

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

NADINE MACHADO FICHER

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO À TRAÇÃO DIRETA E INDIRETA DE COMPÓSITOS
DE FIBRAS DE JUTA**

Alegrete

2017

NADINE MACHADO FICHER

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO À TRAÇÃO DIRETA E INDIRETA DE
COMPÓSITOS DE FIBRAS DE JUTA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Ederli Marangon

Alegrete

2017

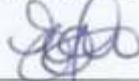
NADINE MACHADO FICHER

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO À TRAÇÃO DIRETA E INDIRETA DE
COMPÓSITOS DE FIBRAS DE JUTA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 01/12/2017.

Banca examinadora:



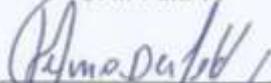
Prof. Dr. Ederli Marangon

Orientador
UNIPAMPA



Prof. Me. Aisson Simonetti Milani

UNIPAMPA



Prof. Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld

UNIPAMPA

Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha mãe Tanira, minha vó Constança e meu avô José.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por sua presença durante toda a minha caminhada.

A minha família que é a base de tudo. Em especial a minha mãe, pelo apoio, incentivo, compreensão e todos os esforços que fez durante toda a minha graduação, possibilitando que eu chegasse até aqui.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ederli Marangon, pelas as ideias, apoio, incentivo e por sempre se mostrar disponível para me auxiliar nesse trabalho. Por estar presente na minha jornada acadêmica desde o início da graduação até aqui, sendo fundamental para o meu interesse pela área acadêmica.

Ao meu namorado Eduardo por todo amor, companheirismo e paciência durante todos esses anos de faculdade. Por sempre estar disponível para me ajudar em toda a minha caminhada, inclusive a acadêmica, e seu apoio sendo imprescindível para que eu conseguisse concluir este trabalho.

A Ana e ao Paulo Zamin, minha segunda família, por todo o amor, carinho e apoio que dedicam a mim.

Aos colegas que se tornaram grandes amigos, por todos os momentos de companheirismo e amizade, aos amigos distantes que de uma forma ou de outra sempre se mostraram presentes. Em especial ao Alan Cabral, Emanuele Eichholz e a Mônica Coffferri que estiveram comigo durante toda a minha caminhada, foram colegas e principalmente amigos para todas as horas, com certeza se cheguei até aqui foi porque eles estiveram sempre comigo.

A todos os professores, pelo conhecimento compartilhado e comprometimento que disponibilizaram durante toda a graduação, me permitindo aprender e crescer profissionalmente.

Aos técnicos Dieison, Marcelo e Raquel por todo o auxílio prestado durante os ensaios.

As empresas METACAULIM do Brasil e Rosário Postes, pelo material doado.

“O desejo é a chave para a motivação, mas é a determinação e o compromisso de uma busca incessante de seu objetivo, um comprometimento com a excelência que lhe permitirá alcançar o sucesso que você procura”.

Mario Andretti

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo a avaliação da substituição parcial de cimento Portland por 50% de metacaulim e o uso de diferentes camadas de reforço fibroso em formato de tela em compósitos cimentícios. O reforço utilizado foi o tecido de fibra de juta, de malha 5x5cm, disposta em 3 e 5 camadas. Para a avaliação mecânica foram realizados ensaios de compressão da matriz cimentícia, tração direta e indireta em flexão à três pontos. Os resultados mostram que para compressão o módulo de elasticidade não foi alterado e a resistência à compressão foi reduzida em 19,59% para a matriz com substituição de 50% de cimento por metacaulim. Para a tração direta os resultados dos compósitos reforçados com 5 camadas de fibras de juta e com substituição mineral, apresentaram os melhores desempenhos, chegando a um comportamento “*strain hardening*”, porém sem apresentar múltipla fissuração. Quanto a tração indireta os resultados mostraram que o teor de fibras inseridos na matriz influência diretamente na capacidade de carga dos compósitos, por outro lado o maior teor de fibras obteve um melhor comportamento quanto a capacidade de absorção de deformações. Para os compósitos sem reforço fibroso a matriz a base de cimento foi a que apresentou os melhores resultados, porém quando os compósitos continham alguma camada de reforço a matriz com substituição parcial de cimento Portland mostrou-se mais eficiente, concluindo assim que o metacaulim foi efetivo resultando em uma matriz livre de hidróxido de cálcio, permitindo que as fibras a tivessem um desempenho melhor. Porém, o uso do reforço fibroso em forma de tecido não foi muito efetivo devido a fatores que podem ser relacionados à perturbação do esqueleto granular e pouca fluidez da matriz para um bom preenchimento dos espaços entre os cordões da malha.

Palavras-Chave: Compósitos cimentícios, Reforço de fibras, Fibras de juta.

ABSTRACT

The present study aims to evaluate the partial replacement of Portland cement by 50% of metakaolin and the use of different layers of fibrous reinforcement in screen format in cementitious composites. The reinforcement used was jute fiber fabric, 5x5cm mesh, arranged in 3 and 5 layers. For the mechanical evaluation, compression tests of the cementitious matrix, direct and indirect tension were carried out in three-point bending. The results show that for compression the modulus of elasticity was not changed and the maximum strength was reduced by 19.59% for the matrix with 50% replacement of cement by metakaolin. For the direct tension the results of the composites reinforced with 5 layers of jute fibers and with metakaolin substitution presented the best performances, reaching a "strain hardening" behavior but without multiple cracking. Regarding indirect tension, the results showed that the fiber content influenced the load capacity of the composites. On the other hand, the higher fiber content obtained a better behavior regarding the capacity to absorb deformations. For the composites without fibrous reinforcement, the cement-based matrix presented the best results, but when the composites contained some reinforcement layer the matrix with partial replacement of Portland cement proved to be more efficient, thus concluding that metakaolin was effective resulting in a free matrix of calcium hydroxide, allowing the fibers to perform better. However, the use of jute fibers reinforcement was not very effective due to factors that may be related to granular skeletal disorder and poor matrix fluidity for a good filling of the spaces between the cords of the mesh.

Keywords: Composite cement, Fiber reinforcement, Jute fiber.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CH – Hidróxido de cálcio

E – Módulo de elasticidade

ABBA – Superplastificante

MEV – Microscópio eletrônico de varredura

TGA – Termogravimetria

C – Cimento Portland

CP – Corpo de Prova

MC – Metacaulim

SP – Superplastificante

σ – Tensão

δ – Deslocamento

ϵ – Deformação

DV – Desvio padrão

CV – Coeficiente de variação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Objetivos	14
1.1.1. Objetivo Geral	14
1.1.2. Objetivos Específicos	14
1.2. Justificativa.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1. Fibras Naturais	16
2.1.1. Fibras de Juta	20
2.2. Adições Minerais	23
2.2.1. Metacaulim	23
2.3. Desempenho Mecânico de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais Vegetais.....	24
2.3.1. Comportamento à Tração Direta	25
2.3.2. Comportamento à Tração Indireta.....	27
3. METODOLOGIA	29
3.1. Materiais Utilizados.....	29
3.1.1. Cimento Portland	29
3.1.2. Areia.....	30
3.1.3. Metacaulim	30
3.1.4. Tecido de Fibra de Juta	31
3.1.5. Superplastificante	31
3.2. Produção dos Compósitos Cimentícios	31
3.3. Ensaio de Tração Direta	34

3.4.	Ensaio de Tração Indireta.....	35
3.5.	Ensaio Para Obtenção do Comportamento à Compressão da Matriz Cimentícia	36
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	38
4.1.	Comportamento à Compressão das Matrizes	38
4.2.	Comportamento à Tração Direta	39
4.3.	Comportamento à Tração Indireta em Flexão à Três Pontos	41
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
	REFERÊNCIAS.....	53
	APÊNDICES	56

1. INTRODUÇÃO

A construção civil vem buscando nos últimos tempos, junto com os outros tantos ramos da indústria da construção, inovações tecnológicas que venham proporcionar melhorias nas suas mais variadas áreas. A ciência dos materiais, por exemplo, é um dos campos que tem apresentado grande evolução no decorrer dos anos, pois está em uma busca constante por maneiras de aprimorar cada vez mais as propriedades dos elementos, tornando-os mais eficientes e permitindo a execução dos mesmos mais esbeltos e arrojados.

Dentro desse contexto de inovação na ciência dos materiais, os compósitos são elementos que têm ganhado um foco importante, pois apresentam uma boa resistência à compressão, com isso possuem uma vasta aplicabilidade na construção civil, como telhas, placas divisórias e revestimentos de paredes. Contudo os compósitos a base de cimento Portland, quando sujeitos a esforços de tração e a cargas dinâmicas, são frágeis e possuem pequena deformação na ruptura. Assim, uma das questões estudadas com relação a esse assunto é encontrar uma maneira de melhorar o desempenho mecânico desses elementos, principalmente sob esforços de tração. Uma das possíveis soluções idealizadas para isso é o emprego de um material que adicionado aos compósitos, possa agir como reforço dos mesmos.

Uma alternativa que surge para o reforço dos compósitos são as fibras vegetais, tais como sisal, curauá, banana, cocô, juta, entre outras. Essas fibras são encontradas na natureza e são alternativas que apresentam muitas vantagens, como por exemplo, são economicamente mais viáveis quando comparadas a utilização de fibras metálicas ou sintéticas, apresentam propriedades como baixa densidade e boa resistência mecânica. Além de se tratar de uma fonte renovável e atóxica, as fibras vegetais possuem características importantes quando se refere à necessidade da substituição das fibras de amianto, que até alguns anos atrás era o material que liderava o mercado quando se tratava do assunto reforço. Com a comprovação que o amianto é prejudicial à saúde, colocando em risco quem trabalha com ele, surgiu então a necessidade de encontrar um material com propriedades semelhantes as fibras de amianto e que não apresentassem desvantagem econômica.

Uma grande variedade de fibras naturais são temas de estudos, até mesmo são usadas como reforço estrutural de componentes de pouca espessura. Em países mais desenvolvidos e em desenvolvimento essa tecnologia já é bastante empregada, contudo, no cenário nacional pode se afirmar que apesar dos benefícios já consolidados, o emprego de fibras naturais na construção civil não é tão comum. Porém o que mais se busca nos tempos modernos são alternativas sustentáveis para esse ramo da indústria. Outro aspecto importante do estudo desse material é o ponto de vista econômico relacionado com a região onde são cultivadas as fibras naturais, como as regiões ribeirinhas. As fibras têm se mostrado um material de qualidade, o que acaba dando visão de mercado e gerando outras fontes de renda, contribuindo para o crescimento e desenvolvimento da sua região de produção.

Uma questão importante no estudo das fibras, é que por se tratar de um material biodegradável, uma preocupação que se deve ter é em relação a sua deterioração. Quando adicionadas aos compósitos a base de cimento Portland, as fibras ficam em contato com o meio alcalino, que pode conseqüentemente acelerar o seu desgaste e/ou mineralização, ocasionando assim perdas de suas propriedades mecânicas. Para evitar que isso ocorra é necessário que se realize a proteção das fibras que serão introduzidas na matriz cimentícia. Uma forma de evitar a degradação é garantir que a matriz produzida seja livre de hidróxido de cálcio (CH), principal componente de degradação. Uma ótima opção para este fim é realizar a substituição parcial do cimento Portland por um o material pozolânico.

Os materiais pozolânicos, como a cinza volante, sílica ativa, cinza de casca de arroz, metacaulim e resíduos cerâmicos moídos, fazem parte do grupo de adições minerais, que quando usado como substituição parcial do cimento Portland permite produzir um material à base de cimento com um desempenho ainda melhor do que o seu traço original. As pozolâneas reagem quimicamente com o CH produzido durante a hidratação do cimento, para formar suas propriedades cimentícias, permitindo assim a redução substancial de CH livre na mistura que poderia migrar para o núcleo das fibras, culminando assim no ataque alcalino das mesmas. O uso da adição mineral permite ainda alcançar certos benefícios, como por exemplo, obter um produto mais econômico, devido ao custo reduzido, a produção tem menor consumo energético, além de reduzir as emissões de CO₂, sendo assim um material mais sustentável.

Dessa maneira evidencia-se a importância do estudo mais aprofundado sobre o uso das fibras vegetais, como o tecido de fibra de juta, para alterar as características dos materiais compósitos, produzindo elementos com características mais dúcteis, e aliado ao estudo das fibras as adições minerais, como o metaculim, que assume o papel de material com capacidade de consumir o CH, proporcionando aos compósitos maior durabilidade. Para conduzir esse estudo é necessário o realizar ensaios mecânicos em placas retangulares finas, com espessuras de aproximadamente 1cm, que simulem elementos de pouca espessura aplicados na construção civil, nas quais durante a moldagem são introduzidas as camadas de fibras naturais que atuam como reforço.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar as propriedades mecânicas de tração direta e indireta de uma matriz cimentícia com substituição parcial do cimento Portland por metacaulim, reforçada com tecido de fibras de juta.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Avaliar o desempenho mecânico através de ensaios de tração direta.
- Avaliar o desempenho mecânico através de ensaios de tração indireta à flexão à três pontos.
- Analisar o efeito da utilização do metacaulim na substituição parcial do cimento Portland.
- Estudar o efeito proporcionado pelo uso de 3 e 5 camadas do tecido de fibras naturais de juta no compósito.

1.2. Justificativa

Com o intuito de encontrar novos materiais que possam ser aplicados na construção civil, é proposto o estudo aplicado na investigação sobre os benefícios que

são proporcionados pela aplicação de fibras naturais vegetais, quando inseridas em matrizes cimentícias e também do seu uso como reforço de diferentes concretos. Verificando a possibilidade de futuramente esses materiais serem usados da mesma maneira que as fibras de vidro e as fibras metálicas que já são aplicadas no mercado, apresentando como vantagens o aspecto econômico e a o fato de ser um material renovável.

E para garantir a durabilidade das fibras naturais que estão inseridas em um meio agressivo e altamente alcalino, justifica-se assim o estudo da substituição parcial em massa do cimento Portland por adições minerais, que possam vir a funcionar como agente mitigador da degradação das fibras, permitindo assim que as propriedades mecânicas das fibras não sejam afetadas.

Este trabalho em questão, está inserido dentro dos muitos trabalhos realizados pelo grupo de pesquisas MAEC (Materiais Aplicados a Engenharia Civil) e abordará as propriedades encontradas para os compósitos cimentícios reforçados com as fibras de juta associadas a uma substituição parcial de 50% do cimento Portland por metacaulim, avaliando assim o desempenho do reforço fibroso associado a durabilidade proporcionada por este tipo de adição mineral. Outros tipos de fibras naturais, como o sisal e o campim anoni, associadas a outros tipos de adições minerais como por exemplo a sílica da casca do arroz e a cinza volante também são pautadas em outros trabalhos realizados dentro do grupo MAEC.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Fibras Naturais

O uso de fibras naturais como reforço de materiais a base de cimento é muito antigo, um dos primeiros materiais utilizados com este fim foi o asbesto, que se destacava devido a suas propriedades mecânicas possuírem qualidade superior as demais. Porém o uso do asbesto foi proibido após a descoberta de que o material continha substâncias cancerígenas, sendo prejudicial para a saúde dos trabalhadores. O estudo de outros materiais que pudessem substituir o asbesto começou a ser necessário, nesse contexto as fibras vegetais ganharam um espaço importante, tornando-se uma das principais alternativas para substituição total do asbesto (SILVA, 2009).

Defoirdt *et al.* (2010) acreditam que o potencial das fibras naturais utilizadas como reforço pela indústria de compósitos cimentícios depende diretamente das propriedades mecânicas que elas apresentam. Através de análises realizadas, o mesmo afirma, por exemplo, que as fibras de bambu e de juta têm características mais adequadas para proporcionar mais resistência aos compósitos, enquanto que as fibras de cocô propiciam dureza e melhor impregnação das fibras quando acrescentadas a matriz cimentícia. Essa variação que ocorre de fibra para fibra está ligada a inúmeros aspectos, como o ambiente de cultivo, solo, época e a maneira como é realizada a colheita, a localização da fibra útil em relação ao corpo da planta, tipo e quantidade de celulose que compõem a fibra, sendo esse conjunto de características o que define propriedades mecânicas que cada fibra apresenta (TOMCZAK, 2010).

Na Tabela 1 é possível observar as propriedades características de algumas das fibras naturais mais comumente estudadas, bem como os limites de variação dos valores encontrados (BENTUR; MINDESS, 2007).

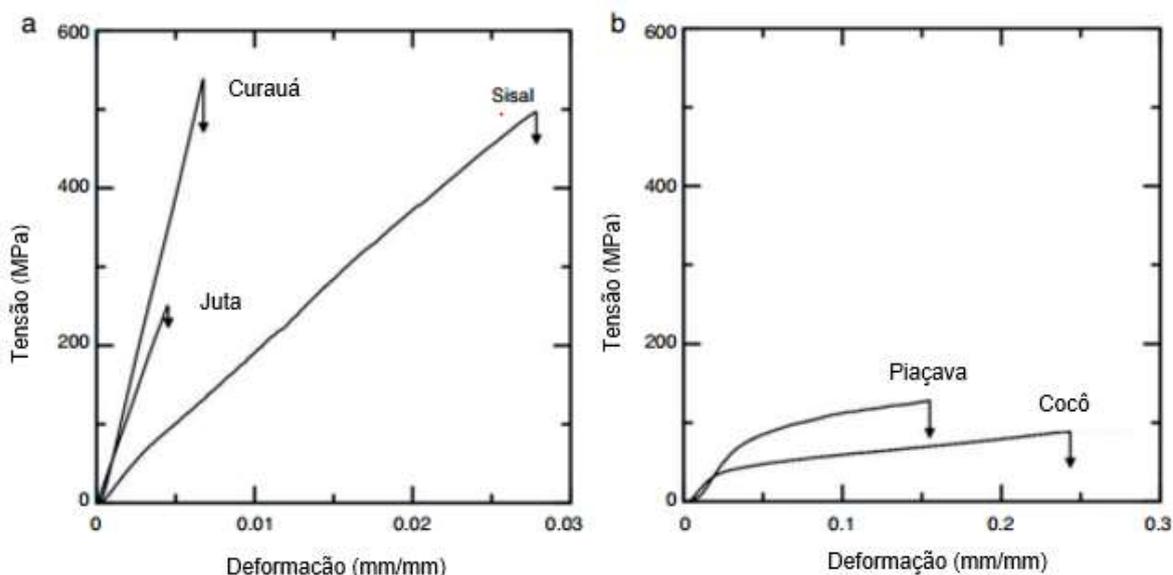
Tabela 1- Fibras naturais e suas propriedades.

Fibras	Juta	Sisal	Cocô	Cana de Açúcar	Bagaço de Cana
Tensão de Tração (MPa)	250-350	280-750	120-200	170-290	20
Módulo de Elasticidade (GPa)	26-32	13-26	19-26	15-29	1,7
Alongamento de Ruptura (%)	1,5-1,9	3-5	10-25	-	-
Diâmetro da Fibra (mm)	0,1-0,2	-	0,1-0,4	0,2-0,4	0,24
Comprimento da Fibra (mm)	1800-3000	-	50-350	50-300	-
Absorção de água (%)	-	60-70	130-180	60-75	78,5

Fonte: Adaptado de Bentur e Mindess (2007).

De acordo com estudos realizados por Fidelis *et al.* (2013) com variadas fibras, sendo elas as de sisal, curauá, juta, cocô e piaçava, as fibras naturais podem ser classificadas quanto ao seu desempenho, são as fibras naturais de baixo desempenho e fibras naturais de alto desempenho. As fibras de sisal, curauá e juta se encontram no grupo de alto desempenho, pois de acordo com a Figura 1, essas fibras apresentaram resistência à tração acima de 200 MPa e módulo de elasticidade (E) em torno de 19 GPa, enquanto as demais ficam no grupo de baixo desempenho. Resultados de resistência para o curauá como $E = 64$ GPa e tensão de tração de 543 MPa, mostram a semelhança com as propriedades apresentadas pelas fibras de vidro ($E = 70$ GPa) e fibras de polipropileno (tensão de tração de 400 a 500 MPa), materiais já conhecidos por suas aplicações como reforço em concretos especiais.

Figura 1- Curva de tensão x deformação de fibras. (a) Carauá, juta e sisal. (b) Piaçava e cocô.

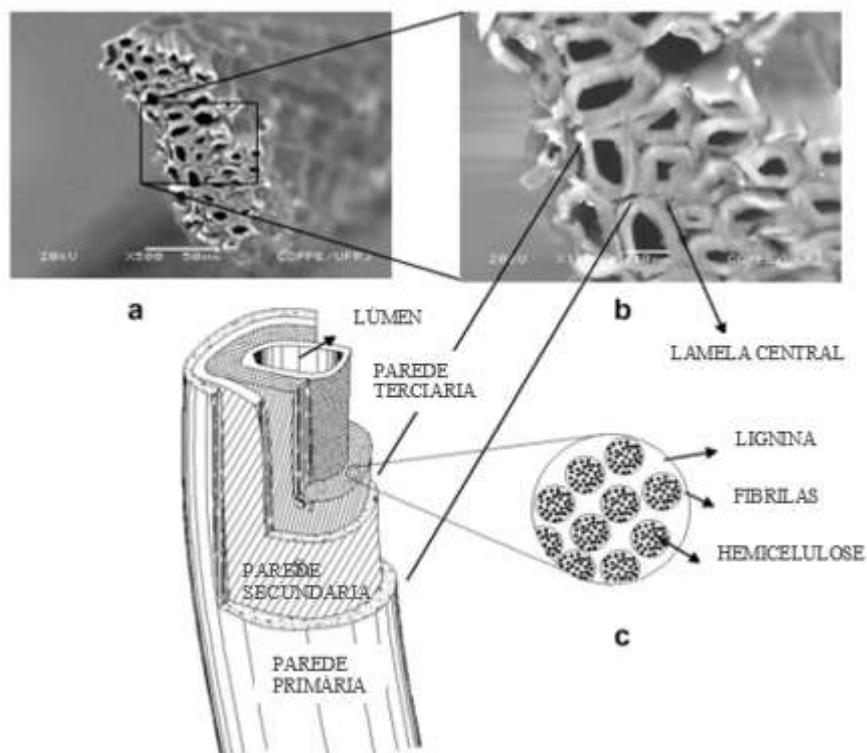


Fonte: Adaptado de Fidelis (2013).

Apesar das propriedades mecânicas apresentarem bons resultados, as fibras naturais sofrem com um problema de durabilidade. Análises de raios-X e termogravimétricas (TGA) mostram que o problema está ligado a hidrólise alcalina dos componentes amorfos das fibras e a precipitação dos produtos da hidratação do cimento nas paredes das células das fibras (mineralização), esses fatores relacionados ao meio em que as fibras estão inseridas acabam degradando componentes importantes, que conferem as fibras suas capacidades mecânicas (SILVA, 2009, WEI, MEYER, 2016).

Segundo Gram (1983) a estrutura celular das fibras é muito complexa. O grau de complexidade se inicia pela seção transversal da fibra que é constituída por um número de aproximadamente cem fibrocélulas, que por sua vez são formadas por microfibrilas cristalinas constituídas de celulose, que se ligam entre si por lamelas intermediárias; as lamelas são compostas por hemicelulose, lignina e pectina. A disposição dessas fibrocélulas ainda é dividida em 4 partes, sendo elas a parede primária, parede secundária, parede terciária e o lúmen. Através da representação de Toledo *et al.* (2009) na Figura 2, é possível observar o esquema estrutural das células, onde a Figura 2- (a) mostra a seção transversal da fibra de sisal, a mesma seção encontra-se ampliada na Figura 2- (b), é possível ver a indicação da localização da lamela central e de cada constituinte da fibra na Figura 2- (c).

Figura 2- Composição da fibra de sisal. (a) Seção transversal. (b) Ampliação e indicação da lamela centra. (c) Esquematização das camadas constituintes da fibra.



Fonte: Adaptado de Toledo et al. (2009).

Melo Filho *et al.* (2013) sugerem que os mecanismos de degradação da fibra ocorrem através de dois aspectos principais: a mineralização das fibras por meio da precipitação de CH da matriz e também pela deterioração da lignina e hemicelulose.

Wei, Meyer (2015) analisaram os processos de degradação do sisal atuando como reforço de compósitos cimentícios, afim de investigar os mecanismos de ataque alcalino da fibra natural, causado pelo ambiente agressivo e rico em minerais que a matriz cimentícia expõem o reforço natural. Através da análise, verificou-se que a degradação alcalina da celulose depende principalmente da redução das regiões amorfas, que servem de barreira de proteção para a celulose, principal constituinte da fibra natural. Dessa forma, a lignina e hemicelulose que são ambas amorfas e, portanto, sensíveis ao meio alcalino do cimento, estão em contato direto com os produtos de hidratação da matriz cimentícia, sendo eles os primeiros mecanismos a sofrerem com a degradação mais agressiva e gradativa, ocasionando a exposição da celulose ao meio alcalino, ou seja, os produtos da hidratação do cimento infiltram-se

gradualmente nas paredes celulares das fibras, conduzindo assim a mineralização e a fragilização da fibra natural.

2.1.1. Fibras de Juta

Com características que se assemelham a um barbante, a fibra de juta é resistente e totalmente ecológica, sendo que entre as espécies de fibra naturais, a juta é uma das mais baratas, proveniente de uma planta da família das “tiliáceas”. Trata-se de uma erva lenhosa, que pode atingir entre 3 e 4 metros de altura, com cerca de 20 mm de caule. De origem indiana, país ainda líder em produção, a fibra é cultivada em locais úmidos e tropicais, tem sido produzida em grande escala mundial, motivada principalmente pelo apelo ecológico; sua utilização se dá em grande parte no ramo automobilístico e para a fabricação de materiais compósitos. No Brasil seu plantio é feito na região amazônica, mais precisamente em locais ribeirinhos, atividade que gera a principal fonte econômica da população (PIRES, 2009).

Segundo a A.B.B.A (2001), a cultura da fibra é autossustentável e renovável, e para seu crescimento saudável não é preciso fazer uso de defensivos agrícolas ou fertilizantes, após sua colheita a terra não tem que ser queimada ou desmatada para que o seu replantio seja feito, pois o seu cultivo é feito na encosta dos rios, local ideal pela presença constante de umidade, sendo os húmus do rio o lugar de onde os nutrientes necessários para o desenvolvimento da planta são adquiridos.

De acordo com a Castanhal Companhia Têxtil (2013), a produção ocorre da seguinte maneira: depois de semeada, levam-se em torno de quatro meses para planta atingir os parâmetros necessários, então é iniciada a colheita, onde ela é cortada rente ao solo por meio de foices e separada das folhas. A fibra útil está contida entre a casca e o talo interno; para fazer a retirada da parte útil a planta é submetida ao processo de maceração, que consiste em deixar os caules mergulhados em água corrente ou parada por alguns dias, até que as fibras possam ser facilmente desprendidas do caule e lavadas. Uma segunda lavagem é realizada antes das fibras serem postas em varais para secagem, essa lavagem difere da primeira pois consiste em golpear as fibras na água.

Um fator relevante é que em nenhuma fase do processo do cultivo e da produção dos tecidos de fibra de juta faz-se uso de produtos químicos, esse cuidado

é importante pois geralmente seu uso está associado ao contato com outros alimentos, tornando-se também um aspecto positivo quanto ao seu uso incorporado a uma matriz cimentícia.

De acordo com a revista Globo Rural e a A.B.B.A, é possível através da Figura 3 analisar os estágios pelos quais a fibra de juta são submetidas, desde a sua colheita ilustrada na Figura 3- (a), o processo de maceração indicado na Figura 3- (b), os fios pendurados em varais até a secagem como mostra a Figura 3- (c), até o último estágio na Figura 3- (d), no qual os fio da juta são processados para a obtenção do tecido de juta, formato em que são disponibilizados na indústria.

Figura 3- Processo de produção do tecido de juta. (a) Colheita. (b) Maceração. (c) Secagem. (d) Processamento industrial.



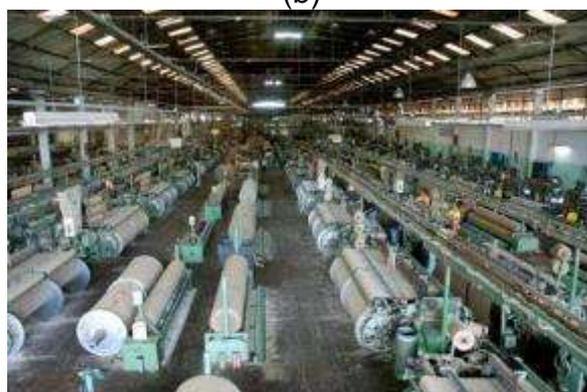
(a)



(b)



(c)



(d)

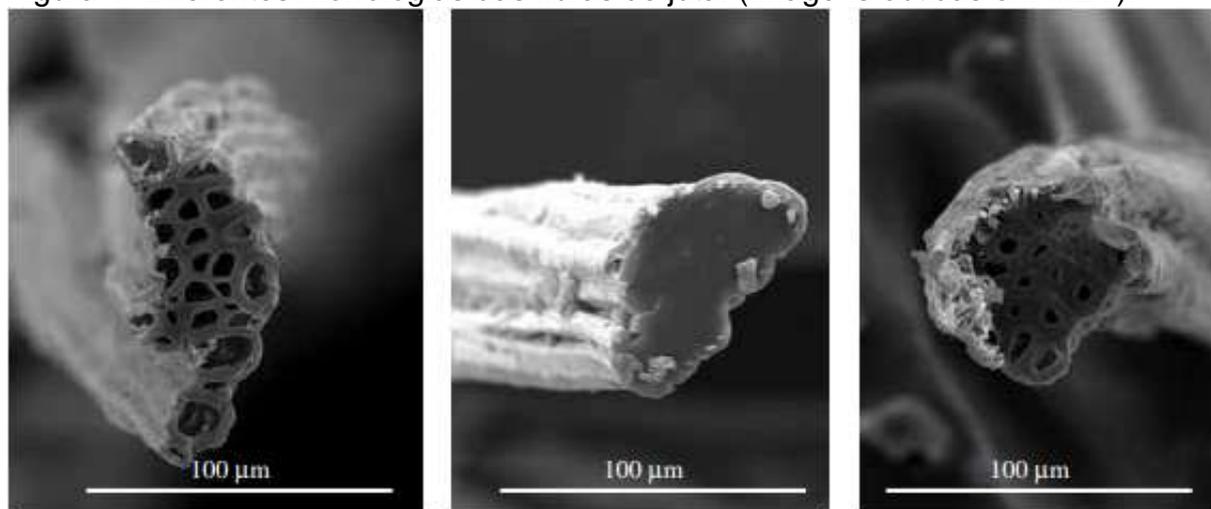
¹ Fonte: Elaboração própria.

Segundo Fidelis (2014), a fibra de juta tem uma composição de 72 % de celulose, 8,1 % de lignina e 12,8 % de hemicelulose e o índice de cristalinidade é de 75,2 %. A grande variabilidade da morfologia do filamento de juta quanto à espessura

¹ Nota: A Figura 3 contém fotos de diferentes autores, citadas durante o texto, não sendo por tanto de autoria própria, no entanto a montagem das fotos é uma elaboração própria.

das paredes celulares, número e diâmetro dos lumens, pode ser notada através de imagens geradas por um microscópio eletrônico de varredura (MEV), na Figura 4.

Figura 4- Diferentes morfologias das fibras de juta. (Imagens obtidas em MEV).



Fonte: Fidelis (2014, p.49).

Ensaio de tração realizados por Fidelis (2014) na fibra de juta, para diferentes comprimentos de fibra obtiveram resultados que se encontram na Tabela 2, os valores não apresentaram a um nível probabilístico uma diferença significativa de tensão para os diferentes comprimentos de fibra, já os valores de módulo de elasticidade apresentaram oscilação significativa. Assim como notado para o módulo de elasticidade, a resistência à tração e a capacidade de deformação não parecem variar em função do comprimento, essa variabilidade parece estar ligada à microestrutura das fibras de juta e possíveis danos ocorridos durante o processo de extração.

Tabela 2- Resultados do ensaio de tração para diferentes comprimentos de fibra de juta.

Comprimento	20 mm	30 mm	40 mm	50mm
$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	314	263	249	308
E (GPa)	35,2	37,7	43,9	48,9
ϵ (%)	0,9	0,7	0,6	0,7

Fonte: Adaptado de Fidelis (2014).

2.2. Adições Minerais

Segundo Dal Molin (2005), as adições minerais proporcionam diversos efeitos nas propriedades do concreto, destacando-se o aumento significativo da resistência a compressão, sendo alcançado principalmente devido as características predominantes dos grãos, pois trata-se de um material silicoso finamente moído; proporcionando assim um refinamento dos poros, que influencia diretamente no ganho de resistência a compressão. Até mesmo a resistência a tração do concreto sofre incremento quando se é empregado o uso das adições minerais, porém esse aumento de resistência não chega ser um valor tão expressivo, nem mesmo proporcional ao ganho de resistência a compressão.

Mas entre os aspectos mais consideráveis que a utilização das adições minerais proporciona, está diretamente ligada a atividade química do material, as partículas reagem com o CH resultante da hidratação do cimento, essa reação resulta numa ocupação dos vazios existentes na pasta de cimento, ou seja, a porosidade e a capacidade de absorção do concreto é substancialmente diminuída. Quando as adições minerais são capazes de diminuir a permeabilidade do concreto, isso garante ao material maior resistência a degradação, pois a ação de agentes agressivos como ataque de sulfatos, cloretos, entrada de oxigênio do ambiente externo e também umidade no interior da pasta de concreto passa a ser dificultada. Os caminhos que antes existiam devido a porosidade do concreto, são agora reduzidos, criando assim uma proteção para o meio, além disso quando as reações químicas acontecem a quantidade disponível de CH que possivelmente pudessem combinar com outras substâncias causando efeitos deteriorantes no concreto, são reduzidas graças ao consumo do CH durante as reações químicas. Sendo assim pode-se afirmar que um dos grandes ganhos propiciados pelo uso de adições minerais é o aumento da durabilidade (DAL MOLIN, 2005).

2.2.1. Metacaulim

O metacaulim é um dos materiais utilizados como adição mineral para a produção de concretos especiais, o produto é obtido através da calcinação de argilas como a caulinita e o caulim. As argilas em sua estrutura normal não possuem uma

atividade pozolânica a menos que sejam submetidas a um tratamento térmico, cujas temperaturas sejam capazes de modificar essa estrutura. No caso da produção do metaculim, as caulinitas são submetidas a temperaturas entre 600 e 900°C para que a sua estrutura cristalina passe para uma forma amorfa, que é o responsável pela sua atividade pozolânica (DAL MOLIN, 2005).

Estudos sobre durabilidade de compósitos reforçados com fibras naturais, comprovam que através de ensaios de TGA realizados em amostras expostas a ciclos de molhagem e secagem, que a utilização do metacaulim em substituição parcial de 30% em massa do cimento conseguiu reduzir a zero o teor de CH, controlando o pH da solução e sendo efetivo para a mitigação da degradação dos reforços naturais, sem prejudicar o comportamento mecânico do compósito. (LIMA, TOLEDO, 2008, SILVA, 2009, LIMA, 2014, WEY; MEYER, 2015).

Melo Filho *et al.* (2013) e Fidelis *et al.* (2016) estudaram compósitos reforçados com fibras de sisal e juta, respectivamente, onde as matrizes continham porcentagens maiores de substituição do cimento. Com o uso de 50% em massa de metacaulim, ambos encontraram resultados semelhantes, além de consumir totalmente o CH, observações microscópicas mostraram que as fibras de naturais não apresentaram sinais de degradação, comprovando que o uso do metacaulim é eficiente para o aumento da durabilidade do reforço natural.

2.3. Desempenho Mecânico de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais Vegetais

O maior benefício gerado pela incorporação de fibras em matrizes cimentícias é o papel que elas exercem após o surgimento da primeira fissura, até esse momento o comportamento do compósito cimentício é regido somente pelas propriedades mecânicas da matriz. Quando a matriz atinge a tensão de pico, as fibras agem redistribuindo as tensões, evitando que o material tenha uma ruptura brusca, à medida que novos carregamentos são aplicados ao compósito, novas fissuras vão surgindo e dividindo a matriz em vários segmentos, esse comportamento é denominado “múltipla fissuração”, o que caracteriza um material com desempenho dúctil (VELASCO, 2008).

Dois compósitos, ambos reforçados com fibras, podem apresentar diferentes comportamentos. Para um compósito ser capaz de apresentar múltipla fissuração é

necessário que o volume de fibras presente na matriz seja maior que o volume crítico de fibras; esse volume crítico corresponde a quantidade mínima necessária de fibras presente na matriz, para que as fibras tenham capacidade suficiente de carga; abaixo desse valor, a capacidade de carga das fibras não é maior que a tensão de primeira fissura, não funcionando assim como um reforço. Assim como o volume, o comprimento das fibras também deve ser maior que o comprimento crítico, garantindo assim, que haja capacidade de redistribuição de tensões através das fibras, após o surgimento da primeira fissura (BENTUR; MINDESS, 2007).

Em um contexto geral, compósitos reforçados com fibras curtas apresentam propriedades mecânicas inferiores às dos compósitos produzidos com fibras longas, pois as fibras curtas não possuem comprimento de ancoragem suficiente para redistribuir as tensões sofridas pela matriz, levando assim ao rompimento brusco do material. (LIMA, 2004, MELO FILHO, 2005, VELASCO, 2008, SILVA, 2009,).

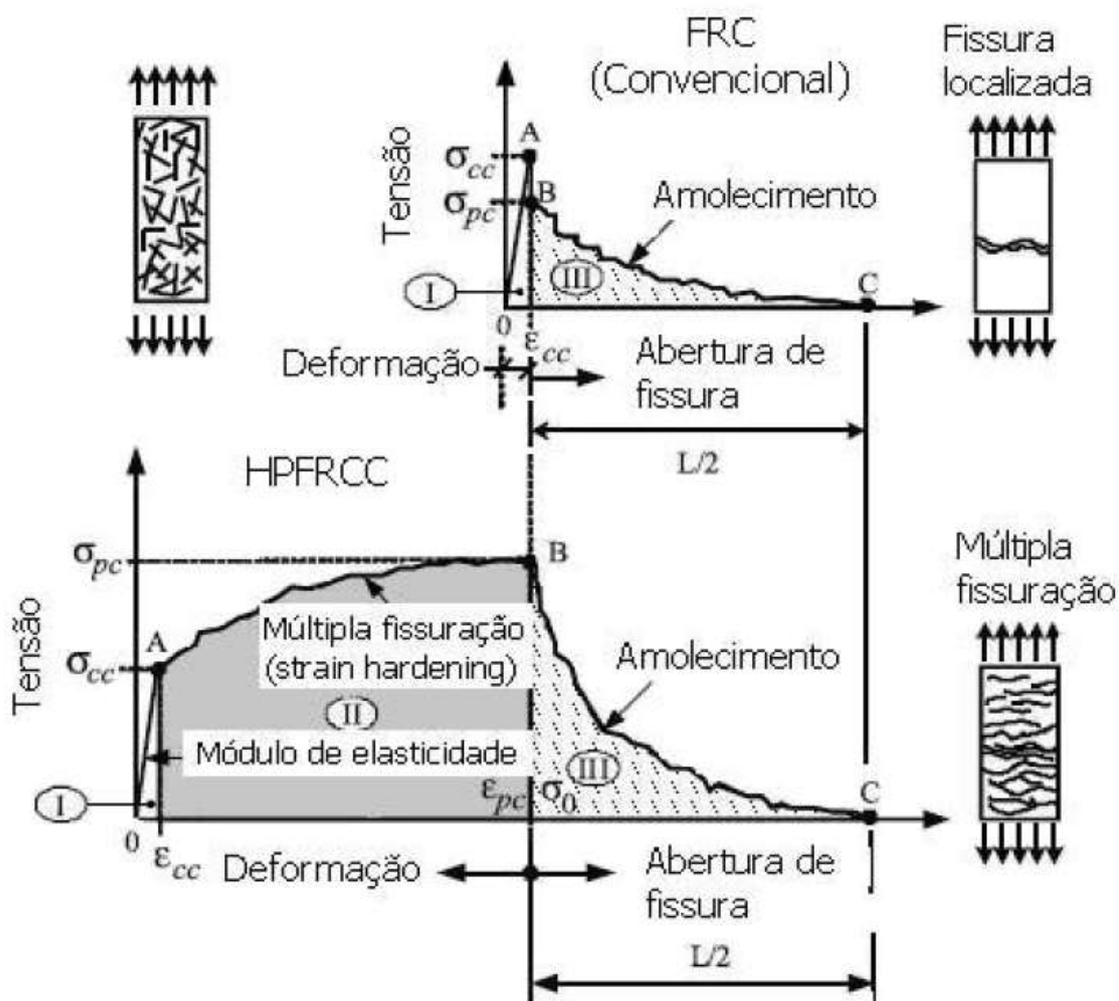
Os resultados encontrados nas literaturas foram obtidos através de ensaios mecânicos de tração direta e indireta (flexão à três e/ou quatro pontos) em amostras retangulares de pouca espessura, os ensaios foram executados de maneira muito semelhante entre os autores, sendo as maiores diferenças encontradas na execução dos ensaios referentes ao modelo das máquinas utilizadas. Dos resultados apresentados a seguir verifica-se que mesmo fazendo uso de fibras vegetais com baixo módulo de elasticidade, as fibras têm grande potencial; o reforço natural permitiu a produção de compósitos laminados com resistências à tração e à flexão, superiores aos da matriz, conferindo aos compósitos maior tenacidade e deformação de ruptura (LIMA, 2004, MELO FILHO, 2005, 2012, SILVA 2009, FIDELIS, 2014,).

2.3.1. Comportamento à Tração Direta

A Figura 5 exemplifica a diferença de comportamento apresentada entre dois compósitos reforçados com fibras submetidas à tração direta. O compósito que apresenta uma única fissura tem a tensão pós a fissuração menor que a tensão de primeira fissura, enquanto o compósito com múltiplas fissurações apresenta um comportamento de endurecimento (*strain hardening*), onde a resistência de pós fissuração alcança valores superiores a resistência de primeira fissura, caracterizando

assim o comportamento do compósito como HPFRCC, do inglês “*high performance fiber reinforced cement composites*” (NAAMAN, 2002 apud VELASCO, 2008, p. 14).

Figura 5- Comparação entre compósitos com múltiplas fissurações e compósito com fissura localizada.



Fonte: NAAMAN apud VELASCO (2008, p. 14).

Lima (2004) estudou o comportamento pós-fissuração de materiais compósitos, reforçados com diferentes camadas de reforço (duas e três camadas) e porcentagens em volume de fibras longas de sisal. Os compósitos reforçados com volume acima de 4,43% de fibra, apresentaram um comportamento de múltipla fissuração e incremento de deformação última. O reforço em duas camadas permitiu maior desenvolvimento de fissuras do que o reforço com três camadas.

Em relação ao desenvolvimento do processo de múltiplas fissurações, Melo Filho (2005) encontrou o valor de 6% de volume de fibras de sisal como teor ótimo de

reforço. Ensaios de tração direta foram realizados para o reforço disposto em três e cinco camadas alinhadas em direção ao carregamento. O comportamento mecânico para o arranjo de cinco camadas se mostrou melhor em relação ao reforço de três camadas, quanto a carga de primeira fissura e pós fissuração ao qual o compósito foi submetido.

Silva (2009) também ao estudar o comportamento de fibras longas de sisal, dispostas em cinco camadas como reforço de compósitos, alcançou um processo de múltiplas fissurações e um comportamento *strain hardening*. Avaliou-se ainda o uso do sisal alinhado e costurado, para ambas as técnicas, os resultados foram promissores, desempenhando um comportamento com múltiplas fissuras.

Melo Filho (2012), comparou o desempenho de laminados reforçados com frações de 6% e 10% de fibras de sisal. O compósito com 10% de reforço teve uma variação mais gradual da tensão de tração e também atingiu uma tensão última de pico, pós fissuração mais elevada. O amolecimento após atingir a tensão última de pico também foi mais gradual para o reforço de 10%. Em relação a quantidade de fissuras que surgiram, o compósito com 10% de reforço apresentou o dobro de fissuras do reforço de 6%, comportamento mecânico adequado aos valores encontrados anteriormente.

FIDELIS (2014) realizou a caracterização mecânica de compósitos têxteis reforçados com uma, três e cinco camadas de tecido de juta sob tração direta. Notou-se que com o aumento do número de camadas, maior foi a formação de fissuras, sendo que o compósito com uma camada apresentou apenas uma fissura, enquanto que os outros compósitos apresentaram comportamento *strain hardening*, com múltipla fissuração e maiores os valores de tensão última.

2.3.2. Comportamento à Tração Indireta

Lima (2004) comparou o comportamento a flexão de compósitos reforçados com duas e três camadas de fibras, verificando após os ensaios, que ocorreu uma redução de tensão de primeira fissura de acordo com o aumento do número de camadas utilizadas como reforço. Além disso observou que após a fissuração as fibras conseguiram redistribuir as tensões entre a matriz e as fibras, proporcionando um incremento de tensão e conservando as placas coesas, aumentando a deformação

última, mantendo as tensões residuais até maiores que as tensões de pico, alcançando assim um comportamento com múltiplas fissurações. O laminado reforçado com três camadas de fibra apresentou um comportamento melhor que o reforço de duas camadas sob flexão em três pontos, enquanto que o reforço de duas camadas foi mais eficiente sob flexão a quatro pontos.

Os estudos realizados por Melo Filho (2005) em três e cinco camadas de reforço mostraram que ambos os compósitos apresentaram um bom desempenho e com comportamento de múltipla fissuração. O reforço em cinco camadas apresentou os melhores resultados, tanto para tensão de primeira fissura, pós-fissuração e tenacidade, por isso sendo considerado pelo autor a disposição de camadas ideal como reforço para os compósitos.

Silva (2009) obteve um comportamento à flexão com formação de múltiplas fissurações, com o uso do tecido de sisal somente alinhado e também com o tecido alinhado e costurado. Resultados mostram que o compósito apresentou alta capacidade de absorção de energia. Análises microestrutural realizadas nas fibras pós ensaio, revelam a grande capacidade das fibras de exercer o papel de união e de restringir a abertura de fissuras, levando a uma definição de compósito de alto desempenho.

Melo Filho (2012) comparou o desempenho de laminados reforçados com frações de 6% e 10% de fibras de sisal. O comportamento a tração na flexão mostrou que o compósito com 10% atingiu uma tensão de pico inferior ao outro compósito, resultado aceitável uma vez que se encontra uma dificuldade maior na inclusão desse teor de fibras mais elevado. No entanto o maior teor de fibras proporcionou um aumento muito significativo na capacidade de carga durante o processo de múltiplas fissurações, além de um aumento na máxima tensão pós fissuração e também de tenacidade. A quantidade de fissuras que surgiu durante o ensaio foi muito aproximada para ambos os compósitos, sendo que a diferença mais significativa está no modo como elas surgiram, no reforço com 10% fibras as fissuras se apresentaram em um número maior de ramificações.

3. METODOLOGIA

Neste tópico são descritos os materiais, os procedimentos utilizados na moldagem dos corpos de prova, bem como os sistemas empregados para execução dos ensaios mecânicos de tração direta e indireta, que foram necessários para o desenvolvimento do trabalho.

3.1. Materiais Utilizados

Os materiais que foram usados para a produção dos compósitos cimentícios estudados, estão listados abaixo:

- Cimento Portland (C);
- Areia;
- Metacaulim (MC);
- Tecido de fibra de Juta;
- Superplastificante (SP).

A composição dos materiais consumidos por m³ que foi baseado na matriz produzida por Melo Filho (2012), se encontra na Tabela 3.

Tabela 3- Composição dos materiais utilizados na matriz cimentícia.

Material	Quantidade (kg/m ³)
Cimento CP V-ARI	864,5
Areia	864,5
Água	345,8
Superplastificante	12,1

Fonte: Elaboração própria.

3.1.1. Cimento Portland

O cimento usado no desenvolvimento da pesquisa foi o CP V-ARI. O material foi adquirido através de doação da empresa Rosário Postes, e por isso não se tem os dados do lote para descrever suas propriedades. Também não foi realizada nenhuma análise do cimento, uma vez que não é objeto de estudo desse trabalho.

3.1.2. Areia

Foi utilizada areia local do leito do rio Ibicuí, a caracterização do lote encontra-se na Tabela 4, que foi realizada por Mendes (2014). Para a produção da matriz somente o material passante na peneira nº 16 foi utilizado, como o empregado por Melo Filho (2012).

Tabela 4 - Caracterização da areia local.

Ensaio	Areia Fina	Areia Grossa
Módulo de Finura	1,37	3,47
Dimensão máxima característica (mm)	0,6	4,75
Massa Específica (kg/dm ³)	2,63	2,62

Fonte: Adaptado de Mendes (2014).

3.1.3. Metacaulim

O metacaulim utilizado no estudo foi adquirido através de doação da empresa METACAULIM do Brasil Indústria e Comércio Ltda. A composição química para o lote é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades químicas do Metacaulim.

Composição química (% em	MC
SiO ₂	51,20
Al ₂ O ₃	35,30
Fe ₂ O ₃	4,00
CaO	2,62
K ₂ O	0,97
Ti ₂ O	0,41
MgO	0,40
P ₂ O ₅	0,20
MnO	0,16
SO ₃	0,09

Fonte: METACAULIM do Brasil Indústria e Comércio Ltda.

3.1.4. Tecido de Fibra de Juta

O tecido de fibra de juta com abertura de malha de 5x5 mm, como mostrado na Figura 6 é facilmente encontrado no Rio Grande do Sul em lojas de artesanato e decoração, sendo este adquirido com a empresa Plásticos e Lonas na cidade de Porto Alegre, RS.

Figura 6- Tecido de fibra de juta.



Fonte: Elaboração própria.

3.1.5. Superplastificante

O superplastificante dispersante empregado no estudo trata-se do Glenium 51, que possui massa específica de 1073 kg/m^3 , teor de sólidos de 31,20 % e pH de 6,2.

3.2. Produção dos Compósitos Cimentícios

Para o desenvolvimento do trabalho foram produzidas duas matrizes cimentícias, M1 e M2, como mostra a Tabela 6. O traço 1:1 utilizado, baseou-se na matriz produzida por Melo Filho (2012), que provou através de ensaios TGA, que a substituição parcial do cimento Portland por metacaulim foi suficiente para garantir a produção de uma matriz totalmente livre de CH. Para cada matriz foram moldados laminados sem reforço, reforçados com três e com cinco camadas de fibra de juta.

Tabela 6- Nomenclatura, traços utilizados e corpos de prova ensaiados para as matrizes e compósitos produzidos.

Nomenclatura	Matriz				Compósito		Nº de CP's Ensaiaados		
	MC (%)	C (%)	a/mc	SP (%)	Nomenclatura	nº cam	Tração Direta	Tração Indireta	Compressão*
M1	0	100	0,4	1,4	M1-0	0	4	3	3
	0	100	0,4	1,4	M1-3	3	1	4	
	0	100	0,4	1,4	M1-5	5	4	5	
M2	50	50	0,4	1,4	M2-0	0	3	3	3
	50	50	0,4	1,4	M2-3	3	4	4	
	50	50	0,4	1,4	M2-5	5	4	5	

*Só foram ensaiados a compressão corpos de prova cilíndricos contendo apenas a matriz, sem fibras, como será explicado no item 3.5.

Fonte: Elaboração própria

A mistura dos materiais que compõem a matriz cimentícia foi realizada no misturador mecânico com capacidade para 5 litros que está ilustrado na Figura 7.

Figura 7- Misturador mecânico.



Fonte: Elaboração própria.

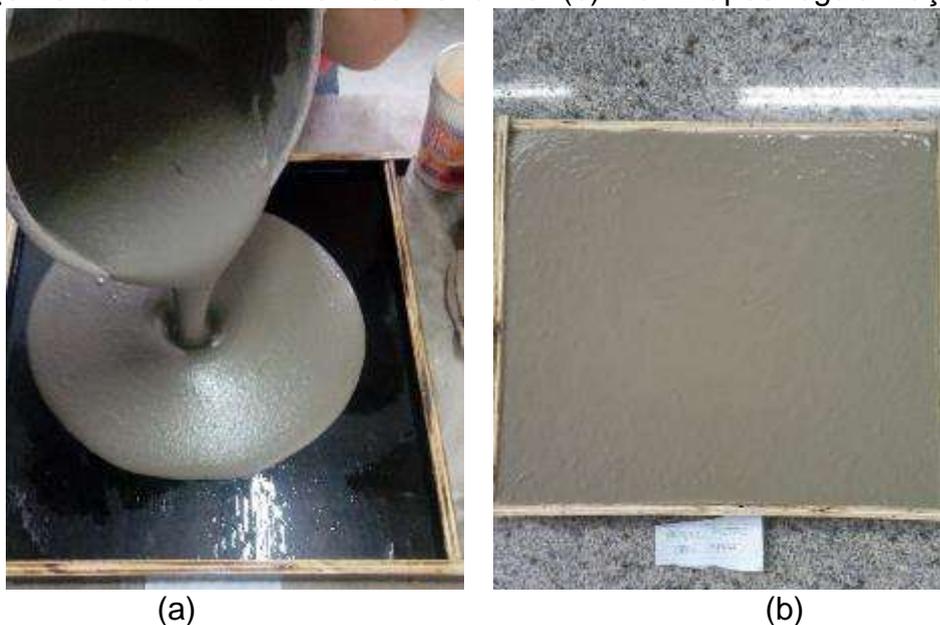
Os passos para a realização da mistura estão apresentados na seguinte ordem:

- Mistura do cimento Portland e do metacaulim na cuba, batendo em velocidade baixa por 1 minuto;
- Ainda em velocidade baixa acrescentar aos poucos o superplastificante;
- Adicionar lentamente a água da mistura;

- Misturar a areia em seguida, deixando os materiais misturarem juntos por 2 minutos em velocidade baixa, até que a mistura esteja homogênea;
- Após a homogeneização misturar todo o conteúdo durante 5 minutos em velocidade alta.

Na produção dos laminados cimentícios as formas para moldagem dos corpos de prova têm dimensão de 35x40x1,2 cm (LxCxE cm), após 21 dias foram cortados em serra diamantada em amostras de 7x40x1,2 cm (LxCxE cm). Para as amostras M1-0 e M2-0 a moldagem ocorreu de forma mais simples, bastando apenas realizar o lançamento da matriz cimentícia na forma após a realização da mistura, como representado na Figura 8- (a) e após se garantiu uma regularização adequada da superfície como indicado na Figura 8- (b).

Figura 8 - Produção do compósito cimentício sem utilização de reforço estrutural. (a) Lançamento da matriz cimentícia na forma. (b) Matriz após regularização.

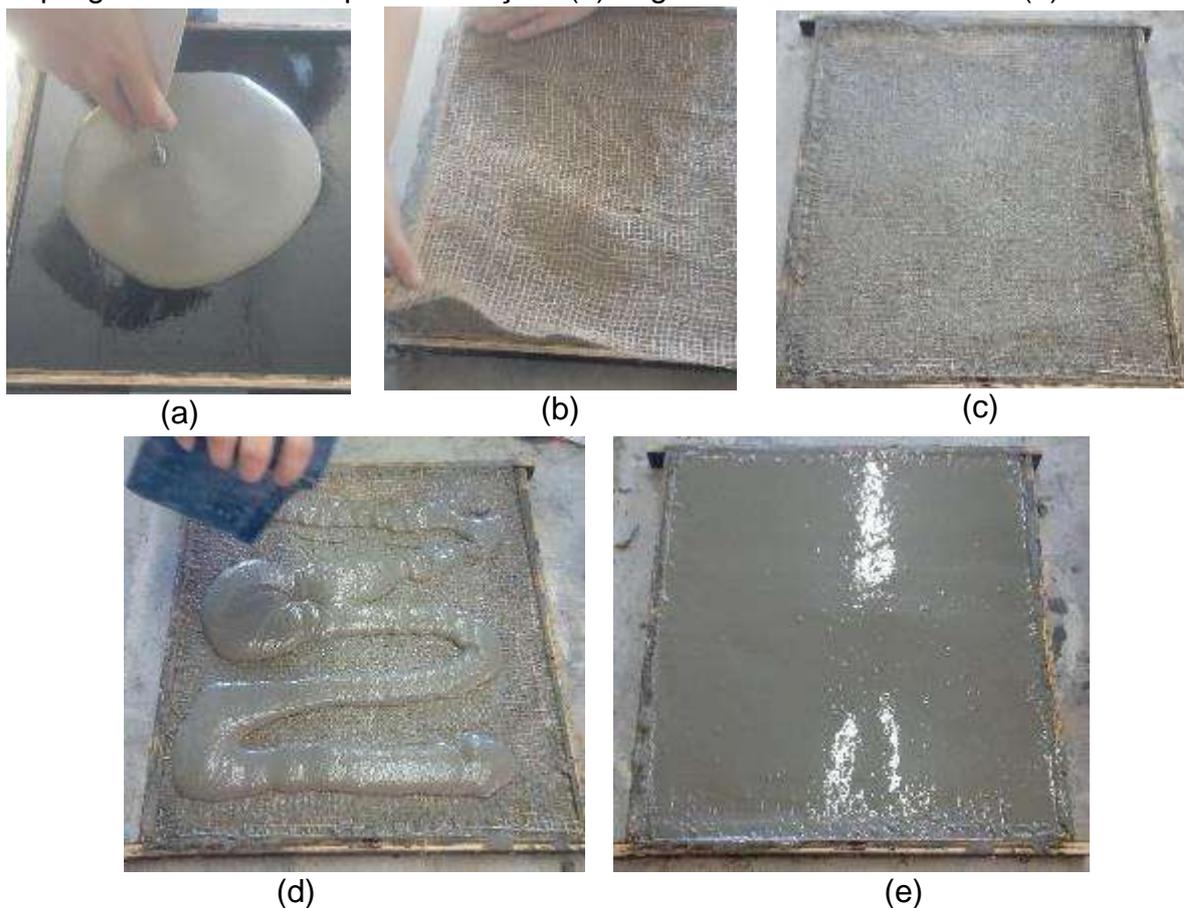


Fonte: Elaboração própria.

Para as amostras restantes que foram reforçadas com três ou cinco camadas de fibras, a matriz foi pesada para cada camada em que se intercalava uma de matriz e outra de tecido de juta. Na Figura 9- (a) mostra-se o lançamento da primeira camada de matriz na forma, e em sequência o posicionamento da primeira camada do tecido de juta, tomando o cuidado de garantir uma boa impregnação do tecido na camada como mostra a Figura 9- (b) e Figura 9- (c) respectivamente. E assim até que fosse

colocada a última camada de tecido, para que então fosse feita a aplicação da última camada da matriz como indicado na Figura 9- (d) com a qual foi feita a regularização da superfície do laminado de acordo com o ilustrado na Figura 9- (e).

Figura 9- Processo de produção dos compósitos reforçados com três ou cinco camadas. (a) Aplicação da matriz. (b) Colocação do reforço. (c) Reforço impregnado na matriz após colocação. (d) segunda camada de matriz. (e)



Fonte: Elaboração Própria.

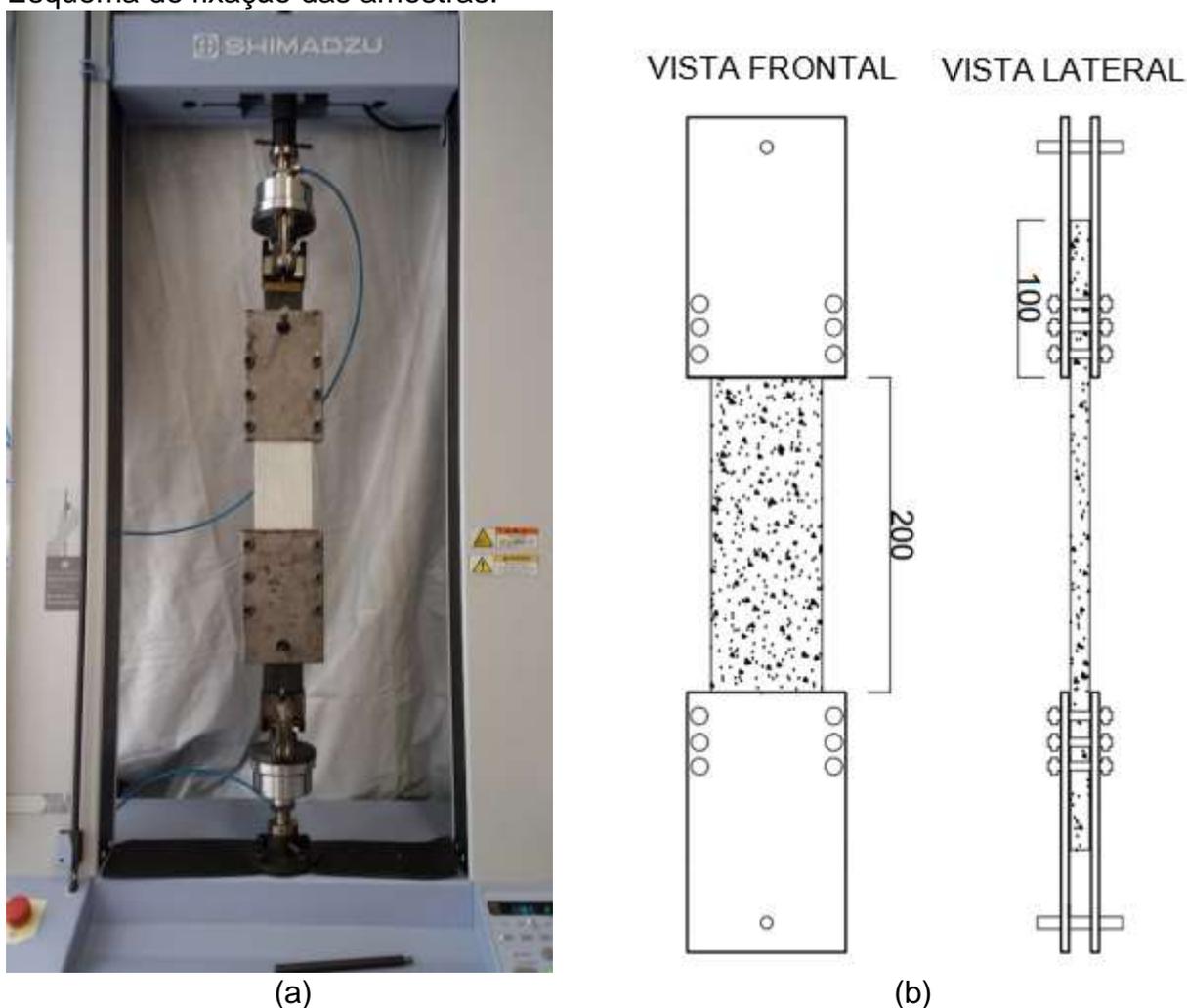
3.3. Ensaios de Tração Direta

As amostras ensaiadas a tração direta eram no formato de placa nas dimensões 7x40x1,2 cm (LxCxE cm), e foram ensaiadas na máquina de ensaios mecânicos Shimadzu AGS-X com capacidade máxima de 5 kN. A velocidade do ensaio foi controlada à 0,5 mm/min com célula de carga de 5 kN.

O ensaio transcorreu conforme a Figura 10- (a), onde as amostras foram tracionadas de maneira a obter os dados de capacidade de carga e o deslocamento correspondente da máquina. Através da Figura 10- (b) é possível visualizar melhor a

fixação das chapas de aço nas extremidades dos elementos, que foi realizada por meio de parafusos apertados com torquímetro, com o objetivo de evitar que houvesse escorregamento ou esmagamento da amostra.

Figura 10 – Ensaio de tração direta. (a) Configuração do ensaio de tração direta. (b) Esquema de fixação das amostras.



Fonte: Elaboração própria.

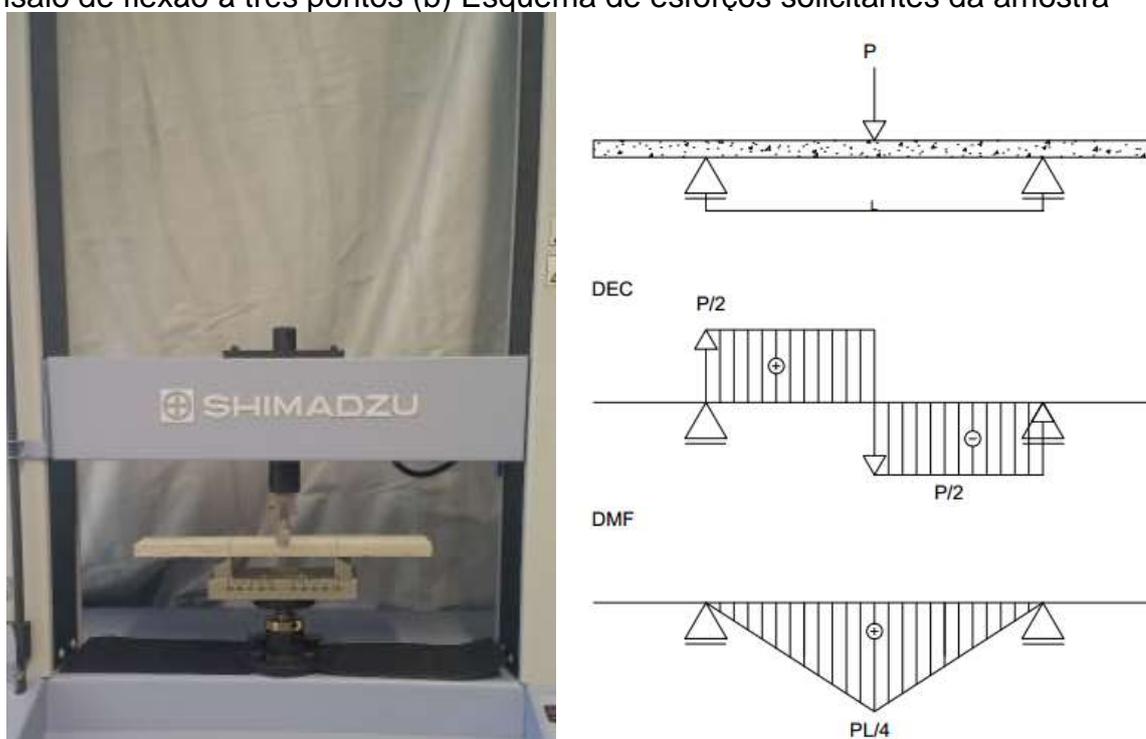
3.4. Ensaios de Tração Indireta

Foram realizados ensaios de flexão em 3 pontos para estudar o comportamento dos compósitos à tração indireta, obtendo através dos mesmos os valores de capacidade de força e o deslocamento correspondente da máquina. Os ensaios foram realizados na Shimadzu AGS-X com capacidade máxima de 5 kN, assim como nos ensaios à tração direta. Na Figura 11- (a) encontra-se a configuração do ensaio, para

a execução dos ensaios, foi utilizada célula de carga de 5 kN, com velocidade controlada de 0,2 mm/min.

Para este ensaio as amostras tinham dimensões de 5x40x1,2 cm onde a distância entre apoios é de 100 mm e o ponto de aplicação da força encontra-se centralizado no meio do vão (50 mm de cada apoio), na Figura 11- (b) ilustra-se o comportamento dos esforços solicitantes atuantes nos corpos de prova sujeitos à flexão à três pontos.

Figura 11- Configuração do ensaio de flexão em 3 pontos. (a) Configuração do ensaio de flexão à três pontos (b) Esquema de esforços solicitantes da amostra



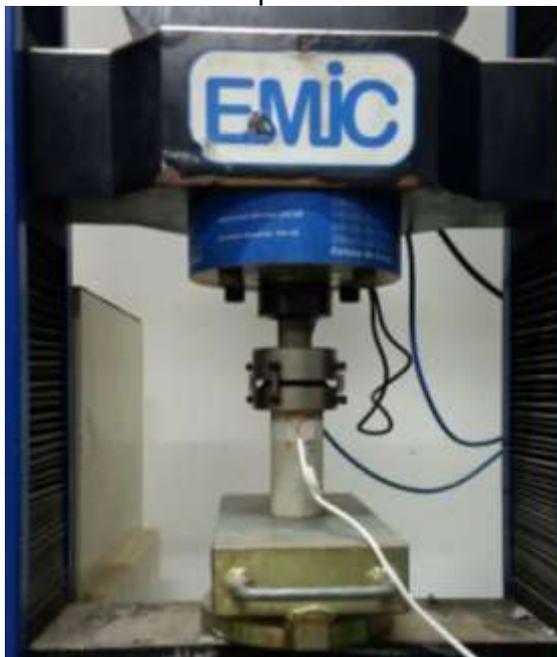
Fonte: Elaboração Própria.

3.5. Ensaio Para Obtenção do Comportamento à Compressão da Matriz Cimentícia

De acordo com a NBR 7215/96, foram moldados corpos de prova cilíndricos de dimensão 10x5 cm (HxD cm), para obtenção dos valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade das matrizes M1 e M2. Os corpos de provas foram ensaiados a compressão axial na máquina de ensaios mecânicos EMIC DL20000, com célula de carga de 200 kN, a uma velocidade de 0,5 mm/min. A deformação das matrizes foi obtida através da utilização de extensômetros, colados nas faces laterais de cada

corpo de prova como. É possível observar na Figura 12 a visão geral do ensaio de compressão axial.

Figura 12- Visão geral do ensaio de compressão axial.



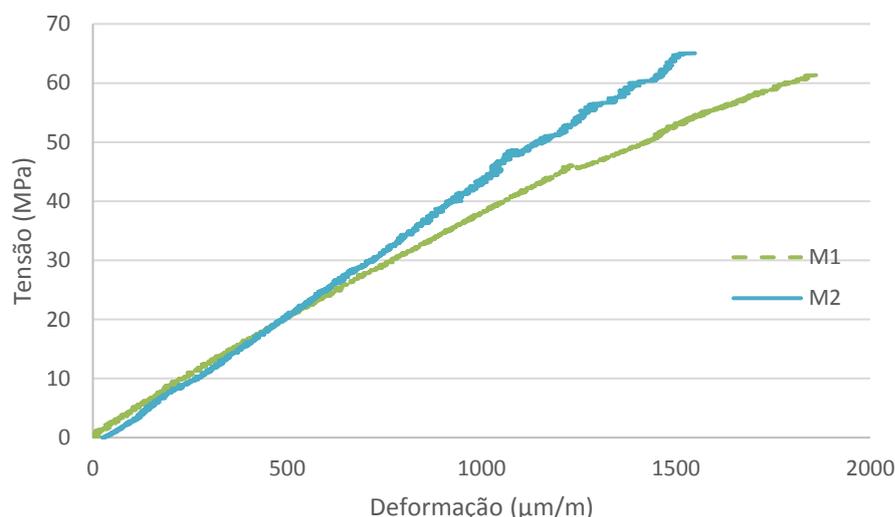
Fonte: Elaboração Própria.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Comportamento à Compressão das Matrizes

As matrizes M1 e M2 foram ensaiadas à compressão com o intuito de obter a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Os comportamentos das matrizes podem ser observados através da Figura 13, que mostra as curvas típicas de Tensão x Deformação. As curvas de todos os ensaios realizados encontram-se nos Apêndices A e B.

Figura 13- Curvas típicas Tensão x Deformação das matrizes M1 e M2.



Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 7 encontram-se os valores médios de módulo de elasticidade e resistência à compressão para cada uma das matrizes produzidas. Para o módulo de elasticidade é possível observar que a diferença entre os valores são pouco significativos e o valor médio é da ordem de 41GPa. No que tange a resistência à compressão, percebe-se que o uso da adição mineral de metacaulim proporcionou uma diminuição, de cerca de 19,59% na resistência à compressão em relação à mistura contendo somente cimento (M1).

Tabela 7- Resultados médios para o módulo de elasticidade e resistência à compressão das matrizes.

Matriz	Módulo de Elasticidade			Resistência à Compressão		
	E (GPa)	DP (GPa)	CV (%)	σ (MPa)	DV (MPa)	CV (%)
M1	40,52	52,91	13,06	72,68	10,77	14,82
M2	41,87	16,42	0,39	58,44	6,99	11,96

Fonte: Elaboração própria.

4.2. Comportamento à Tração Direta

Os ensaios de tração direta foram realizados para os compósitos contendo as matrizes M1 e M2. Na Tabela 8 encontram-se os valores médios de força máxima para cada compósito estudado, bem como os valores de desvio padrão e coeficiente de variação. No Apêndice C encontram-se os valores de força máxima para todos os corpos de prova ensaiados.

Tabela 8 – Resultados médios de força máxima, desvio padrão e coeficiente de variação para tração direta.

Compósitos	M1-0	M1-3	M1-5	M2-0	M2-3	M2-5
Força (N)	1205,52	307,11	338,83	1278,02	1025,40	967,82
DP (N)	702,73	*	189,37	551,52	591,20	447,72
CV (%)	58,29	*	55,89	43,15	57,66	46,26

*Não há DP ou CV, pois só um corpo de prova pôde ser ensaiado, devido à quebra das outras amostras moldadas durante o processo de corte ou cura das mesmas.

Fonte: Elaboração própria.

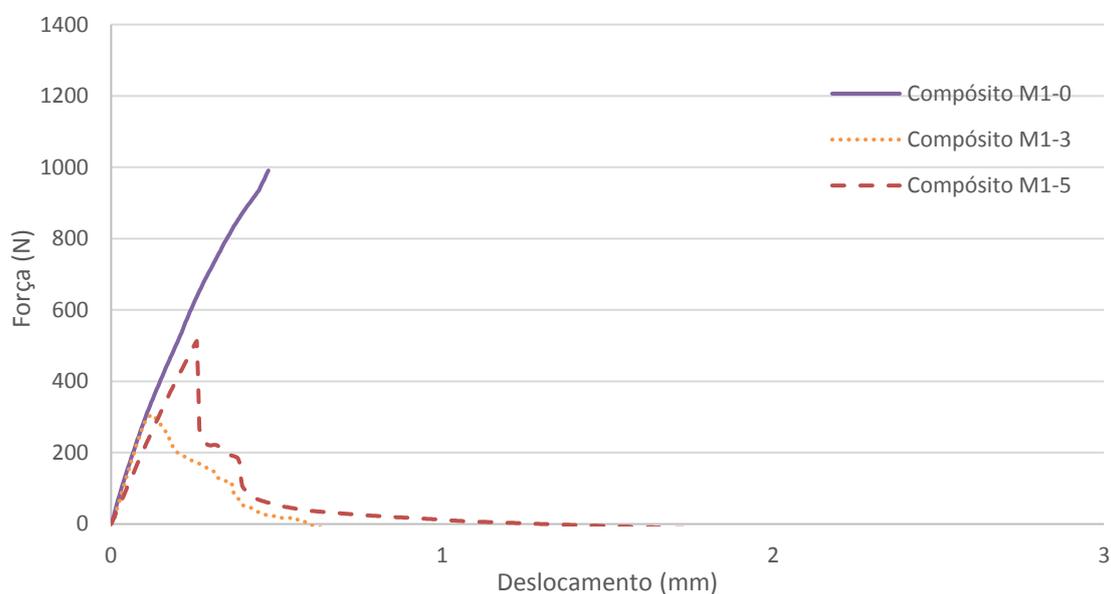
Ao observar a Tabela 8 é possível ver que os resultados apresentaram valores altos para o coeficiente de variação, compatível com os resultados vistos nas literaturas. As forças médias de pico são maiores para os compósitos com matriz M2-0, sendo que os compósitos sem reforço apresentam uma diferença pouco significativa de 5,68% em relação ao compósito M2-0 para o M1-0, mas para os compósitos com reforço essa diferença passa a ter valores significativos de 70,05% entre os compósitos com três camadas de reforço e 65% entre os compósitos com cinco camadas de reforço.

As grandes reduções nas forças de pico dos compósitos que contém 3 ou 5 camadas de reforço indicam que o volume de fibras inserido na matriz pode ser responsável pela perda na capacidade de carga de primeira fissura dos compósitos.

Uma das possíveis explicações para esse fenômeno é que a inserção das fibras na matriz cimentícia pode causar perturbação no arranjo granular dos compósitos, além disso a fluidez da matriz pode não ter sido suficiente para se impregnar entre os cordões do tecido.

Na Figura 14 e Figura 15 é possível visualizar o desempenho apresentado pelos compósitos com a matriz M1 e matriz M2 respectivamente, através das curvas típicas que apresentaram melhor comportamento.

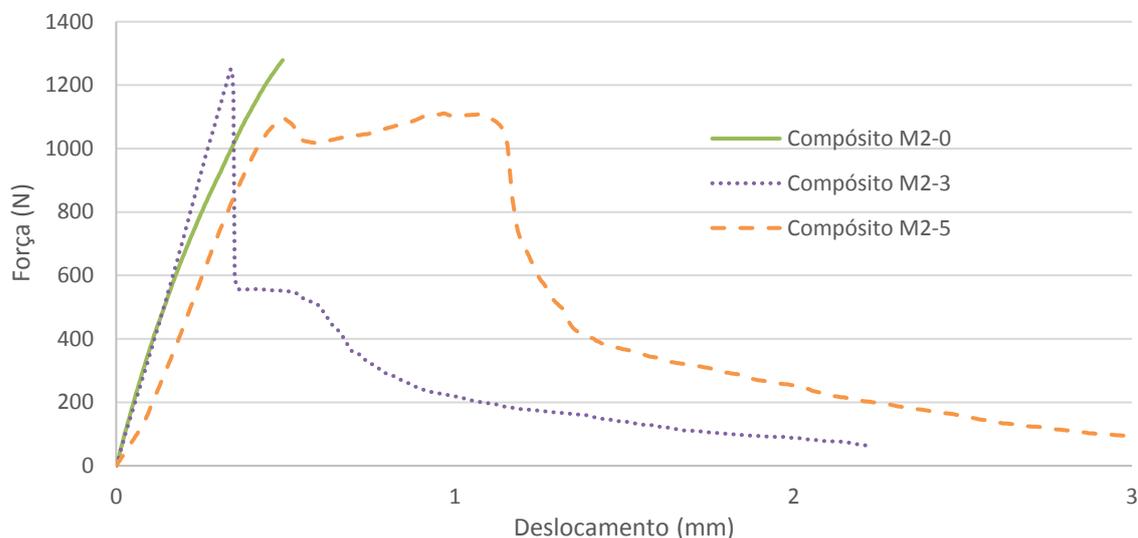
Figura 14 – Curvas típicas de Força x Deslocamento do comportamento à tração direta dos compósitos contendo a matriz M1.



Fonte: Elaboração própria.

De acordo a Figura 14 o compósito M1-0 apresentou a maior capacidade de carga entre os compósitos, mas com um comportamento frágil, enquanto os compósitos M1-3 e M1-5 tiveram uma redução significativa na capacidade de carga máxima, porém apresentou um comportamento "*strain softening*".

Figura 15 – Curvas típicas do comportamento à tração direta dos compósitos contendo a matriz M2.



Fonte: Elaboração própria.

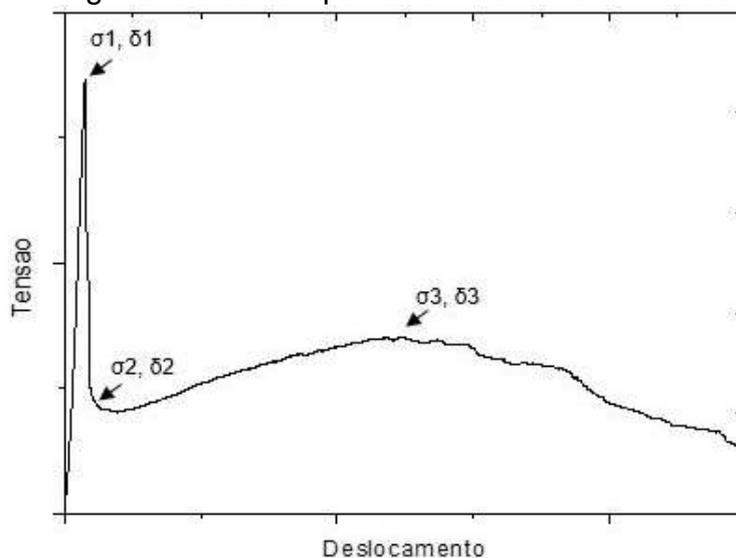
Segundo a Figura 15 a maior diferença entre os compósitos com matriz M2 é relacionada ao comportamento de ruptura que os compósitos apresentaram. Nota-se que o compósito M2-0 apresenta uma ruptura frágil, enquanto o compósito M2-3 têm um comportamento “*strain softening*”, por fim o compósito M2-5 apresentou ganho de resistência após atingir a força de pico, efeito proporcionado pela presença das fibras. Quando o deslocamento chega a 1,25mm a capacidade de carga do compósito M2-5 volta a cair, sem apresentar múltipla fissuração visível a olho nu. Pode-se concluir que o comportamento desse compósito contendo 5 camadas de fibras de juta apresenta comportamento “*strain hardening*”, caracterizado por apresentar a resistência a tração maior que a resistência à tração de primeira fissura.

4.3. Comportamento à Tração Indireta em Flexão à Três Pontos

Os compósitos com matriz M1 e M2, foram ensaiados a esforços de flexão a 3 pontos, com o intuito de estudar o comportamento do material à tração indireta. Para melhor avaliar e entender a diferença de comportamento entre os compósitos, fez-se uma comparação entre as tensões máximas nos pontos (σ_1, δ_1), (σ_2, δ_2) e (σ_3, δ_3). A Figura 16 mostra o comportamento apresentado por uma das amostras ensaiadas

a flexão, é possível através dessa figura verificar onde se localiza cada um dos pontos analisados.

Figura 16 – Curva genérica do comportamento sob flexão à três pontos.



Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 9 encontram-se os resultados de tensões médias, desvio padrão e coeficiente de variação para os respectivos pontos, no Apêndice D é possível ver os resultados separados para todos os corpos de prova ensaiados. As curvas típicas que melhor representam o comportamento apresentado pelos compósitos encontram-se na Figura 17, Figura 18 e Figura 19 e estão separadas de acordo com a quantidade de reforço utilizada nos compósitos na seguinte ordem: sem reforço, três e cinco camadas de reforço.

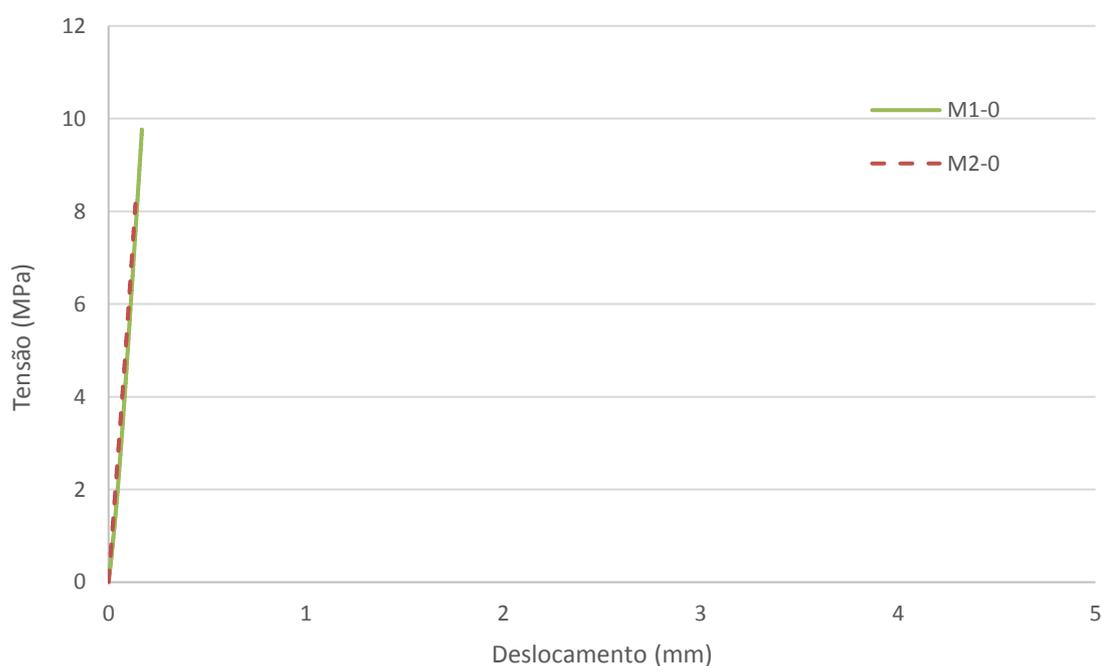
Tabela 9 - Tensões médias, desvio padrão, coeficiente de variação e deslocamento correspondente para os pontos (σ_1, δ_1), (σ_2, δ_2) e (σ_3, δ_3) do gráfico Tensão x Deslocamento.

Pontos	σ_1, δ_1				σ_2, δ_2				σ_3, δ_3			
	σ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	δ (mm)	σ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	δ (mm)	σ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	δ (mm)
M1-0	14,4	6,7	46,6	0,18	-	-	-	-	-	-	-	-
M1-3	10,3	2,7	20,8	0,16	0,98	0,2	20,6	0,37	1,0	0,4	44,6	2,08
M1-5	4,3	0,2	4,6	0,13	0,78	0,05	6,0	0,38	0,9	0,09	9,2	1,46
M2-0	9,6	1,4	14,9	0,19	-	-	-	-	-	-	-	-
M2-3	10,8	2,3	21,3	0,21	0,83	0,11	13,6	0,29	1,1	0,1	9,8	2,58
M2-5	6,2	0,06	0,9	0,16	2,13	0,26		0,17	2,7	0,09	3,2	2,56

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 17 é possível comparar os compósitos chamados de referência, M1-0 e M2-0. Como era esperado, ambos apresentaram comportamento frágil, rompendo-se no momento em que a amostra atinge a força máxima de pico. Verifica-se também que o compósito M1-0 apresenta uma tensão média de pico mais elevada que o compósito M2-0, sendo elas 14,43 MPa e 9,68 MPa, respectivamente.

Figura 17 – Curva típica do comportamento à flexão em 3 pontos das matrizes M1-0 e M2-0.

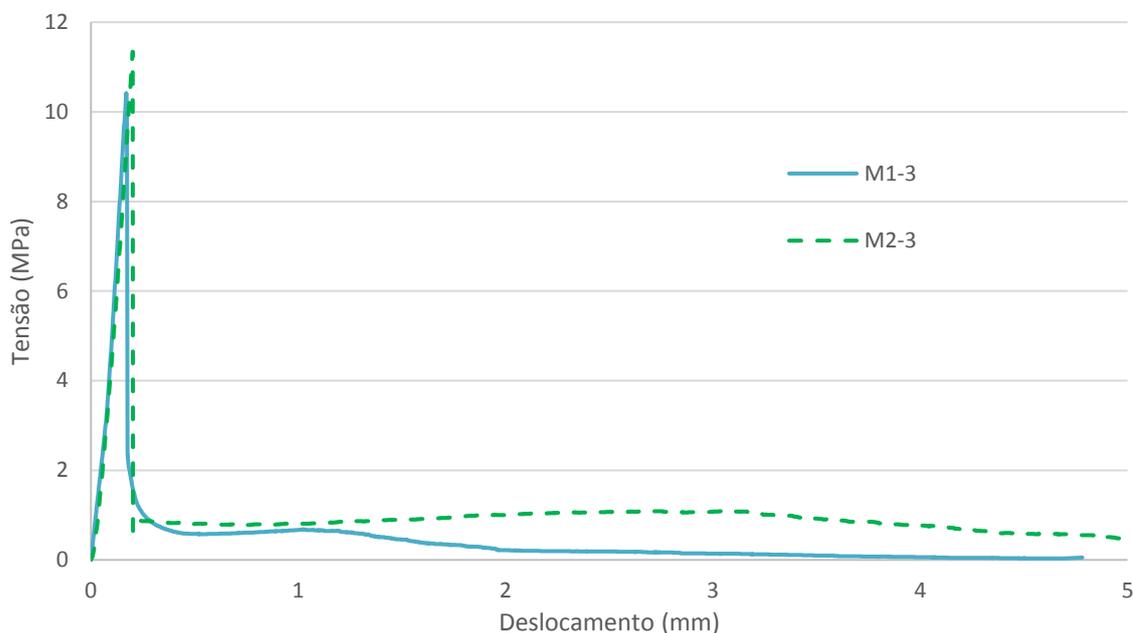


Fonte: Elaboração própria.

De acordo com a Figura 18 é possível observar as curvas típicas das matrizes que ilustram o comportamento dos compósitos M1-3 e M2-3, as tensões médias máximas de pico são muito próximas entre ambos, são elas 10,38 MPa e 10,82 MPa respectivamente, correspondendo a um aumento de 4,23%.

Diferentemente do observado para as curvas mostradas na Figura 17, esses compósitos não apresentaram comportamento totalmente frágil, pois logo após atingir a tensão de pico a resistência do compósito cai consideravelmente, mas não há o rompimento brusco do material (ruptura total dividindo a amostra em duas partes). A capacidade de carga é baixa, porém mantém-se quase constante a medida que a abertura de fissura vai aumentando.

Figura 18 – Curvas típicas do comportamento à flexão em 3 pontos dos compósitos M1-3 e M2-3.

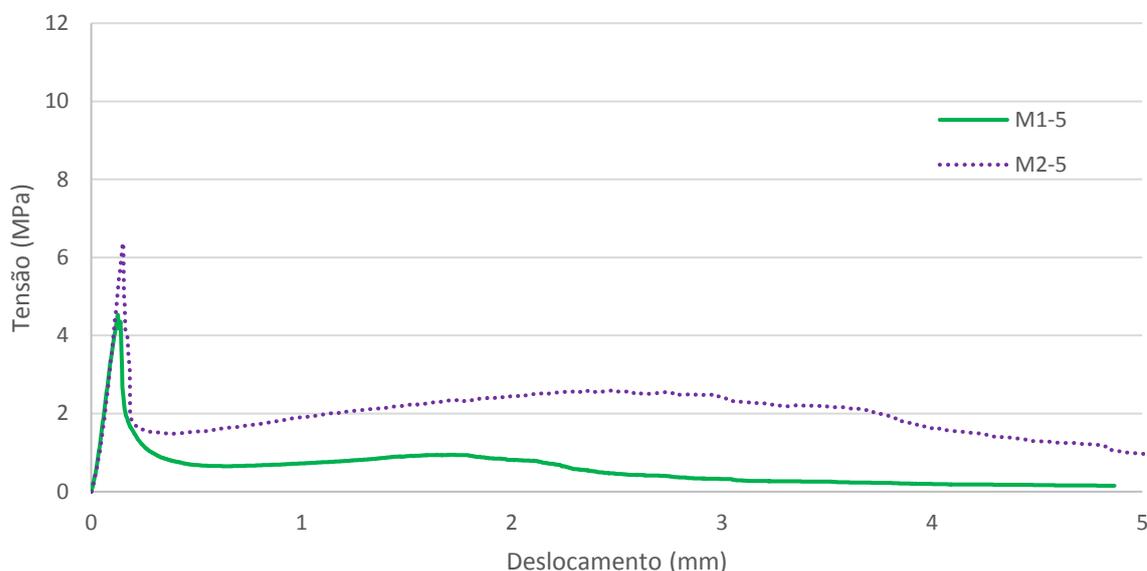


Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 19, os compósitos contêm 5 camadas de reforço de tecido de juta. Assim como os compósitos M1-3 e M2-3 da figura anterior, o comportamento desse material também não é frágil, além disso, a capacidade de carga pós pico é mais elevada que os compósitos apresentados na Figura 18, apresentando um acréscimo na capacidade de carga até determinado deslocamento, onde a capacidade volta a cair gradativamente.

A tensão média de pico para os compósitos M2-5 foi de 6,23 MPa e 4,31 MPa e para M1-5, representando uma redução de 30,81% dos compósitos com matriz M2 para os compósitos com matriz M1. Além disso, é possível observar que há redução na capacidade de carga de primeira fissura dos compósitos M1-5 e M2-5 para os compósitos M1-3 e M2-3, sugerindo mais uma vez que o volume de fibras inserido na matriz interfere diretamente na redução da capacidade de carga de primeira fissura.

Figura 19- Curvas típicas do comportamento a flexão em 3 pontos dos compósitos M1-5 e M2-5.



Fonte: Elaboração própria.

Anteriormente foi analisado as tensões de pico da Tabela 9, pois é o ponto coincidente ao momento de ruptura. Agora todos os dados estão reproduzidos na Figura 20 (matriz M1) e Figura 21 (matriz M2), através de gráficos de barras que permitem uma melhor compreensão da diferença de comportamento ponto a ponto para os compósitos .

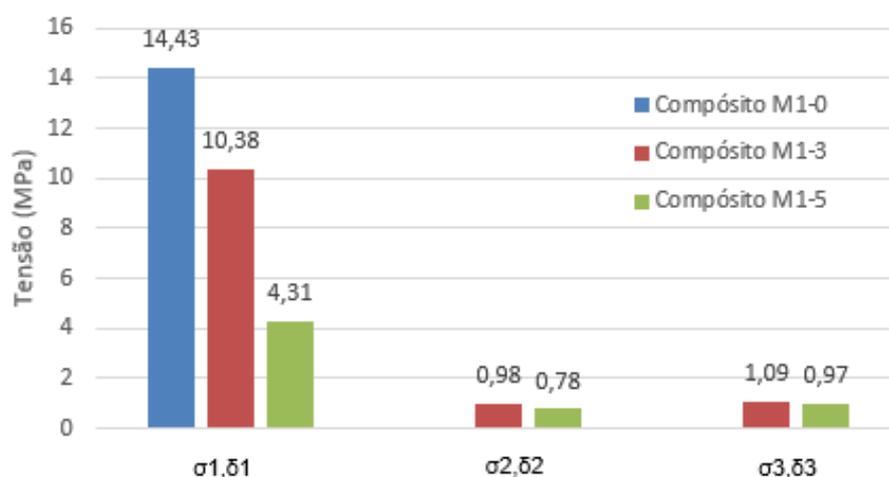
Na Figura 20 o compósito M1-0 apresenta a maior tensão média de pico (σ_1), seguido pelos compósitos M1-3 e M1-5 respectivamente, sugerindo a redução na capacidade de carga máxima dos compósitos de acordo com o aumento no teor de fibras usado no reforço. A redução nas tensões de pico do compósito M1-0 para o compósito M1-3 é de 28,06% enquanto que para o compósito M1-5 é de 70,13%.

A tensão no ponto σ_2 representa a queda máxima ou mínima tensão atingida pelos compósitos após atingir a tensão de pico e antes de voltar a recuperar a capacidade de carga proporcionada pelo uso das fibras, a máxima tensão atingida após o ponto σ_2 é a tensão σ_3 . No caso dos compósitos M1-0 as tensões σ_2 e σ_3 não existem, pois, os compósitos não contêm camada de reforço que possa redistribuir as tensões após a matriz atingir a tensão de pico.

A queda de tensão do ponto σ_1 para o ponto σ_2 , foi de 90,55% e 81,90% para os compósitos M1-3 e M1-5, respectivamente. Nota-se que tanto para os compósitos

M1-3 e M1-5 as tensões σ_3 foram maiores que as σ_2 , representando um acréscimo de 11,22% e 24,35%, respectivamente.

Figura 20 – Tensões médias dos compósitos contendo matriz M1, conforme os pontos analisados.

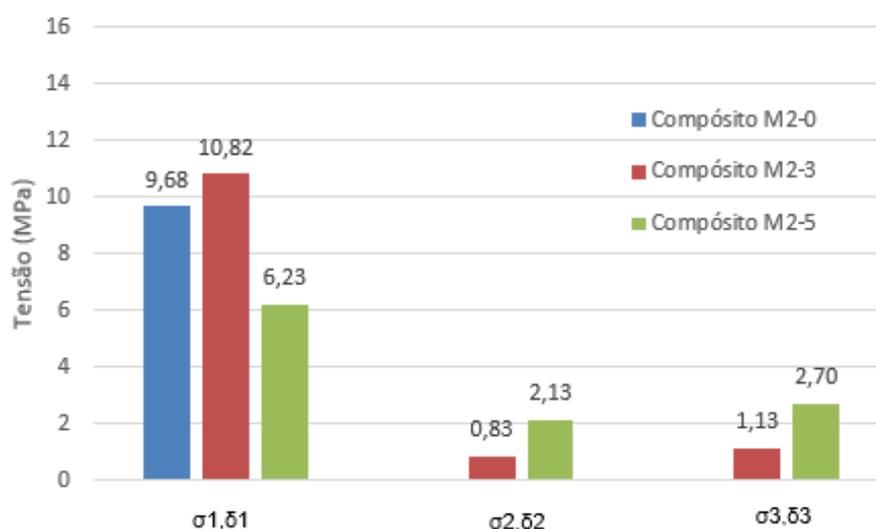


Fonte: Elaboração própria.

A Figura 21 mostra que diferentemente dos compósitos produzidos com a matriz M1, a tensão média de pico σ_1 é maior para o compósito M2-3, seguida dos compósitos M2-0 e então M2-5. A redução nos valores das tensões σ_1 é de 10,53% do compósito M2-3 para o compósito M2-0, já para o compósito M2-5 representa uma redução de 42,42%.

A queda de σ_1 para a σ_2 é de 92,32% no compósito M2-3 e de 65,81% para o compósito M2-5. Além disso, o ganho de capacidade de carga indicado pela tensão σ_3 é de 36,14% para o compósito M2-3, enquanto o compósito M2-5 o ganho é de capacidade de carga de 26,76%.

Figura 21 - Tensões médias dos compósitos contendo matriz M2, conforme os pontos analisados.



Fonte: Elaboração própria.

Além da diferença nos valores de tensões para cada um dos pontos analisados nos gráficos, também foi feita a análise das tenacidades dos compósitos. Foram analisadas as tenacidades para quatro instantes distintos, sendo eles: deslocamento correspondente a tensão de pico, deslocamento em 0,5 mm, 2 mm e 5 mm. As tenacidades médias encontradas, assim como desvio padrão e coeficiente de variação para cada um dos instantes encontram-se na Tabela 10. Os valores individuais por corpo de prova ensaiados encontram-se nos Apêndices F e G.

Tabela 10 – Tenacidades para os diferentes instantes analisados.

Pontos		Compósitos					
		M1-0	M1-3	M1-5	M2-0	M2-3	M2-5
Pico	Média (kJ)	0,048	0,046	0,022	0,068	0,061	0,035
	DP (kJ)	0,028	0,009	0,002	0,020	0,017	0,002
	CV (%)	58,66	19,94	10,58	29,61	28,39	5,593e
0,5 mm	Média (kJ)	-	0,074	0,051	-	0,085	0,088
	DP (kJ)	-	0,002	0,004	-	0,016	0,002
	CV (%)	-	2,136	7,042	-	18,372	2,756
2 mm	Média (kJ)	-	0,129	0,142	-	0,212	0,380
	DP (kJ)	-	0,009	0,008	-	0,023	0,007
	CV (%)	-	6,724	5,691	-	10,977	1,956
5 mm	Média (kJ)	-	0,174	0,216	-	0,418	0,849
	DP (kJ)	-	0,058	0,004	-	0,016	0,029
	CV (%)	-	33,255	1,706	-	3,735	3,456

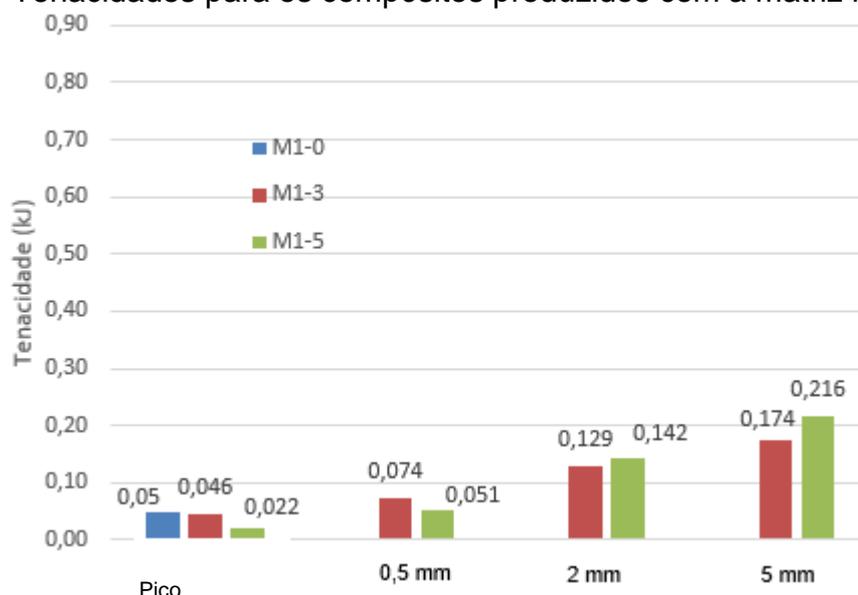
Fonte: Elaboração própria.

Nas Figura 22 e Figura 23 pode-se visualizar as diferenças nos valores de tenacidade para cada instante estabelecido. Sendo que a Figura 22 refere-se aos compósitos produzidos a partir da matriz M1, enquanto a Figura 23 trata-se dos compósitos produzidos com a matriz M2.

É possível visualizar na Figura 22 que as tenacidades médias para os compósitos M1-0 e M1-3 são muito próximas, porém o valor diminui aproximadamente pela metade quando comparado ao compósito M1-5 quando se trata da tenacidade de pico (σ_1 , δ_1). Para os demais instantes analisados só há tenacidade para os compósitos M1-3 e M1-5, devido à presença das fibras

O valor da tenacidade aumenta gradativamente no decorrer do deslocamento, no entanto, para os compósitos M1-5 a tenacidade sofre uma redução no instante de pico e para o deslocamento de 0,5 mm, em 52,17% e 31,08% respectivamente, quando comparado ao compósito M1-3. Por outro lado, esse comportamento correspondente aos deslocamentos de 2 mm e 5 mm sofrem alteração, onde os compósitos M1-5 passam a apresentar ganho de tenacidade, sendo 10,07% para o deslocamento de 2 mm e 24,13% para o deslocamento de 5 mm.

Figura 22- Tenacidades para os compósitos produzidos com a matriz M1.



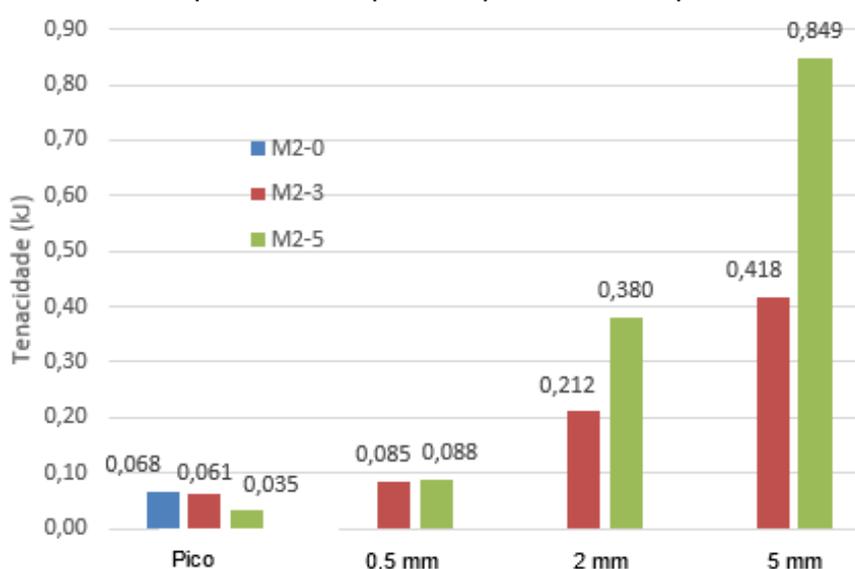
Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 23 ilustra-se o comportamento dos compósitos M2-0, M2-3 e M2-5 para os mesmos instantes citados anteriormente. Verifica-se que para esses compósitos o comportamento de pico é muito semelhante aos compósitos produzidos

com a matriz M1, o compósito M2-0 e M2-3 apresentam valores muito próximos enquanto o compósito M2-5 tem o valor de tenacidade reduzido pela metade.

Para o deslocamento de 0,5 mm a tenacidade é de 0,085 kJ para o compósito M2-3, e de 0,088 kJ para o compósito M2-5, apresentando um ganho de 3,52%. Para os deslocamentos de 2 mm e 5 mm o ganho percentual dos compósitos M2-5 comparado ao M2-3 corresponde a 79,24% e 103,11%, respectivamente. Portanto, quando se trata do instante de pico os compósitos reforçados com 5 camadas apresentam aproximadamente metade da tenacidade que os compósitos M2-0 e M2-3, porém quando se trata do pós-pico o desempenho dos compósitos M2-5 em relação a tenacidade é muito maior.

Figura 23- Tenacidades para os compósitos produzidos a partir da matriz M2.



Fonte: Elaboração própria.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que se refere ao comportamento à compressão, os valores de módulo de elasticidade não foram alterados com uso da adição mineral de metacaulim em teor de 50% e o valor encontrado foi de cerca de 40 GPa. No que tange a resistência à compressão, a substituição de cimento Portland por metacaulim ocasionou uma redução de 19,59%.

Quanto ao comportamento à tração direta os compósitos reforçados com fibras de juta sem adição mineral apresentaram grande queda na capacidade de carga de primeira fissura quando comparado aos compósitos sem fibras. No entanto o uso das fibras como reforço não afetou a capacidade de carga nos compósitos com 50% de adição mineral. O uso de 3 camadas de reforço conseguiu uma leve melhora no comportamento do material, permitindo a ruptura quase frágil para ambas as matrizes, enquanto que o uso de 5 camadas de reforço associado ao uso da adição mineral, foi o compósito que proporcionou um comportamento “*strain hardening*”.

No que se refere ao comportamento à tração indireta a matriz sem adição mineral apresentou resultados coerentes aos resultados à compressão, pois os compósitos sem reforço obtiveram melhor desempenho que os compósitos sem reforço produzidos a partir da matriz com 50% de substituição parcial por metacaulim no que tange a resistência máxima. No entanto, os compósitos quando reforçados com fibras tiveram melhores desempenhos quanto a capacidade de absorção de energia, quando produzidos com substituição parcial do cimento Portland por metacaulim. Além disso, a capacidade de carga de primeira fissura foi diretamente influenciada pelo número de camadas de reforço foi utilizada, notou-se que quanto maior o teor de fibras presente no compósito menor a capacidade de carga da primeira fissura.

Ao comparar os valores de tenacidade dos compósitos produzidos com a matriz M1 e matriz M2 nota-se que os compósitos com matriz M2 alcançaram valores de tenacidades muito maiores que os compósitos com matriz M1. Quanto ao número de camadas de reforço, o desempenho dos compósitos com 5 camadas foi superior ao de 3 camadas, ou seja, o compósito M2-5 foi apresentado um desempenho superior em relação aos outros compósitos.

Pode-se concluir que para à tração indireta que quanto maior o volume de fibras inserido na matriz menor a capacidade de carga de primeira fissura, porém quanto maior o volume de fibras maior a capacidade de carga pós pico.

Por fim, o uso da adição mineral em substituição parcial de 50% trouxe efeitos benéficos para os compósitos, tanto os resultados à tração direta e indireta apresentaram um desempenho superior aos resultados dos compósitos com a matriz à base de cimento. Para os compósitos com 5 camadas de reforço de fibra permitiram melhor comportamento de ruptura quanto à tração direta e referente à tração indireta permitiu uma maior capacidade de deformação. Entretanto as 5 camadas de reforço reduzem significativamente a capacidade de carga de primeira fissura.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para melhor caracterização dos compósitos reforçados com fibras de juta ainda são necessários realizar mais estudos. Sugere-se que os principais pontos abordados nos próximos trabalhos sejam os seguintes:

- Realizar tratamentos químicos na fibra de juta.
- Utilizar uma matriz mais fluída para a produção dos compósitos.
- Realizar ensaios de termogravimetria para melhor avaliar o consumo de hidróxido de cálcio proporcionado pela adição mineral.
- Refazer os ensaios de tração direta de forma a buscar menores valores para o desvio padrão.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira da Batata, A.B.B.A. Itapetinga, SP, mai. 2001. Disponível em: <http://www.abbabatatabrasileira.com.br/revista01_013.htm>. Acesso em: 24 abr. 2017, 12:30.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**: 2 Ed. London and New York: Taylor & Francis Group, 2007.

DEFOIRDT, N. et al. Assessment of the tensile properties of coir, bamboo and jute fibre. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 41, p. 588–595, 2010.

Castanhal Companhia Têxtil, Castanhal, PA, 2013. Disponível em: <<http://www.castanhal.com.br/A-Juta.html>>. Acesso em: 25 abr. 2017, 15:00.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In:ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto, ensino, pesquisa e realizações**. Campinas: Ed. UNICAMP, 2005. p. 345-379.

GRAM, H.E. **Durability of natural fibres in concrete**. Stockolm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1983.

FIDELIS, M. E. A. et al. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 2, p. 149–157, 2013.

FIDELIS, M. E. A. **Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta**. 2014. 266 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

FIDELIS, M. E. A. et al. The effect of accelerated aging on the interface of jute textile reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 74, p. 7–15, 2016.

LIMA, P. R. L. **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal**. 2004. 262 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

LIMA, P. R. L. TOLEDO FILHO, R. D. Uso de metacaulinita para incremento da durabilidade de compósitos à base de cimento reforçados com fibras de sisal. **Ambiente Construído**, v. 8, p.7-19, 2008.

MELO FILHO, J. A. **Desenvolvimento e caracterização de laminados cimentícios reforçados com fibras longas de sisal**. 2005. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MELO FILHO, J. A. **Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibra de sisal**. 2012. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MELO FILHO, J. A. et al. Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems. **Cement & Concrete Composites**, v. 40 p. 30–39, 2013.

MENDES, G. G. **Durabilidade de concretos com adição de sílica da casca de arroz à penetração de íons cloretos**. 2014. 53 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete. 2014.

Metacaulim do Brasil, São Paulo, Disponível em:
<<http://www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html>>
Acesso em: 26 mai. 2017, 18:50.

PIRES, N. E. **Efeito do tratamento de superfície em fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi**. 2009. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) –Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

Revista Globo Rural, Itapetinga, SP, out. 2010. Disponível em: <<http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,,EMI183007-18283,00-GENTE+DE+FIBRA.html>>. Acesso em: 24 abr. 2017, 15:30.

SILVA, F. A. **Durabilidade e propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados por fibras de sisal**. 2009. 243 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

TOLEDO FILHO, R. D. et al. Durability of Compression Molded Sisal Fiber Reinforced Mortar Laminates. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2409 - 2420, 2009.

TOMCZAK, F. **Estudos sobre a estrutura e propriedade de fibras de coco e curauá do Brasil**. 2010. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

VELASCO, R. V. **Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas**. 2008. 349 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008

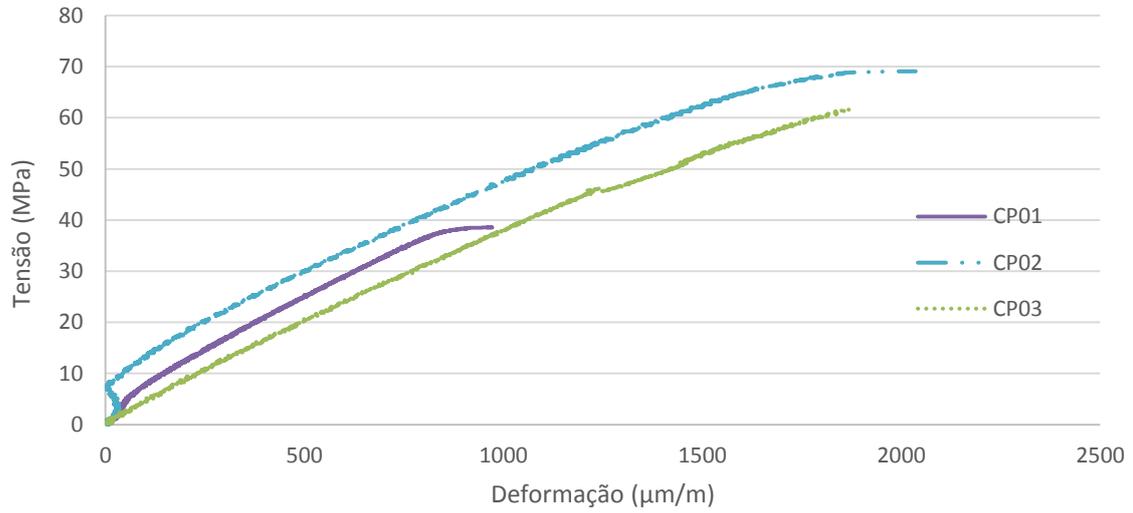
.

WEI J. MEYER C. Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites. **Cement and Concrete Research**, v. 73, p.1-16, 2015.

WEI J. MEYER C. Utilization of rice husk ash in green natural fiber-reinforced cement composites: Mitigating degradation of sisal fiber. **Cement and Concrete Research**, v. 81, p.94-111, 2016.

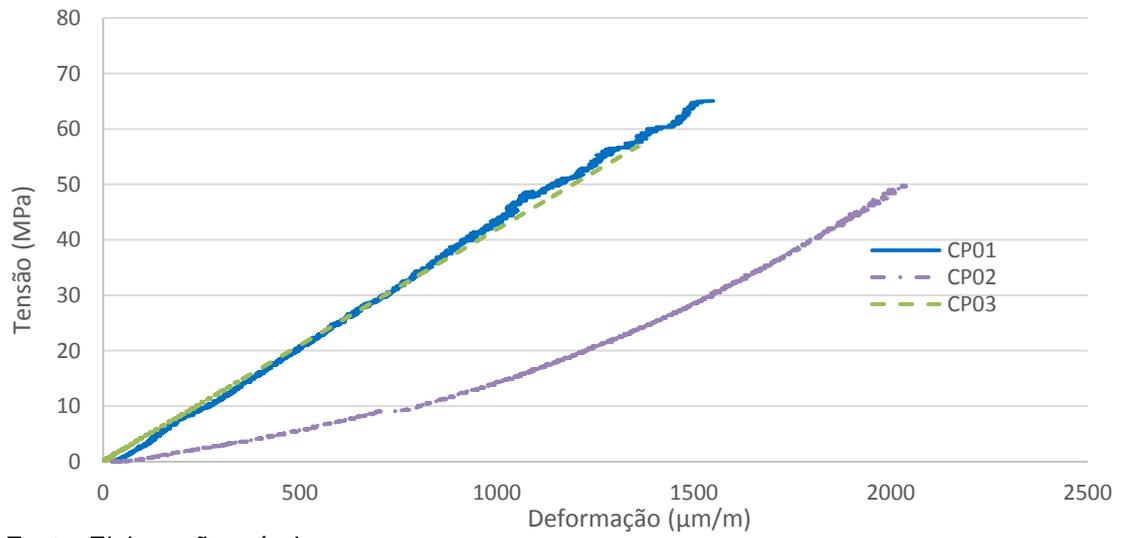
APÊNDICES

APÊNDICE A - Curvas Tensão x Deformação dos corpos de prova produzidos com a matriz M1.



Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE B - Curvas Tensão x Deformação dos corpos de prova produzidos com a matriz M2.



Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE C - Resultados por corpo de prova para todos os compósitos produzidos, obtidos através dos ensaios de tração direta.

Compósito	Força máxima (N)			
	CP01	CP02	CP03	CP04
M1-0	622,78	990,73	1227,08	1981,48
M1-3	307,11	*	*	*
M1-5	492,23	176,34	173,66	513,08
M2-0	829,96	1725,40	1278,69	*
M2-3	566,81	1701,53	583,91	1249,33
M2-5	1722,56	353,85	682,89	1111,98

*Corpo de prova com não existiu para esse compósito.

Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE D - Resultados por corpo de prova para a matriz M1, obtidos através dos ensaios de flexão à três pontos.

Tensão (MPa)	M1-0			M1-3				M1-5				
	CP01	CP02	CP03	CP01	CP02	CP03	CP04	CP01	CP02	CP03	CP04	CP05
σ_1	21,56	13,57	8,17	45,64	8,19	10,42	12,52	4,53	4,14	4,74	4,27	6,57
σ_2	-	-	-	4,74	1,16	0,76	1,03	0,70	0,81	0,81	0,73	1,22
σ_3	-	-	-	1,63	-	0,68	0,97	0,94	1,08	0,75	0,90	1,77

*Valores tachados não foram utilizados para o cálculo das médias, desvio padrões e coeficientes de variação.

Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE E - Resultados por corpo de prova para a matriz M2, obtidos através dos ensaios de flexão à três pontos.

Tensão (MPa)	M2-0			M2-3				M2-5				
	CP01	CP02	CP03	CP01	CP02	CP03	CP04	CP01	CP02	CP03	CP04	CP05
σ_1	9,82	8,17	11,05	7,14	12,81	11,34	8,29	6,28	6,24	5,39	4,97	6,17
σ_2	-	-	-	0,71	0,59	0,94	0,85	1,90	2,41	2,07	1,19	1,34
σ_3	-	-	-	0,86	1,02	1,24	1,12	2,74	2,60	3,06	2,76	2,37

*Valores tachados não foram utilizados para o cálculo das médias, desvio padrões e coeficientes de variação.

Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE F - Resultados de tenacidade por corpo de prova para os compósitos produzidos com a matriz M1.

Compósitos		b (mm)	h (mm)	Pico		0,5mm		2mm		5mm	
				Área sob o Gráfico	Tenacidade (kJ)	Área sob o Gráfico	Tenacidade (kJ)	Área sob o Gráfico	Tenacidade (kJ)	Área sob o Gráfico	Tenacidade (kJ)
M1-0	CP01	52,90	12,00	46,21	0,073	-	-	-	-	-	-
	CP02	52,10	11,40	31,08	0,052	-	-	-	-	-	-
	CP03	49,00	12,10	10,43	0,018	-	-	-	-	-	-
M1-3	CP01	55,00	7,63	21,48	0,051	35,30	0,084	73,20	0,174	152,14	0,362
	CP02	47,50	10,30	15,29	0,031	35,74	0,073	59,34	0,121	64,24	0,131
	CP03	46,00	10,33	24,79	0,052	35,92	0,076	60,98	0,128	71,30	0,150
	CP04	48,00	7,93	13,58	0,036	27,66	0,073	52,75	0,139	91,08	0,239
M1-5	CP01	51,00	11,17	13,85	0,024	31,26	0,055	81,80	0,144	120,86	0,212
	CP02	51,52	10,86	10,50	0,019	26,97	0,048	85,10	0,152	123,33	0,220
	CP03	50,43	11,68	13,35	0,023	30,77	0,052	78,16	0,133	126,36	0,215
	CP04	50,53	11,18	8,62	0,015	26,66	0,047	79,04	0,140	123,13	0,218
	CP05	49,00	8,86	9,62	0,022	32,04	0,074	88,37	0,204	146,89	0,338

*Valores tachados não foram utilizados para o cálculo das médias, desvios padrões e coeficientes de variação.

Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE G - Resultados de tenacidade por corpo de prova para os compósitos produzidos com a matriz M2.

Compósitos		b (mm)	h (mm)	Pico		0,5mm		2mm		5mm	
				Área sob o Gráfico	Tenacidade(kJ)						
M2-0	CP01	53,20	12,50	44,70	0,067	-	-	-	-	-	-
	CP02	51,10	13,20	32,22	0,048	-	-	-	-	-	-
	CP03	47,80	12,90	54,13	0,088	-	-	-	-	-	-
M2-3	CP01	54,70	12,60	30,27	0,044	46,97	0,068	101,61	0,147	186,41	0,270
	CP02	48,70	13,06	66,87	0,105	79,50	0,125	151,31	0,238	274,44	0,431
	CP03	52,00	12,00	48,95	0,078	61,80	0,099	126,46	0,203	263,05	0,422
	CP04	49,00	13,00	38,32	0,060	55,18	0,087	123,63	0,194	255,37	0,401
M2-5	CP01	47,50	13,20	21,02	0,034	56,72	0,090	242,10	0,386	545,77	0,870
	CP02	48,80	12,70	21,21	0,034	61,54	0,099	230,29	0,372	522,92	0,844
	CP03	52,40	13,30	26,33	0,038	60,87	0,087	265,84	0,381	749,21	1,075
	CP04	53,20	12,76	23,1	0,034	46,44	0,068	172,01	0,253	592,05	0,872
	CP05	48,20	12,33	25,04	0,042	50,93	0,086	194,36	0,327	481,10	0,810

*Valores tachados não foram utilizados para o cálculo das médias, desvios padrões e coeficientes de variação.

Fonte: Elaboração própria.