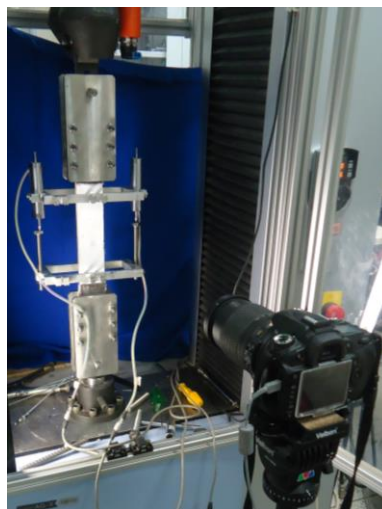


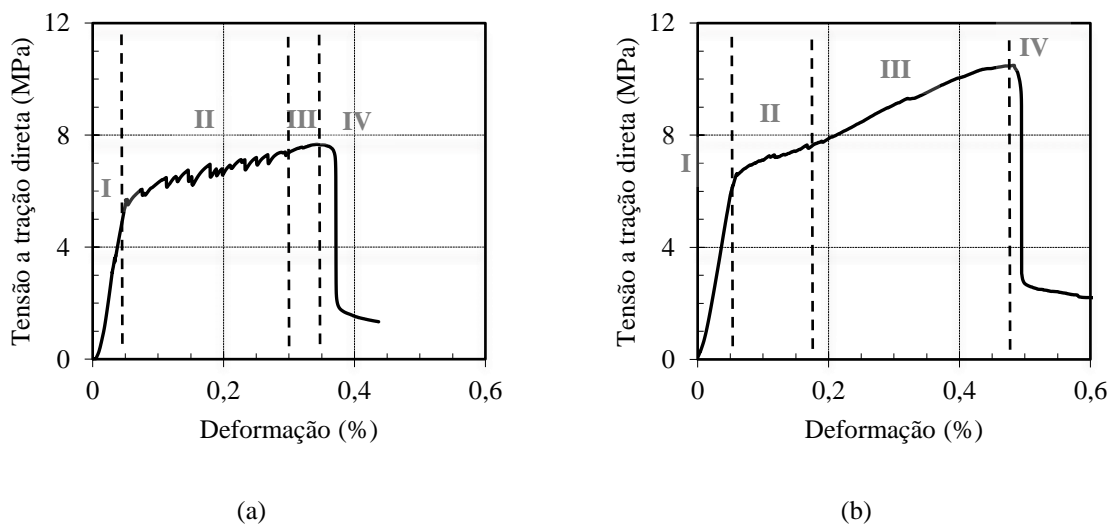
Figura 2: Configuração do ensaio de tração direta. Fonte: elaborado pelos autores.

Os deslocamentos axiais foram obtidos a partir da leitura média de dois LVDTs (*linear variable differential transformer* - sensores de medição de deslocamento linear) acoplados em aparatos de alumínio que eram fixados nas amostras através de parafusos localizados em quatro pontos, impediu a sua rotação em relação ao eixo do corpo-de-prova. O comprimento de leitura dos LVDTs utilizado foi de 160 mm.

O sistema de aquisição de dados, contínuo, foi baseado no programa Trapézio X, obtendo-se a carga por meio da célula de carga da máquina e o deslocamento por meio dos LVDTs. A tensão última de tração foi determinada dividindo a carga máxima resistida da amostra pela área da seção do corpo de prova. Foram avaliados três corpos de prova para cada tipo de reforço fibroso. As fissuras foram quantificadas e fez-se três leituras em cada fissura, obtendo desta forma as aberturas médias de cada fissura.

#### 4. Análises dos Resultados

As curvas tensão de tração x deformação dos compósitos foram divididos em quatro regiões, identificadas por números romanos, conforme mostrado na Figura 3.



**Figura 3:** Curvas médias de tensão a tração direta x deformação nos compósitos: (a) Reforçados com fibras de juta e (b) Reforçados com fibras de malva. Fonte: elaborados pelos autores.

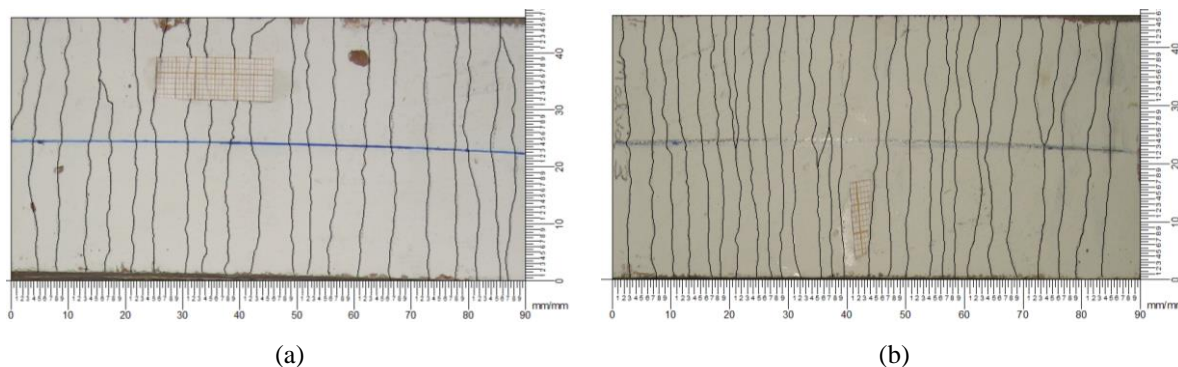
Conforme pode ser observado nas curvas da região I, ambos os compósitos apresentaram o comportamento linear elástico. Sabe-se que nesta região o valor da tensão e deformação de primeira fissura é dominado pela matriz. Observa-se que as curvas dos compósitos reforçados com fibra de malva desenvolveram melhor que o compósito reforçado com a fibra de juta, este comportamento também ocorreu nas regiões II e III. Na região IV, ocorreu o decaimento rápido da curva tensão x deformação. Ambos os compósitos apresentaram uma queda brusca na tensão. Admite-se que esta queda esteja relacionada à perda de aderência na interface fibra-matriz e ao rompimento das fibras, ocasionando o colapso do material.

Acredita-se que a formação de múltiplas fissuras, distribuição das tensões na interface fibra matriz e surgimento de microfissuras, ocorre na região II. Nota-se que os compósitos reforçados com fibras de juta demonstraram uma curva crescente com elevados picos e quedas, enquanto os compósitos reforçados com fibras de malva, a curva foi crescendo de forma suave, com



alguns picos localizados, significando mais interação ou aderência entre a matriz e o reforço fibroso.

A região III é caracterizada pela abertura progressiva das microfissuras, sendo constatado 27 fissuras para os compósitos reforçados com as fibras de malva espaçadas  $3,17 \pm 1,21$  mm e 21 fissuras espaçadas a cada  $4,33 \pm 1,34$  mm para os compósitos reforçados com as fibras de juta e, conforme mostrado na Figura 4.



**Figura 4: Modo de fratura dos corpos de prova após o ensaio de tração: (a) Reforçados com fibras de juta e (b) reforçados com fibras de malva. Fonte: Elaborados pelos autores.**

Os resultados da tensão de primeira fissura ( $\sigma_{1f}$ ) e deformação de primeira fissuração ( $\epsilon_{1f}$ ) dos compósitos, tensão última ( $\sigma_u$ ), deformação última fissuração ( $\epsilon_u$ ) e seus respectivos coeficientes de variação (CV) do ensaio a tração direta estão mostrados no Quadro 1.

Quadro 1 – Resultados médios das propriedades mecânicas de tração direta e fratura.

| Compósitos                     | Região I                      |                           | Região III                 |                            | Fissuras |                 |
|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------|-----------------|
|                                | $\sigma_{1f}$ (MPa)<br>CV (%) | $\epsilon_{1f}$<br>CV (%) | $\sigma_u$ (MPa)<br>CV (%) | $\epsilon_u$ (%)<br>CV (%) | $N_f$    | $S_f$<br>(mm)   |
| Reforçados com fibras de malva | 6,60<br>(0,11)                | 0,060<br>(2,00)           | 10,34<br>(2,09)            | 0,482<br>(8,32)            | 27       | $3,17 \pm 1,21$ |
| Reforçados com fibras de juta  | 5,42<br>(6,38)                | 0,045<br>(6,47)           | 7,96<br>(2,45)             | 0,350<br>(8,63)            | 21       | $4,33 \pm 1,34$ |

Nota:  $\sigma_{1f}$  – tensão na 1ª fissuração;  $\epsilon_{1f}$  – deformação na primeira fissuração;  $\sigma_u$  – tensão última;  $\epsilon_u$  – deformação última;  $N_f$  – número de fissuras;  $S_f$  – espaçamento entre as fissuras; CV – coeficiente de variação. Fonte: Autores.

Comparando os dados encontrados com Silva et al. (2010) e Melo Filho (2012), pode-se confirmar tensões nas fissurações coerentes com os resultados apresentados pelos trabalhos dos pesquisadores anteriores. Entretanto, a tensão na primeira fissuração dos compósitos reforçados com fibra de malva teve um acréscimo de 61,76% em relação ao compósito produzido por Melo Filho (2012) para o volume de fibra de 6% e pressão de moldagem de 3 MPa. Comparando com o volume de 10% de fibra, sem pressão de moldagem, este acréscimo foi de 56,77%. Nos compósitos reforçados com fibra de juta este acréscimo na tensão na primeira fissuração foi de 32,84% e 28,74%, respectivamente.

Quando é feito a comparação dos valores das tensões últimas, observa-se que os compósitos reforçados com fibra de malva apresentaram valores dentro das faixas estudadas por Melo Filho (2012), citadas anteriormente, e menores quando comparados com a pesquisa Silva et al. (2010).

Quanto ao compósito reforçado com fibras de juta, os valores ficaram abaixo de 13,95 MPa 9,24 MPa encontrados por Silva et al. (2010) e Melo Filho (2012), respectivamente. No caso de Silva et al. (2010) entende-se que devido a matriz utilizar somente 30% de metacaulim e 20% de resíduos calcinados de tijolo de argila esmagada, há esta diferença e conseqüentemente influência nos resultados, mesmo sendo materiais pozolânicos. Comparando com os valores de Melo Filho, percebe-se que as tensões entre fibra-matriz foram menores nos estágios iniciais, principalmente na região I, ou seja, a maior parte das tensões neste estágio foi absorvida pela matriz.

Na análise do modo de fratura, tanto os compósitos reforçados com fibras malvas como os compósitos reforçados com fibra de juta, aumentaram a quantidade de fissuração e diminuiu os espaçamentos entre as fissuras, quando comparados com os compósitos reforçados com fibras contínuas de sisal de Silva et al. (2010) e Melo Filho (2012). O número de fissuras dos compósitos reforçados com fibras de malva e juta foi 2,7 e 1,35 vezes maior que os compósitos produzidos por Melo Filho (2012) que utilizou o volume de fibra de 6% e a pressão de moldagem de 3 MPa.

## 5. Considerações Finais

Em termos de resistência à tração direta, os compósitos cimentícios reforçados com fibras de malva tiveram um ganho no comportamento de endurecimento por deformação após a primeira fissura, apresentando mais múltiplas fissuras que os compósitos cimentícios reforçados com fibras de juta. Ambos os compósitos apresentaram processo de rachadura múltipla.

Este ganho de resistência está relacionado a melhor aderência das fibras de malva a matriz cimentícia, sendo possível obter logo no final do estágio inicial da curva tensão deformação a representação de 60% da resistência total do compósito, entendendo que houve uma melhor distribuição das tensões.

Esta pesquisa demonstrou que a incorporação das fibras contínuas de malva e juta como reforço em compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais lignocelulósicas com comportamento de endurecimento por deformação (SHCC), melhora a resistência dos biocompósitos, podendo ser utilizado em sistemas semiestruturais e estruturais, sujeitos à tração direta.

## Agradecimentos

As agências brasileiras CNPq e CAPES pela bolsa e apoio financeiro. Aos programas de Pós-graduação de Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) pela disponibilização dos materiais e equipamentos para a produção dos compósitos e realização do ensaio. A coordenação e equipe técnica do Laboratório de Técnicas Analíticas do Labest/COPPE/UFRJ.

## Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: Argamassa para

assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, p. 6, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, p. 16, 2018.

BARBOSA, E. P. Estudo da produção e caracterização de metacaulinita para utilização como material cimentício suplementar. Universidade Federal do Amazonas - UFAM, 2019.

DOS SANTOS, V. *et al.* Fiber-cement composites hydrated with carbonated water: Effect on physical-mechanical properties. *Cement and Concrete Research*, v. 124, n. June, p. 105812, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105812>.

FERREIRA, S. R. *et al.* Effect of Sisal Fiber Hornification on the Fiber-Matrix Bonding Characteristics and Bending Behavior of Cement Based Composites. *Key Engineering Materials*, v. 600, *Key Engineering Materials*, p. 421–432, 2014. Disponível em: <https://www.scientific.net/KEM.600.421>.

HANIF KHAN, M. *et al.* Effects of Various Mineral Admixtures and Fibrillated Polypropylene Fibers on the Properties of Engineered Cementitious Composite (ECC) Based Mortars. *Materials*, v. 15, n. 8, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/8/2880>.

IBGE. . – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção Agrícola, 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/14/10193>. Acesso em: 14 out. 2021.

KANTRO, D. L. *et al.* Influence of Water-reducing Admixtures on Properties of Cement Paste: A Miniature Slump Test.: Portland Cement Association, 1980. (Research and development bulletin). *E-book*. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=WVcjGQAACAAJ>.

LIMA, P. R. L. *et al.* Short sisal fiber reinforced recycled concrete block for one-way precast concrete slabs. *Construction and Building Materials*, v. 187, p. 620–634, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.184>.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; MELO FILHO, J. A. Compressive stress-strain behaviour of cement mortar-composites reinforced with short sisal fibre. *Materials Research*, v. 17, n. 1, p. 38–46, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/mr/a/ZngxK6WrscJtb7mKzmfKFMN/?lang=en>. Acesso em: 14 out. 2021.

MELO FILHO, J. de A. Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

MELO FILHO, J. de A.; SILVA, F. D. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems. *Cement and Concrete Composites*, v. 40, p. 30–39, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946513000504>.

NAAMAN, A. E.; REINHARDT, H. W. High Performance Fiber Reinforced Cement Composites HPFRCC-4: International RILEM Workshop. *Materials and Structures*, v. 36, n. 10, p. 710–712, 2003. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF02479507>.

PARK, G.-K. *et al.* Residual Tensile Properties and Explosive Spalling of High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites Exposed to Thermal Damage. *Materials*, v. 14, n.

7, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/7/1608>.

SILVA, E. J. da *et al.* A new treatment for coconut fibers to improve the properties of cement-based composites – Combined effect of natural latex/pozzolanic materials. *Sustainable Materials and Technologies*, RADARWEG 29, 1043 NX AMSTERDAM, NETHERLANDS, v. 12, p. 44–51, 2017. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214993716300021>.

SILVA, F. de A. *et al.* Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 5, p. 777–785, 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061809003675>. Acesso em: 14 out. 2021.

SUN, S.; MA, D.; ZHOU, G. Applications and Analysis of the Composite wall on Construction in Heilongjiang Province. *In:* , 2015, Chicago, United states. *Procedia Engineering*. Chicago, United States, 2015. p. 160–168. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.414>.

TOLEDO FILHO, R. D. *et al.* Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 6, p. 2409–2420, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061808003231>.

WEI, J.; MEYER, C. Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites. *Cement and Concrete Research*, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLAND, v. 73, p. 1–16, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884615000617>.

ZUKOWSKI, B.; DE ANDRADE SILVA, F.; TOLEDO FILHO, R. D. Design of strain hardening cement-based composites with alkali treated natural curauá fiber. *Cement and Concrete Composites*, v. 89, p. 150–159, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946517310417>.