

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

EMANUELE EICHHOLZ

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UMA MATRIZ CIMENTÍCIA
COM ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE E REFORÇADA COM TECIDO DE JUTA**

**Alegrete
2017**

EMANUELE EICHHOLZ

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UMA MATRIZ CIMENTÍCIA
COM ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE E REFORÇADA COM TECIDO 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: Prof. Dr. Ederli Marangon

**Alegrete
2017**

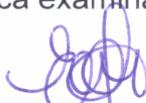
EMANUELE EICHHOLZ

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UMA MATRIZ CIMENTÍCIA
COM ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE E REFORÇADA COM TECIDO DE JUTA**

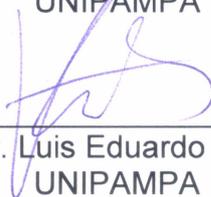
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27 de novembro de
2017.

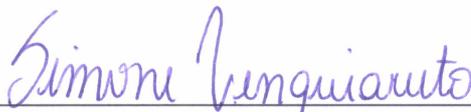
Banca examinadora:



Prof. Dr. Ederli Marangon
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Dr. Luis Eduardo Kostascki
UNIPAMPA



Prof. Dr.^a. Simone Dorneles Venquiaruto
UNIPAMPA

AGRADECIMENTO

A Deus, por todas as bênçãos concedidas diariamente a mim.

A toda a minha família, pelo o incentivo e apoio. Ao meu pai, por todo esforço feito para que eu pudesse concluir essa etapa.

Ao meu namorado, por nunca ter deixado a distância ser um empecilho para se fazer presente; por sempre me ajudar no que lhe é possível e por ter me ensinado a ter paciência e fé.

A todos os amigos que tive a felicidade de conhecer durante a vida. Aos que estão distantes, pelo apoio e motivação. A Mônica e a Nadine, pela amizade desde o primeiro dia de faculdade até o último; por todos os momentos que passamos juntas e principalmente pela companhia nas inúmeras e intermináveis horas de estudos. Ao Alan, por sempre manter a calma e achar uma solução para os trabalhos que pareciam impossíveis e por saber explicar aquelas questões difíceis como ninguém. A Camila, por ter se aproximado de mim quando eu mais precisei e ter se mostrado uma amiga incrível. Em suma, a todos aqueles colegas com os quais compartilhei momentos de alegria, festas, desespero, cansaço e alívio durante esses anos de graduação e que de alguma maneira ou de outra me ajudaram nessa difícil caminhada.

A todos os professores da Unipampa, por todos conhecimentos transmitidos ao passar desses anos. Aos técnicos dos laboratórios, pois sem eles seria impossível realizar um trabalho experimental. A professora Simone e ao professor Luis Kosteski pela participação na banca deste trabalho. Ao professor Ederli, pela dedicação e paciência ao me orientar, por todo conhecimento transmitido e por ter suscitado meu interesse pela pesquisa.

A Rosário Postes pela doação do cimento Portland CP V- ARI e a Termoelétrica de Candiota pela doação da cinza volante.

RESUMO

Neste trabalho foi investigada a influência do tecido de fibra de juta como reforço de matrizes cimentícias quando submetidas à esforços de tração direta e flexão em três pontos. Para melhorar a durabilidade da fibra em meio alcalino, uma matriz com substituição de 50% de cimento Portland CPV-ARI por cinza volante foi empregada. Para avaliar se a matriz desenvolvida foi capaz de controlar a degradação da fibra, os ensaios foram realizados após seis meses de envelhecimento natural. Para a caracterização das matrizes desenvolvidas, ensaios à compressão instrumentados com *strain-gages* foram realizados. A matriz sem adição mineral obteve resistência à compressão de 79,21 MPa e módulo de elasticidade de 37,29 GPa. A matriz com adição de cinza volante alcançou resistência à compressão de 58,61 MPa e módulo de elasticidade de 29,25 GPa. Entretanto, nos ensaios de flexão em três pontos e de tração direta, as matrizes não apresentaram diferença significativa nos valores de resistências máximas. Para os compósitos reforçados submetidos ao ensaio de flexão em três pontos, as amostras feitas a partir da matriz sem adição de cinza volante apresentaram melhores resultados. Nesse ensaio as amostras reforçadas com três camadas de fibra apresentaram tensão máxima superior às de cinco camadas, entretanto, as amostras reforçadas com cinco camadas de fibra conseguiram manter maior porcentagem de tensão após fissuração. No ensaio de tração direta, os compósitos reforçados com cinco camadas apresentaram resultados superiores aos de três camadas; para os compósitos sem a adição mineral, apenas duas amostras apresentaram comportamento *strain-softening*, enquanto que nos compósitos com adição de cinza volante, este número aumentou para 6. Através do ensaio de flexão em três pontos e de tração direta, avaliou-se que a utilização de reforço de juta reduziu a tensão de pico, mas contornou o comportamento frágil das matrizes cimentícias. Acredita-se que a trabalhabilidade das misturas produzidas não foi adequada, o que ocasionou a existência de espaços vazios e por consequência ocasionou a queda das tensões máximas dos compósitos. A substituição parcial do cimento Portland pela cinza volante não foi suficiente para garantir a integridade da fibra e em decorrência dos 6 meses de envelhecimento natural a fibra de juta estava deteriorada na data dos ensaios.

Palavras-Chave: Compósitos Cimentícios. Tecido de Juta. Cinza Volante.

ABSTRACT

In this work the influence of jute fiber textile as reinforcement of cement mortar when submitted to direct tensile strength and at three points bending are discussed. To increase the fiber durability in alkaline environment a matrix with partial Portland cement replacement by 50% of fly ash was used. To evaluate if the developed matrix was able to control the degradation of fiber, the tests were done after six months of natural aging. For the characterization of the developed matrices, compression tests instrumented with strain-gages were performed. The ordinary Portland cement matrix obtained compressive strength of 79.21 MPa and modulus of elasticity of 37.29 GPa. The fly ash matrix achieved compressive strength of 58.61 MPa and modulus of elasticity of 29.25 GPa. However, in the three point bending and direct tensile strength tests, the matrices did not present a significant difference between the values of maximum strength. For the reinforced composites submitted to the three point bending test, the samples made from the matrix without the addition of fly ash presented better results. In this test, the reinforced specimens with three layers of fiber presented maximum tension higher than those with five layers, but the samples reinforced with five layers of fiber were able to maintain a higher percentage of tension after cracking. In the direct tensile test, the reinforced composites with five layers presented results better than those of three layers. For the composites without the mineral addition, only two samples presented strain-softening behavior, while in the composites with addition of fly ash this number increased to 6. Through the three point bending test and direct tensile test, it was realized that the use of jute reinforcement reduced the maximum stress, but bypassed the brittle behavior of the cementitious matrices. It is believed that the workability of the mortars produced was not adequate, which caused the existence of empty spaces and consequently caused the decreased of the composites maximum tensions. The partial replacement of Portland cement by fly ash was not enough to ensure fiber integrity and as a result of 6 months of natural aging the jute fiber was deteriorated at the test date.

Keywords: Cement Composites. Jute Textile. Fly Ash.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático da microestrutura de uma fibra vegetal	16
Figura 2 – Algumas formas de comercialização da fibra de juta: (a) sacaria, (b) em malha e (c) em corda	18
Figura 3 - A planta de juta e algumas etapas da fabricação da fibra: (a) a planta de juta, (b) plantação de juta, (c) colheita da juta, (d) juta sendo estendida para secar, (e) industrialização da fibra e (f) fardos de fibra de juta	19
Figura 4 - Desenho esquemático da decomposição de uma fibra de sisal em meio alcalino	20
Figura 5 - Tipos de comportamento para compósitos submetidos à esforços de tração: (a) comportamento frágil, (b) comportamento <i>strain-softening</i> e (c) comportamento <i>strain-hardening</i>	25
Figura 6 - Materiais aglomerantes utilizados: (a) Cimento Portland CP V-ARI (b) Cinza Volante proveniente da termoelétrica Presidente Médici	29
Figura 7 - Agregado miúdo utilizado neste trabalho em sua granulometria natural...29	
Figura 8 - Superplastificante Glenium 51	30
Figura 9 - Fibra de juta utilizada na fabricação dos compósitos.....	30
Figura 10 - Misturador mecânico do tipo planetário	32
Figura 11 - Equipamentos utilizados para o ensaio de consistência adaptado da ABNT NBR 7215/96.....	32
Figura 12 - Retificadora empregada para a regularização da superfície dos corpos de prova cilíndricos	33
Figura 13 - Esquematização da estrutura dos compósitos com 5 camadas de reforço de juta	34
Figura 14 - Processo de produção dos compósitos reforçados com tecido de juta: (a) colocação da primeira camada de argamassa, (b) posicionamento do tecido de juta, (c) tecido posicionado, (d) tecido de juta devidamente ajustado, (e) colocação da segunda camada de argamassa e a (f) placa após a colocação de todas as camadas de argamassa e de reforço	35
Figura 15 - Etapas do processo de obtenção das dimensões de ensaio dos corpos de prova: (a) fôrma utilizada para moldagem, (b) placa logo após desmolde, (c) placas nas dimensões de ensaio e (d) serra elétrica utilizada para dividir as placas	36

Figura 16 - Ensaio de compressão axial: (a) Máquina de ensaios universal EMIC DL20000 e (b) corpo de prova instrumentado com <i>strain-gages</i>	37
Figura 17 - Ensaio de flexão em três pontos: (a) Máquina de Ensaios Universal Shimadzu AGS-5 kN e (b) e configuração do ensaio de flexão em três pontos	38
Figura 18 - Ensaio Ensaio de tração direta: (a) máquina de ensaios universal Shimadzu AGS-5 kN, (b) esquema frontal do aparato utilizado para execução dos ensaios de tração direta – onde “F” é a força axial de tração – e (c) vista esquemática lateral do aparato de ensaio	39
Figura 19 - Curvas típicas do ensaio de resistência à compressão	40
Figura 20 - Curva esquemática dos compósitos quando submetidos ao ensaio de flexão em três pontos indicando os pontos utilizados para a retirada das tensões σ_1 , σ_2 , σ_3 e σ_4	41
Figura 21– Ruptura característica do comportamento <i>strain-softening</i> – apresentada por todos os compósitos com fibras quando submetidos ao ensaio de flexão em três pontos	42
Figura 22 - Curvas típicas tensão x deslocamento dos compósitos produzidos a partir das matrizes M1 e M2, respectivamente	44
Figura 23 - Tensões σ_1 , σ_2 , σ_3 e σ_4 médias para os compósitos (a) produzidos a partir da matriz M1 e (b) a partir da matriz M2	45
Figura 24 - Tenacidades à flexão médias para cada configuração de compósito: (a) produzidos a partir da matriz M1 e (b) a partir da matriz M2	47
Figura 25 - Curvas típicas dos compósitos quando submetidos a esforço de tração direta: (a) produzidos a partir da matriz M1 e (b) da matriz M2.....	50
Figura 26 – Fissuração característica das amostras que apresentaram comportamento <i>strain-softening</i> no ensaio de tração direta.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de referência de algumas fibras	17
Tabela 2 - Características mecânicas do (a) filamento, (b) cordão e (c) tecido de fibra de juta	20
Tabela 3 - Características do agregado miúdo.....	29
Tabela 4 - Composição em kg/m ³ das misturas utilizada para a produção dos corpos de prova	31
Tabela 5 - Valores médios de resistência à compressão das matrizes e os seus respectivos desvios padrão (DP) e coeficientes de variação (CV)	40
Tabela 6 - Tensões σ_1 , σ_2 , σ_3 e σ_4 e resistência mantida após a primeira fissura; os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.....	43
Tabela 7 - Tenacidades médias para cada configuração de compósito, calculadas a partir da área sob a curva até o ponto de tensão máxima e para os deslocamentos de 0,5 mm, 2 mm e 5mm; os valores entre parênteses referem-se a desvios padrão ...	46
Tabela 8 - Tensão máxima à tração direta por amostra, tensão máxima média, desvio padrão e coeficiente de variação.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CO₂ – Dióxido de Carbono

PVA – Poliálcool Vinílico

TRC – Textile reinforced concretes

CH – Hidróxido de cálcio

ARI – Alta resistência inicial

PA - Poliacrilato

CP – Corpo de Prova

σ – Tensão

δ – Deslocamento

f_c – Resistência à compressão

DP – Desvio padrão

CV – Coeficiente de variação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivo Geral	14
1.1.2 Objetivos Específicos	15
1.2 Organização do trabalho	15
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 Fibras naturais vegetais	16
2.1.1 Fibra de juta	18
2.2 Durabilidade dos compósitos com fibras vegetais	20
2.2.1 Adições minerais	22
2.3 Comportamento mecânico de compósitos cimentícios com fibras	23
2.3.1 Comportamento mecânico à compressão	24
2.3.2 Comportamento mecânico à tração na flexão e à tração direta	24
2.4 Trabalhos relacionados	25
3 METODOLOGIA	28
3.1 Materiais utilizados	28
3.1.1 Materiais aglomerantes	28
3.1.2 Agregado miúdo	29
3.1.3 Superplastificante	30
3.1.4 Fibra de juta	30
3.2 Produção das matrizes	31
3.3 Moldagem e preparação das amostras	33
3.3.1 Corpos de prova cilíndricos	33
3.3.2 Placas planas	33
3.4 Ensaio Mecânicos	36
3.4.1 Ensaio de compressão axial	36
3.4.1.1 Cálculo do módulo de elasticidade	37
3.4.2 Ensaio de flexão em três pontos	37
3.4.2.1 Tenacidade à flexão em três pontos	38
3.4.3 Ensaio de tração direta	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1 Ensaio de compressão axial	40

4.2 Ensaio de flexão em três pontos	41
4.3 Ensaio de tração direta	48
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	53
REFERÊNCIAS.....	55
APÊNDICE A	58
APÊNDICE B	59
APÊNDICE C	60
APÊNDICE D	61
APÊNDICE E	62

1 INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland, descoberto no final do século XIX, revolucionou a construção civil e possibilitou o desenvolvimento das cidades. Hoje é o mais importante material estrutural e o segundo material mais consumido no mundo, atrás somente da água. Vários motivos fizeram o concreto se consagrar, entre eles o seu custo relativamente baixo, a possibilidade de se adaptar a diversas condições de produção e o fato de ser moldável, permitindo grande variedade de formas e concepções arquitetônicas.

Em contrapartida, o consumo de cimento está associado a uma série de problemas ambientais relacionados à sua fabricação, tal como a emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa, o esgotamento dos recursos naturais e um grande consumo de energia. Com isso, vem se estudando a substituição do cimento por adições minerais, geralmente subprodutos industriais e agrícolas, tais como a escória de alto-forno, a cinza volante e a sílica da casca de arroz. Por exemplo, de acordo com M. G. Silva (2007), somente as termoelétricas de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul produzem 1,4 Mt de cinza volante por ano. Sendo assim, o emprego destes materiais objetiva reduzir o consumo de cimento e criar uma alternativa para a destinação de milhões de toneladas de materiais considerados rejeitos. Segundo Isaia e Gastaldini (2004), o uso de adições minerais não só apresenta vantagens do ponto de vista técnico como também apresenta redução na emissão de CO₂, no consumo de energia e nos custos, proporcionalmente à sua quantidade na mistura.

Ainda no que se refere às desvantagens do concreto simples, é sabido que ele apresenta comportamento frágil, baixa resistência à tração e uma baixa capacidade de deformação antes da ruptura. Visando contornar essas deficiências, adiciona-se à matriz cimentícia um material de reforço, dando origem a um material compósito. O próprio concreto armado, já largamente empregado em todo mundo, pode ser considerado um material compósito. Contudo, há casos em que o tradicional reforço de barras de aço não é o ideal, como em pavimentos industriais, concreto projetado, alguns pré-moldados e elementos de pouca espessura, nos quais a inserção de barras de aço não atende as especificações de norma em relação aos valores de cobrimento mínimo. Partindo disso, passou-se a estudar o uso de fibras como reforço de matrizes cimentícias.

Por muito tempo as fibras de aço e as fibras sintéticas, como as fibras de vidro, de PVA (poliálcool vinílico) e de polipropileno, foram as mais usadas. Entretanto, devido a atual busca por materiais que, além de um comportamento mecânico satisfatório, sejam ecologicamente corretos, começou-se a estudar as fibras vegetais como uma alternativa. São exemplo de fibras vegetais as de bambu, de celulose, de coco, de sisal e de juta; suas principais vantagens consistem em serem atóxicas, renováveis, recicláveis e biodegradáveis. A utilização de fibras vegetais implica em baixo consumo de energia e em um custo total relativamente baixo (ARDANUY; CLARAMUNT; FILHO, 2015). Além disso, diversos tipos de fibras vegetais são encontrados em abundância no Brasil. Entre elas está a fibra de juta, objeto de estudo deste trabalho, cujo cultivo é uma das principais atividades econômicas das populações ribeirinhas da região amazônica.

Alguns estudos (SILVA, F., 2009; MELO FILHO, 2012; FIDELIS, 2014) vêm apresentando resultados satisfatórios acerca do emprego de fibras vegetais na produção de elementos de pouca espessura, que podem ser usados como revestimentos externos, painéis divisórios e elementos de cobertura. Estes elementos eram produzidos até pouco tempo com a utilização de fibras de amianto, porém, devido à natureza cancerígena dessa fibra, o material não é mais fabricado.

Assim sendo, nesta pesquisa foram produzidas amostras com pequenas espessuras (na ordem de 1,20 cm) utilizando como reforço um tecido bidirecional produzido a partir de fibra de juta. Essa fibra foi escolhida entre tantos os demais tipos de fibras vegetais por ser facilmente encontrada no Rio Grande do Sul. Por sua vez, o emprego de materiais pozolânicos – no caso, a cinza volante – é um requisito ao utilizar reforço de fibras vegetais em matrizes cimentícias, para que seja possível obter uma matriz com baixo teor de hidróxido de cálcio e, por consequência, minimizar o processo de degradação das fibras.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar as propriedades mecânicas de uma matriz de cimento Portland com o uso de adição mineral de cinza volante e reforço de tecido de juta.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Comparar a resposta mecânica sob compressão, flexão em três pontos e tração direta da matriz com adição de cinza volante com a matriz referência;
- b) Averiguar através dos ensaios de flexão em três pontos e de tração direta se a matriz desenvolvida com a adição de cinza volante foi capaz de retardar a deterioração da fibra;
- c) Avaliar a influência do tecido de fibra de juta como reforço da matriz cimentícia através de ensaios de tração direta e de flexão em três pontos, analisando os deslocamentos;
- d) Verificar qual configuração em relação ao número de camadas de tecido de fibra de juta apresenta a melhor resposta mecânica ao reforçar a matriz.

1.2 Organização do trabalho

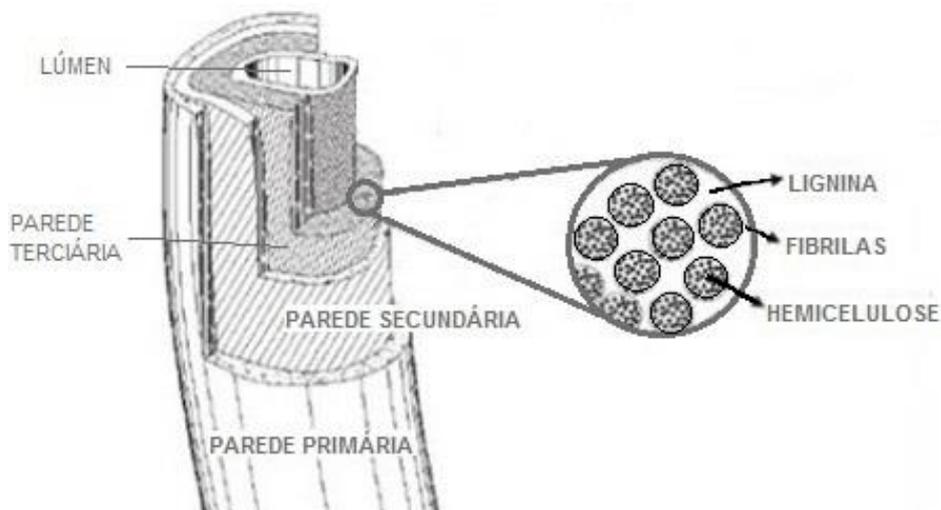
Este trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 1 contextualiza o problema de pesquisa, define os objetivos e justifica a escolha do tema deste estudo; o Capítulo 2 traz a revisão bibliográfica, apresentando conceitos importantes para esta pesquisa e alguns trabalhos relacionados; o Capítulo 3 detalha os materiais, equipamentos e procedimentos utilizados para a produção da matriz, para a fabricação dos corpos de prova e para a realização dos ensaios necessários para o alcance dos objetivos propostos. O Capítulo 4 contém os resultados dos ensaios realizados, com suas respectivas análises e discussões. Por fim, no Capítulo 5 estão apresentadas as considerações finais e no Capítulo 6 estão apresentadas sugestões para a continuidade da pesquisa.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Fibras naturais vegetais

As fibras vegetais, também chamadas de fibras lignocelulósicas devido à celulose ser um componente sempre presente em suas constituições, são classificadas de acordo com o local de origem de sua extração da planta: folha, fruto, talo, raiz, semente ou capim (TOMCZAK, 2010). As fibras vegetais são formadas por microfibrilas de celulose dispersas em uma matriz de hemicelulose e lignina. As microfibrilas são responsáveis por dar resistência mecânica às fibras e possuem diâmetro de cerca de 10 a 30 nanômetros. A matriz de hemicelulose é ligada por pontes de hidrogênio com as microfibrilas de celulose, formando uma rede tridimensional. Por sua vez, a lignina se intercala tridimensionalmente com essa rede e ajuda na rigidez da parede da célula. Na Figura 1 está representada a microestrutura de uma fibra vegetal (DITTENBER; GANGARAO, 2012; TOLEDO et al., 2009; MALLICK, 2007).

Figura 1 – Desenho esquemático da microestrutura de uma fibra vegetal



Fonte: Adaptado de Toledo et al. (2009, p. 2410)

Comparadas com a maioria das fibras sintéticas, as fibras naturais apresentam baixo custo, são mais fáceis de manusear, têm boas propriedades mecânicas e requerem apenas 20-40% da energia de produção, além de serem biodegradáveis e provenientes de fontes renováveis (DITTENBER; GANGARAO, 2012; ARDANUY; CLARAMUNT; FILHO, 2015). A Tabela 1 apresenta valores de referências para algumas fibras.

Tabela 1 - Valores de referência de algumas fibras

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (%)
Coco	1,25	192 ± 37	3,44	42,4 ± 14
Bambu	1,38 ± 0,02	813 ± 94	33,37	2,9 ± 0,7
Juta	1,39 ± 0,05	399 ± 100	26,25	1,6 ± 0,3
Piçava	-	131,1 ± 27,1	2,58 ± 0,39	11,9 ± 4,3
Sisal	1,33	546,31 ± 318,55	17,37 ± 8,42	2,82 ± 1,18
Cuaruá	-	131 - 310	48,7	4,49 - 4,57
Kenaf	1,4	473,27 ± 241	34,21 ± 17,17	1,98 ± 0,43
Cânhamo	1,14 - 1,48	677 - 786	30 - 60	1,6
PP	0,95	400 - 550	5,6	30
PVA	1,3	1200 - 1600	31,4 - 42	7
Aço	7,85	1050 - 2000	210	-
Carbono	1,81	3800	242	-
Vidro	2,68	1700 - 2500	75	4,7

Fonte: Adaptado de Fidelis (2014, p. 10)

Em contrapartida, vários inconvenientes dos compósitos naturais ficam em evidência quando empregados na construção civil, como a sua maior absorção de umidade, baixa durabilidade e baixa resistência ao fogo, propriedades mecânicas inferiores, propriedades não homogêneas (variam conforme a condições de cultura, de colheita e de processamento das fibras) e a dificuldade de padronizar práticas de fabricação quando comparadas com as fibras sintéticas. Tendo isto em vista, muitos pesquisadores têm trabalhado para resolver esses problemas, com especial atenção ao tratamento da superfície das fibras e melhorando a interface fibra-matriz (DITTENBER; GANGARAO, 2012).

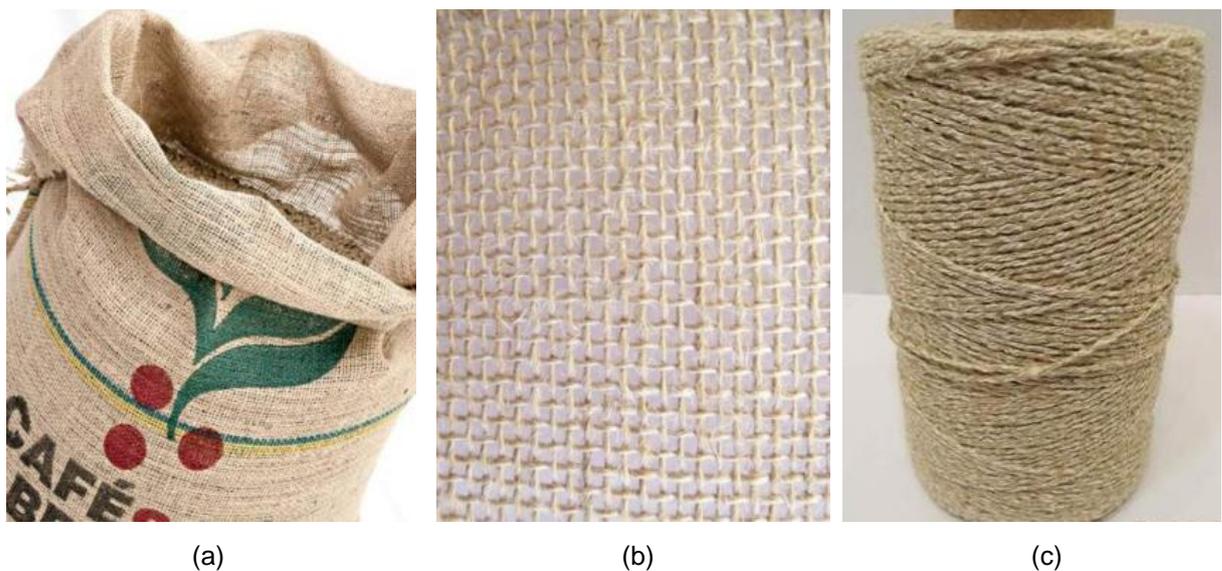
Quanto à disposição dentro da matriz, os reforços de fibras vegetais costumam ser classificados de quatro formas diferentes: fibras longas alinhadas, fibras curtas (quando apresentam comprimento inferior a 5 cm), fibras de polpa e tecidos bidirecionais (SILVA, F.A., 2009). O uso de reforço têxtil (tecidos bidirecionais) em concretos ou argamassas pode trazer várias vantagens em relação à outras variedades de reforços fibrosos. Os compósitos reforçados com tecidos também são conhecidos como TRCs (*Textile reinforced concretes*) e costumam apresentar comportamento *strain-hardening*, alcançando valores de tenacidade, resistência à

tração e capacidade de deformação superiores aos alcançados por compósitos reforçados com fibras randomicamente distribuídas ou fibras longas alinhadas (PELED; MOBASHER, 2005). Os TRCs possuem grande potencial na produção de produtos laminados (elementos de fachadas e divisórias), na reabilitação de estruturas e na concepção de estruturas leves e mobiliário (RAMBO, 2016).

2.1.1 Fibra de juta

A juta (*Corchorus Capsularis*) é uma planta originária da Índia que chegou ao Brasil na década de 1930 trazida por Ryota Oyama, que adaptou sua produção às condições da região amazônica. Proveniente da família das tiliáceas, a planta de juta pode alcançar de 3 a 4 metros de altura e talos de aproximadamente 20 mm de espessura (PIRES, 2009). A fibra de juta – extraída do caule da planta – é muito utilizada no mundo inteiro como embalagem, além de ter emprego como material de isolamento, revestimento de pavimentos e artesanato. A fibra de juta tem potencial para ser utilizada como geotêxtil para aplicação em estabilização de solos e controle de erosão (GRAUPNER; MÜSSIG, 2010). Atualmente, a fibra de juta é comercializada principalmente em forma de sacaria (Figura 2-a), de malha (Figura 2-b) e de corda (Figura 2-c).

Figura 2 – Algumas formas de comercialização da fibra de juta: (a) sacaria, (b) em malha e (c) em corda



Fonte: Adaptado de Castanhal Companhia Têxtil (2013)

O plantio de juta (Figura 3-a) não provoca desmatamento, já que é realizado na beira dos rios (Figura 3-b). O ciclo do plantio coincide com os períodos de cheia e vazante, levando assim cerca de seis meses – entre agosto e janeiro. O processo de obtenção da fibra de juta tem como características durar aproximadamente cinco dias e não utilizar nenhum produto químico. O processo começa com o corte e limpeza dos talos, que então são reunidos em feixes e colocados em água (Figura 3-c), o que possibilita as fibras serem facilmente desprendidas das cascas e então lavadas. Em seguida, as fibras são golpeadas na água e submetidas a uma segunda lavagem, para então serem estendidas em varais para secar (Figura 3-d) e, enfim, são encaminhadas para o processo industrial (Figura 3-e-f). (PIRES, 2009).

Figura 3 - A planta de juta e algumas etapas da fabricação da fibra: (a) a planta de juta, (b) plantação de juta, (c) colheita da juta, (d) juta sendo estendida para secar, (e) industrialização da fibra e (f) fardos de fibra de juta



(a)

Fonte: Adaptado de International Natural Fiber Organization (2012)



(b)

Fonte: Adaptado de Ambiente Sustentável (2011)



(c)

Fonte: Adaptado de International Natural Fiber Organization (2012)



(d)

Fonte: Adaptado de International Natural Fiber Organization (2012)



(e)

Fonte: Adaptado de Pautas na Web (2012)



(f)

Fonte: Adaptado de Pautas na Web (2012)

Por fim, a Tabela 2 apresenta as características mecânicas da fibra de juta. Os dados foram obtidos por Fidelis (2014), que utilizou uma configuração de fibra de juta idêntica à empregada nesta pesquisa.

Tabela 2 - Características mecânicas do (a) filamento, (b) cordão e (c) tecido de fibra de juta

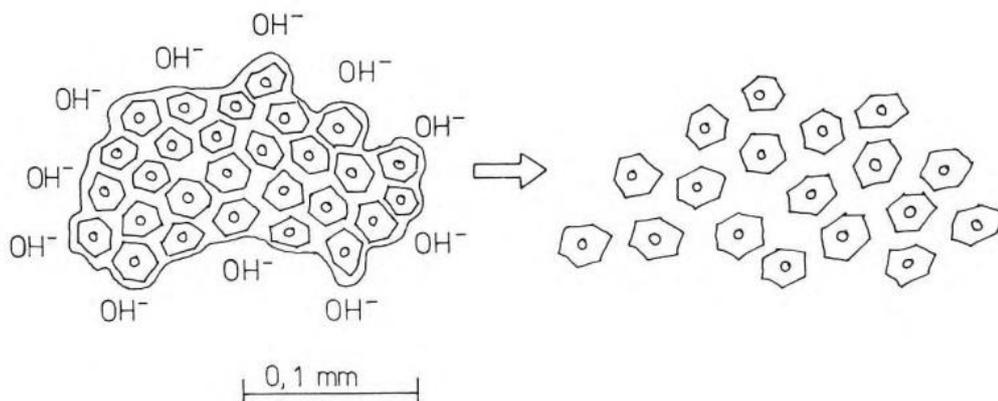
	F _{max} (N)	δ _{max} (mm)	ε _{max} (%)	σ _{max} (MPa)	E (GPa)
Filamento	1,05 (0,38)	0,24 (0,07)	0,6 (0,2)	248,63 (88,89)	43,9 (12,3)
Cordão	50,58 (8,77)	1,06 (0,4)	2,11 (0,8)	104,38 (18,10)	5,68 (1,57)
Tecido	517,65 (75,10)	6,00 (1,00)	3,00 (0,50)	66,77 (9,69)	4,83 (1,87)

Fonte: Adaptado de Fidelis (2014, p. 63)

2.2 Durabilidade dos compósitos com fibras vegetais

Um motivo que barra o desenvolvimento em grande escala dos compósitos reforçados com fibras vegetais é a questão relacionada com a durabilidade, visto que o desempenho desses materiais ao longo do tempo depende fundamentalmente da durabilidade das fibras dentro da matriz cimentícia. De acordo com Gram (1983) a degradação das fibras vegetais em matrizes cimentícias acontece devido a hidrólise alcalina, fenômeno que provoca a divisão da cadeia molecular e reduz o grau de polimerização da celulose. A água alcalina presente nos poros da matriz cimentícia quebra as ligações entre as fibrocélulas (como esquematizado na Figura 4) ao dissolver a lignina e a hemicelulose.

Figura 4 - Desenho esquemático da decomposição de uma fibra de sisal em meio alcalino



Fonte: Gram (1983, p. 61)

Objetivando solucionar esse problema, vários procedimentos vêm sendo estudados, tanto no pré-tratamento da fibra quanto na modificação da matriz. Por exemplo, Gram (1983) utilizou a impregnação das fibras com agentes bloqueadores, testou a aplicação de repelentes de água e realizou modificações na matriz (selagem de poros e a redução da alcalinidade da matriz). O autor concluiu que os agentes bloqueadores não incrementaram a durabilidade das fibras e os agentes repelentes de água proporcionaram um retardamento do processo de enrijecimento do compósito. Quanto às técnicas de modificação da matriz, tanto a selagem de poros utilizando glóbulos de cera e estearato de zinco, quanto a substituição parcial de cimento por fumo de sílica, causaram aumento da durabilidade dos compósitos.

Toledo Filho et al. (2009) desenvolveram compósitos reforçados por fibras de sisal. Foi obtida uma matriz livre de hidróxido de cálcio substituindo parcialmente o cimento por metacaulinita e tijolo moído. A partir do envelhecimento acelerado na microestrutura e do comportamento dos compósitos em ensaios de flexão em quatro pontos foi testada a durabilidade, concluindo que a matriz livre de hidróxido de cálcio evitou o processo de degradação das fibras – que mantiveram sua resistência mesmo após 100 ciclos de molhagem e secagem.

Melo Filho (2012) também desenvolveu compósitos reforçados com fibras de sisal. A matriz foi produzida substituindo metade do cimento por metacaulinita, ocorrendo consumo total do hidróxido de cálcio. Algumas amostras foram submetidas a ciclos de molhagem e secagem e outras envelhecidas em sala climatizada por até cinco anos. Após esses processos, os compósitos continuaram apresentando elevada resistência mecânica e tenacidade.

Fidelis et al. (2016) estudaram o efeito do envelhecimento acelerado em compósitos cimentícios reforçados com tecido de juta. Foi estudado o efeito do tratamento das fibras com polímero estireno e butadieno e da substituição de 50% do cimento Portland por metacaulinita. Os resultados de arrancamento da fibra mostraram que as fibras com revestimento polimérico apresentaram aderência superior do que as sem revestimento. Para as matrizes de cimento Portland sem adição mineral, a máxima força de arrancamento apresentou redução de 85% depois de seis meses de envelhecimento acelerado. Na matriz que continha metacaulinita o processo de degradação apresentou uma grande redução.

A partir do exposto, considera-se que o emprego de matrizes livres de hidróxido de cálcio, obtidas ao substituir o cimento por materiais pozolânicos, apresenta-se

como uma das soluções mais eficientes para o controle da degradação das fibras vegetais em materiais a base de cimento. Assim, o presente trabalho irá substituir 50% do cimento por cinza volante com a intenção de que aconteça grande consumo de CH, como acontece quando esta mesma porcentagem é substituída por metacaulinita.

2.2.1 Adições minerais

A substituição de cimento Portland por materiais pozolânicos é um requisito para a produção de compósitos reforçados com fibras vegetais, uma vez que as reações pozolânicas consomem o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento e assim evitam a mineralização das fibras (FIDELIS, 2014). Tendo isso em vista, essa seção traz uma breve revisão acerca de outros pontos relevantes sobre as adições minerais.

O uso de adições minerais em substituição parcial do cimento é vantajoso do ponto de vista técnico e econômico e ainda apresenta apelo ambiental. Tecnicamente, um dos aspectos mais relevantes ao se usar adições minerais é o aumento da durabilidade, que acontece devido a capacidade de reação com o hidróxido de cálcio (CH) formado durante a hidratação do cimento Portland, para então gerar silicato de cálcio hidratado adicional – principal produto responsável pela resistência das pastas de cimento hidratadas. Do ponto de vista econômico, as adições minerais têm custo e preço inferior ao do cimento Portland, visto que as adições normalmente utilizadas são resíduos provenientes de outras indústrias. Já o apelo ambiental é garantido pela redução do consumo de energia e da emissão de CO₂ na produção de cimento e de concreto. (SILVA, M. G., 2007).

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), as adições minerais são classificadas em materiais cimentícios (escória de alto-forno), materiais pozolânicos (cinza volante, sílica ativa, cinza da casca de arroz, argila calcinada, etc.) e adições não reativas (fíler calcário). Por sua vez, materiais pozolânicos são definidos por essa norma como materiais silicosos ou silicoaluminosos que sozinhos possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio e formam compostos com propriedades cimentantes.

As pozolanas podem ser de origem natural (cinza vulcânicas e terra diatomácea) ou originadas de algum processamento industrial, como é o caso da cinza

volante, sílica ativa, cinza da casca de arroz e da argila calcinada. Para a utilização na produção de cimentos e concretos normalmente são utilizados subprodutos de algum processo industrial, como é o caso da cinza volante, resíduo da queima do carvão nas centrais termoelétricas, cujas cinzas são coletadas por meio de precipitadores eletrostáticos. A maioria das partículas de cinza volante apresentam diâmetro próximo de 45 μm ; entretanto, este valor pode variar de 1 μm a mais de 150 μm , dependendo do tipo e processo de queima. A superfície específica Blaine da cinza volante encontra-se entre 200 e 800 m^2/kg e a sua massa específica varia entre 190 a 240 kg/m^3 , enquanto a do cimento fica em torno de 315 kg/m^3 . Com isso, a substituição em massa resulta em volume maior de aglomerante (SILVA, M. G., 2007).

No que se refere as propriedades dos concretos no estado fresco, o uso de cinza volante como substituição do cimento tende a diminuir o risco de exsudação e segregação em decorrência do maior volume de finos, além do menor consumo de água para uma dada trabalhabilidade devido a sua forma esférica (NEVILLE, 1982). Com uma cura adequada, as matrizes com cinza volante apresentam menor permeabilidade e absorção e maior resistência a sulfatos; dessa maneira, resultam em compósitos mais duráveis. Além da durabilidade, o refinamento dos poros e a melhoria na microestrutura da zona de transição também fazem com que a resistência à compressão seja aumentada. Segundo a pesquisa de Isaia (1995), a adição de cinza volante é mais eficaz (quanto ao aumento das resistências) em baixas relações água/aglomerante e fica mais evidente nas idades avançadas.

2.3 Comportamento mecânico de compósitos cimentícios com fibras

O principal objetivo ao adicionar fibras em uma matriz frágil é a alteração no seu comportamento mecânico, principalmente na região pós-fissuração. As características das fibras que provocam mudanças no comportamento mecânico dos compósitos são: geometria da fibra, fração volumétrica, relação entre o módulo de elasticidade da fibra e o da matriz e a relação entre a resistência da fibra e da matriz (VELASCO, 2008). Em geral, os materiais cimentícios reforçados com fibras podem ser divididos em dois tipos principais: concretos e argamassas reforçados com fibras curtas em pequenos volumes (até 3%), distribuídas aleatoriamente na matriz e elementos construtivos manufaturados que incorporam grande volume de fibras longas e alinhadas (LIMA, 2004).

As fibras curtas contribuem principalmente no comportamento pré-fissuração do compósito, já que minimizam a nucleação e alargamento de microfissuras. Dessa maneira, proporcionam aumento no módulo de elasticidade e na tensão de primeira fissura do compósito em relação à matriz de referência. Por sua vez, as fibras longas permitem a transferência de cargas através das macrofissuras e contribuem para o comportamento pós-fissuração do compósito. Como possibilitam os mecanismos de absorção de energia, o emprego de fibras longas resulta num aumento da tenacidade do compósito (BENTUR; MINDESS, 2007).

2.3.1 Comportamento mecânico à compressão

A resistência à compressão é uma das propriedades mais importantes dos materiais à base de cimento, sendo uma referência na classificação do material e, indiretamente, na sua durabilidade. Dos resultados obtidos com o ensaio de compressão, além da própria resistência à compressão, é possível extrair diversas propriedades necessárias ao dimensionamento estrutural: módulo de elasticidade, deformação de pico, coeficiente de Poisson e tenacidade (VELASCO, 2008).

2.3.2 Comportamento mecânico à tração na flexão e à tração direta

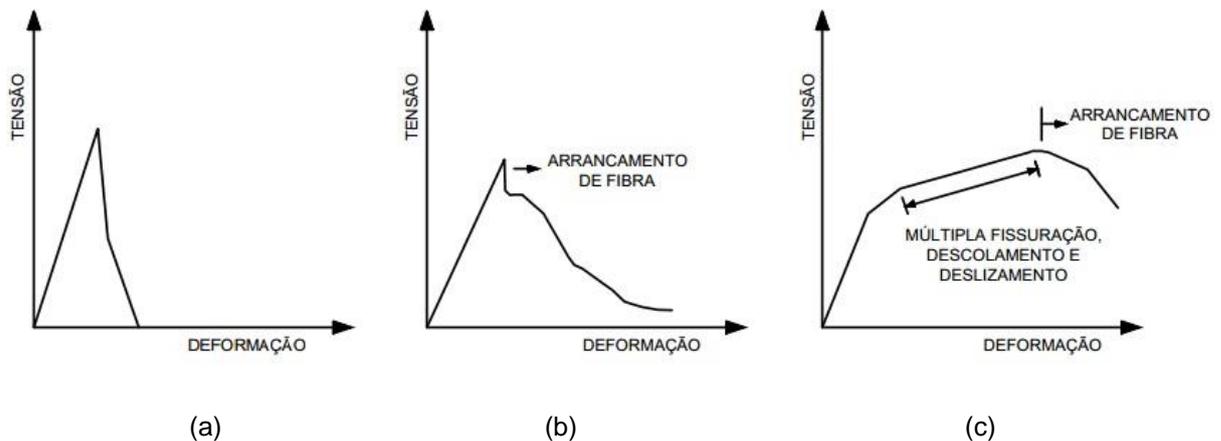
Segundo Balaguru e Shah (1992), três tipos de comportamentos podem ser observados quando utilizadas fibras em matrizes frágeis de cimento submetidas a esforços de tração. O primeiro comportamento corresponde a Figura 5-a, onde as cargas não são transmitidas efetivamente da matriz para as fibras e o compósito rompe imediatamente após a fissuração da matriz. Esse comportamento é denominado comportamento frágil e costuma acontecer quando o volume de fibras utilizado é muito baixo.

O segundo comportamento (Figura 5-b), chamado *strain-softening*, é dominado pela matriz até o momento da sua fissuração, quando o compósito passa a resistir a cargas inferiores a carga de ruptura. Nesse comportamento a carga é transferida da matriz para as fibras e a ruptura é caracterizada pelo arrancamento das fibras. Esse tipo de compósito, mesmo não causando acréscimos na resistência, proporciona ductilidade ao material.

Por fim, o comportamento representado na Figura 5-c, conhecido como comportamento *strain-hardening*, é caracterizado pelo acréscimo da carga mesmo

após a fissuração da matriz. Com o aumento da carga, fissuras surgem ao longo da peça, dando origem ao processo denominado múltipla fissuração. O arrancamento das fibras inicia após o compósito alcançar a carga de ruptura. Para esse comportamento existir é necessário uma maior fração volumétrica de fibras, suficiente para proporcionar o aumento de carga após a fissuração da matriz. A inclinação do gráfico pós-fissuração depende da fração volumétrica de fibras e da sua capacidade de adesão à matriz (BALAGURU; SHAH, 1992).

Figura 5 - Tipos de comportamento para compósitos submetidos à esforços de tração: (a) comportamento frágil, (b) comportamento *strain-softening* e (c) comportamento *strain-hardening*



Fonte: Adaptado de Balaguru e Shah (1992)

2.4 Trabalhos relacionados

Lima (2004) verificou que fibras curtas de sisal reforçando materiais compósitos conseguem aumentar o deslocamento último e a tenacidade do material em ensaios de tração direta e indireta. Esses compósitos apresentaram comportamento *strain-softening*, uma vez que a ruptura aconteceu por abertura de uma fissura única e arrancamento de fibras, com redução de resistência até a ruptura. Também foram desenvolvidas placas de cimento laminadas reforçadas com fibras longas de sisal; estas apresentaram excelente resistência à tração devido ao aumento do comprimento de ancoragem da fibra que conseguiu suprir a deficiência causada pela baixa aderência entre a fibra e a matriz. Assim, houve crescimento da resistência mesmo após a fissuração da matriz (comportamento *strain-hardening*) e surgimento de múltipla fissuração, tanto na tração direta como na flexão.

Silva et al. (2010) desenvolveram compósitos reforçados com fibras longas de sisal alinhadas unidirecionalmente. Quanto à matriz dos compósitos, realizou-se a substituição de 50% de cimento Portland por argilas calcinadas (30% do cimento foi substituído por metacaulinita e 20% por tijolo moído) e obteve-se uma matriz livre de CH. O material apresentou um processo de craqueamento múltiplo com um comportamento *strain-hardening* tanto nos ensaios de tração direta quanto nos de flexão. A tenacidade dos compósitos isentos de CH sob carga de tração foi duas vezes maior que a dos compósitos que não tiveram uma parcela do cimento substituído por argilas calcinadas (matriz referência). Também verificou-se que a ondulação das folhas planas aumentou a carga final do ensaio de flexão em cerca de 260%. Essa pesquisa confirmou o potencial do uso de fibras de sisal longas alinhadas unidirecionalmente como reforço em compósitos cimentícios para aplicações semi-estruturais e estruturais.

Melo Filho (2012) realizou um estudo sobre compósitos reforçados com fibras de sisal, cuja matriz desenvolvida com a substituição de 50% de cimento Portland por metacaulinita apresentou-se livre de hidróxido de cálcio. Foram desenvolvidos compósitos reforçados com fração volumétrica de 6% e 10% de fibras longas de sisal e ambas as frações proporcionaram comportamento *strain-hardening* com múltipla fissuração, sendo que o maior volume de reforço permitiu a formação de mais fissuras com menor espaçamento entre elas.

Fidelis (2014) estudou a durabilidade de compósitos têxteis reforçados com fibra de juta sem e com o tratamento com polímero estireno butadieno, submetendo corpos de prova ao envelhecimento acelerado e ao natural. Foram produzidos compósitos com substituição parcial do cimento por 40% de metacaulinita e 10% de cinza, composição que apresentou praticamente consumo total do CH presente na matriz. Foram produzidos compósitos com 1, 3 e 5 camadas de reforço de juta, mantendo sempre a espessura de 12 mm. Os compósitos com 3 e 5 camadas apresentaram maior capacidade de deformação e formação de múltiplas fissuras, sendo que, com o aumento do número de camadas, houve aumento do número de fissuras. Sob tração direta, os compósitos sem adição mineral e tecido sem tratamento apresentaram ruptura frágil e queda no valor de tensão suportada conforme a severidade do processo de envelhecimento. Já os compósitos com adição de metacaulinita e cinza volante apresentaram, em sua maioria, comportamento *strain-hardening* com múltipla fissuração.

Oliveira (2017) realizou a caracterização mecânica de compósitos cimentícios reforçados com tecido de juta e malva. Foi empregada uma matriz cimentícia que substituiu 50% do cimento Portland por resíduo de tijolo moído para a redução do hidróxido de cálcio gerado durante o processo de hidratação do cimento. Foram produzidas placas de 100 mm x 400 mm x 4 mm (largura x comprimento x espessura) e telhas de 1000 mm x 500 mm x 4 mm, ambas reforçadas com 2 camadas de tecido bidirecional produzido através das fibras de juta e de malva. Os compósitos com substituição de 50% do cimento Portland pelo resíduo cerâmico apresentaram resistência superior aos produzidos pela matriz referência: aproximadamente 18% maior na tração à flexão e 12% na tração direta. Além disso, os compósitos apresentaram um comportamento de múltipla fissuração em ambos os ensaios. De modo geral, a substituição do cimento Portland por 50% de resíduo de tijolo moído reduziu a ação do hidróxido de cálcio, contribuindo no aumento da aderência, resistência e durabilidade das telhas, que apresentaram bom comportamento nos ensaios de permeabilidade, flexão e resistência ao impacto, superiores a telha referência sem amianto.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão detalhados os materiais, equipamentos e procedimentos utilizados para a produção das matrizes, para a fabricação e preparação dos corpos de provas e amostras e para a realização dos ensaios necessários para o alcance dos objetivos propostos.

3.1 Materiais utilizados

- Cimento Portland CP V-ARI;
- Cinza volante;
- Areia local;
- Aditivo superplastificante;
- Tecido de fibra de juta;
- Água potável.

3.1.1 Materiais aglomerantes

Para a produção da matriz foi utilizado Cimento Portland CP V-ARI (Figura 6-a), doado pela empresa Rosário Postes Ltda de Rosário do Sul/RS. Este cimento foi escolhido por fornecer respostas mais rápidas quanto à atividade pozolânica. A massa específica e a finura desse material correspondem à 2,98 g/cm³ e 15 µm, respectivamente.

Foi empregada a Cinza Volante (Figura 6-b) proveniente da combustão do carvão mineral utilizado na termoelétrica Presidente Médici de Candiota/RS. A massa específica desse material é de 1,98 g/cm³ e a finura corresponde à 45 µm.

Figura 6 - Materiais aglomerantes utilizados: (a) Cimento Portland CP V-ARI (b) Cinza Volante proveniente da termoelétrica Presidente Médici



Fonte: Elaboração própria

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado (Figura 7) neste trabalho é proveniente do leito do rio Ibicuí no município de Manoel Viana/RS e suas características estão apresentadas na Tabela 3. Para uma penetração adequada da argamassa no tecido de juta é necessário uma mistura fina e bastante fluida. Por esse motivo, foi empregado somente o material passante na peneira de abertura de malha de 1,18 mm.

Tabela 3 - Características do agregado miúdo

Módulo de Finura	Dimensão Máxima Característica (mm)	Massa Específica (kg/dm ³)
1,37	0,6	2,63

Fonte: Adaptado de Mendes (2014)

Figura 7 - Agregado miúdo utilizado neste trabalho em sua granulometria natural



Fonte: Elaboração própria

3.1.3 Superplastificante

Foi utilizado o superplastificante dispersante do tipo PA (Poliacrilato) Glenium 51 (Figura 8), com teor de sólidos de 31,20 %, massa específica 1073 kg/m³ e pH 6,2.

Figura 8 - Superplastificante Glenium 51

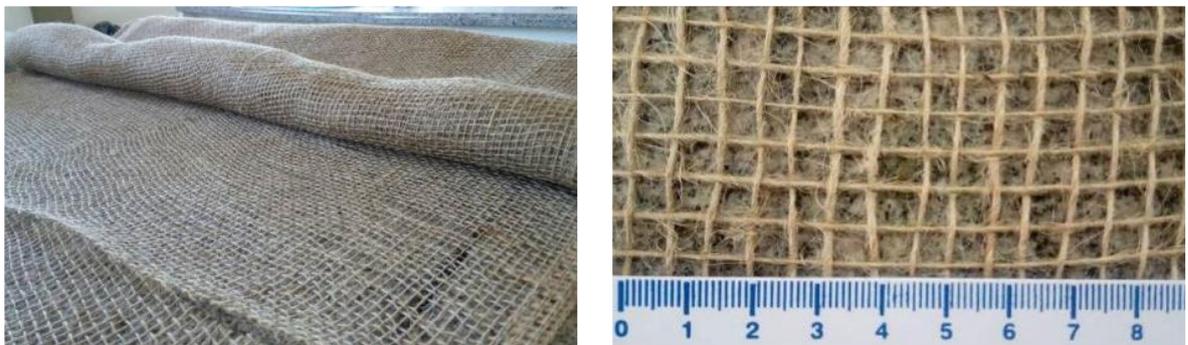


Fonte: Elaboração própria

3.1.4 Fibra de juta

Foi utilizada fibra de juta em formato de tela com abertura de malha de aproximadamente 5 mm, conforme pode ser visto na Figura 9. Essa configuração de fibra foi escolhida tendo em vista facilitar a passagem da matriz através dos espaçamentos e assim proporcionar uma boa aderência entre a fibra e a matriz. Além disso, esse tipo de material é facilmente encontrado no estado do Rio Grande do Sul.

Figura 9 - Fibra de juta utilizada na fabricação dos compósitos



Fonte: Elaboração própria

3.2 Produção das matrizes

Para comparar o efeito da substituição de cimento Portland por cinza volante foram produzidas duas matrizes cimentícias: a matriz M1, que utiliza somente o cimento Portland CP V-ARI como aglomerante, e a matriz M2, que substitui (em massa) 50% do cimento Portland por cinza volante. A matriz M2 foi desenvolvida dessa maneira por acreditar-se, tendo como referência alguns trabalhos (SILVA, F., 2009; MELO FILHO, 2012; FIDELIS, 2014), que essa porcentagem de material pozolânico não prejudicasse a resistência mecânica do material e fosse suficiente para grande consumo do hidróxido de cálcio presente na matriz, controlando o processo de mineralização das fibras. A quantidade de superplastificante difere entre as matrizes para que ambas apresentassem a mesma trabalhabilidade. A Tabela 4 mostra a composição em kg/m³ das misturas produzidas.

Tabela 4 - Composição em kg/m³ das misturas utilizada para a produção dos corpos de prova

Descrição do Material	Quantidade (kg/m ³)	
	M1	M2
Cimento Portland CP V -ARI	864,5	432,25
Cinza Volante	-	432,25
Areia	864,5	864,5
Água	345,8	345,8
Superplastificante	3,0	2,6

Fonte: Elaboração própria

As misturas foram preparadas em sala climatizada a 23 ± 2 °C utilizando um misturador mecânico de bancada do tipo planetário com 5 litros de capacidade (Figura 10). O processo inicia-se com a colocação dos materiais aglomerantes, misturados durante 1 minuto em velocidade baixa. Em seguida, adiciona-se o superplastificante. A água (previamente pesada em outro recipiente) é adicionada ao recipiente do superplastificante, de modo a enxaguá-lo para remover o superplastificante aderido nas paredes do recipiente. O misturador é ligado em velocidade baixa até todas as partículas apresentarem-se com a superfície úmida. Então, a velocidade é aumentada e agita-se a mistura por cerca de 5 minutos.

Figura 10 - Misturador mecânico do tipo planetário



Fonte: Elaboração própria

Após produzidas, as matrizes foram submetidas à um ensaio de espalhamento para avaliar se apresentavam a consistência adequada para a produção dos compósitos. O ensaio foi adaptado da ABNT NBR 7215/96, diferenciando-se desta norma pois a mistura produzida era muito fluida e não convinha a aplicação de golpes após a retirada do tronco de cone. Dessa maneira, o superplastificante empregado foi dosado para que a mistura, através do procedimento descrito, apresentasse um espalhamento entre 250 e 300 mm. A Figura 11 apresenta o aparato empregado para a realização deste ensaio.

Figura 11 - Equipamentos utilizados para o ensaio de consistência adaptado da ABNT NBR 7215/96



Fonte: Elaboração própria

3.3 Moldagem e preparação das amostras

3.3.1 Corpos de prova cilíndricos

Para os ensaios de compressão foram moldados corpos de provas cilíndricos de 50 mm x 100 mm (diâmetro x altura). Visto que estes corpos de prova não continham adição de fibras, o processo de moldagem consistiu em despejar as matrizes produzidas dentro dos devidos moldes e adensá-las manualmente através de golpes suaves nas laterais das fôrmas. Antes da realização dos ensaios de compressão, os corpos de provas cilíndricos foram faceados, a fim de se regularizar a superfície e evitar a concentração de tensões nas faces. O equipamento utilizado para essa regularização foi uma retificadora automática SecMix, conforme a Figura 12.

Figura 12 - Retificadora empregada para a regularização da superfície dos corpos de prova cilíndricos



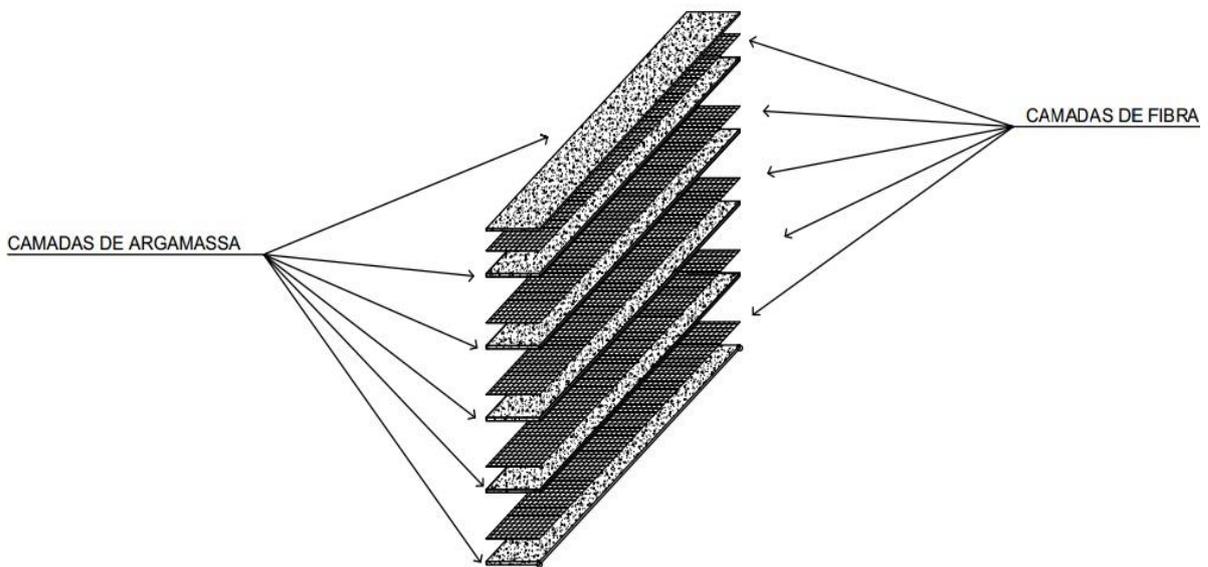
Fonte: Elaboração própria

3.3.2 Placas planas

Para a realização dos ensaios de tração direta e de tração na flexão foram produzidas placas laminadas de 350 mm x 400 mm x 12 mm (largura x comprimento x espessura) com diferentes camadas de reforço: referência (sem fibra), com 3 e 5

camadas de tecido de fibra de juta. A moldagem dessas placas iniciou-se colocando a primeira camada de matriz no molde. Para assegurar que todas as camadas de matriz ficassem com a mesma espessura, a massa total da mistura foi pesada e dividida em 4 (no caso dos corpos de prova com 3 camadas de tecido de fibra de juta) ou 6 (corpos de prova com 5 camadas de tecido de fibra de juta) porções iguais em peso. A Figura 13 esquematiza a estrutura dos compósitos com 5 camadas de reforço.

Figura 13 - Esquematização da estrutura dos compósitos com 5 camadas de reforço de juta

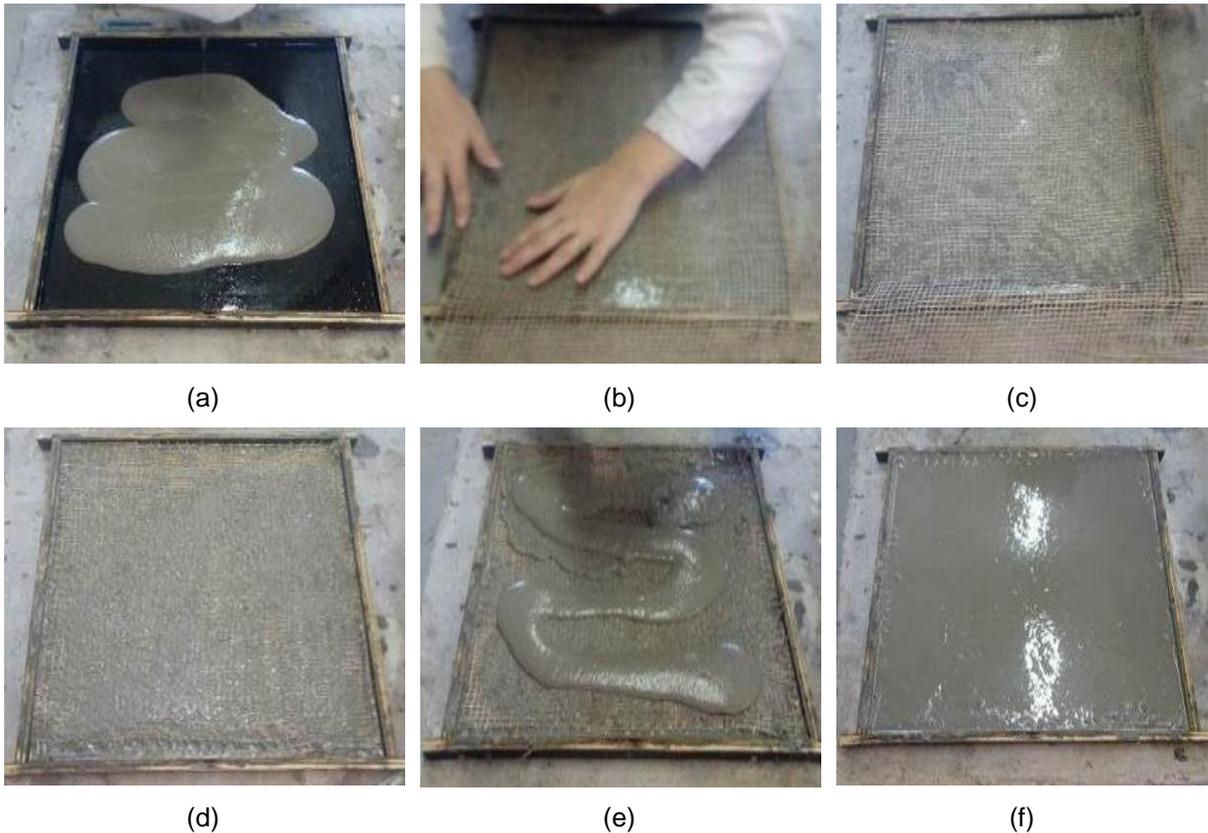


Fonte: Elaboração própria

Após a colocação da primeira camada de argamassa (Figura 14-a) foi utilizada uma espátula para a sua regularização; então foi posicionada manualmente a primeira camada de tecido de fibra de juta (Figura 14-b) e realizado o corte do tecido excedente (Figura 14-c). A Figura 14-d mostra o compósito depois de finalizada a execução da primeira camada de argamassa e de fibra.

Logo após, mais uma camada de argamassa foi lançada (Figura 14-e) e novamente regularizada com espátula. As etapas referentes à colocação das camadas de fibra e argamassa foram repetidas até chegar-se à última camada de argamassa (Figura 14-f). Todas as amostras foram desmoldadas após 24 horas e então mantidas em câmara úmida até a data dos ensaios.

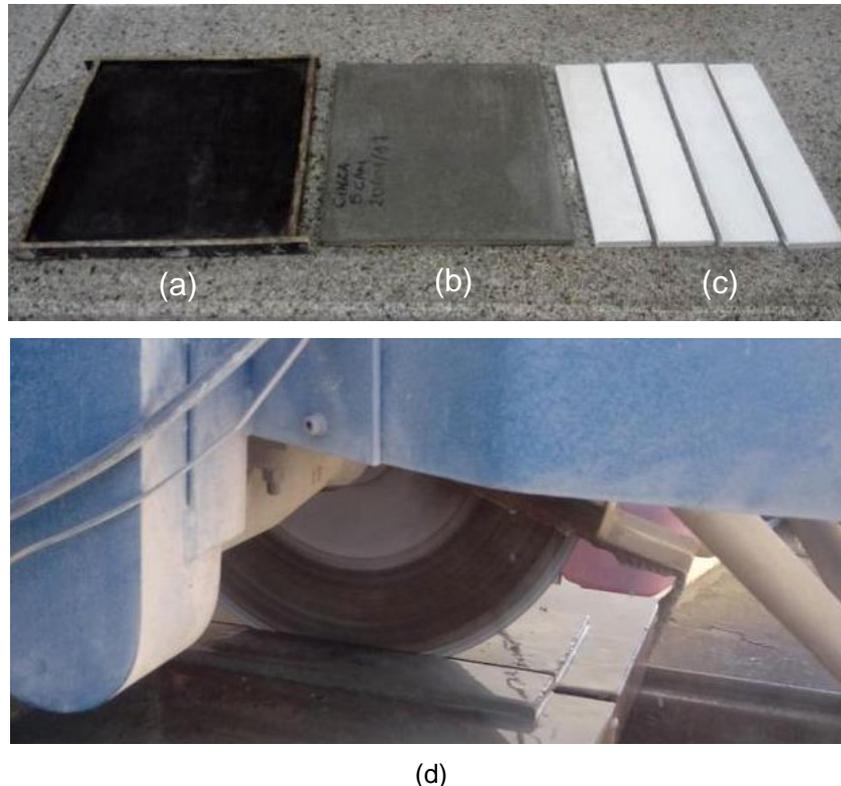
Figura 14 - Processo de produção dos compósitos reforçados com tecido de juta: (a) colocação da primeira camada de argamassa, (b) posicionamento do tecido de juta, (c) tecido posicionado, (d) tecido de juta devidamente ajustado, (e) colocação da segunda camada de argamassa e a (f) placa após a colocação de todas as camadas de argamassa e de reforço



Fonte: Elaboração própria

As fôrmas utilizadas (Figura 15-a) para a moldagem das placas apresentavam dimensões internas de 350 mm x 400 mm x 12 mm. Na Figura 15-b está indicada uma placa logo após o desmolde. Após serem desmoldadas, retirou-se 15 mm de cada lado das placas, com o intuito de anular o efeito parede e o fato do tecido de fibra não se acomodar corretamente nessa região. Posteriormente, essas placas foram divididas em 4 placas menores de dimensões 70 mm x 400 mm x 12 mm (Figura 15-c). Observa-se que ainda foi deixado o excedente de alguns milímetros para perdas de dimensões causadas pelo corte da serra elétrica (Figura 15-d) ao dividir as placas.

Figura 15 - Etapas do processo de obtenção das dimensões de ensaio dos corpos de prova: (a) fôrma utilizada para moldagem, (b) placa logo após desmolde, (c) placas nas dimensões de ensaio e (d) serra elétrica utilizada para dividir as placas



Fonte: Elaboração própria

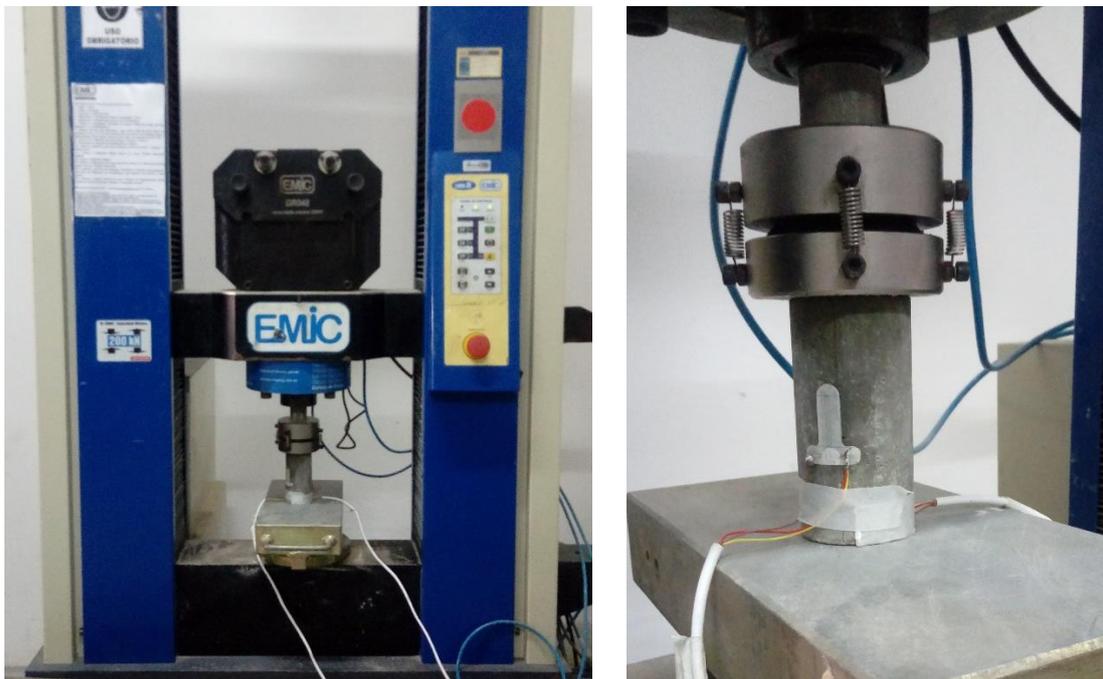
3.4 Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos foram realizados aos 180 dias de cura, para que fosse possível analisar a influência da substituição de cimento Portland por cinza volante quanto ao incremento da durabilidade da fibra de juta em meio alcalino.

3.4.1 Ensaios de compressão axial

Os ensaios de compressão foram executados na Máquina de Ensaios Universal EMIC DL20000 (Figura 16-a) com célula de carga de 200 kN à uma velocidade de deformação axial de 0,05 mm/min. Esses corpos de prova foram instrumentados com *strain-gages* (Figura 16-b) para que, além da resistência à compressão, fosse possível obter o módulo de elasticidade

Figura 16 - Ensaio de compressão axial: (a) Máquina de ensaios universal EMIC DL20000 e (b) corpo de prova instrumentado com *strain-gages*



(a)

Fonte: Elaboração própria

(b)

3.4.1.1 Cálculo do módulo de elasticidade

Após a execução dos ensaios de resistência a compressão, foram elaborados os gráficos de tensão x deformação. Os dados referentes à tensão foram obtidos a partir da leitura da força pela célula de carga da máquina de ensaios universal EMIC DL20000 sobre a área transversal do corpo de prova, enquanto que os dados referentes às deformações foram auferidos através da leitura dos *strain-gages*. Os módulos de elasticidade foram determinados como sendo a inclinação da reta desses gráficos, considerando o ponto de origem até o ponto correspondente à 40% da resistência máxima que o corpo de prova alcançou.

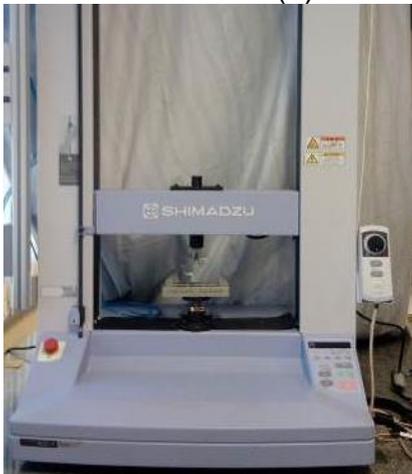
3.4.2 Ensaio de flexão em três pontos

Inicialmente era planejado realizar ensaios de flexão em quatro pontos, com amostras medindo 70 mm x 400 mm x 12 mm (largura x comprimento x espessura). – idênticas as do ensaio de tração direta. Entretanto, durante o processo de preparação das amostras e do processo de montagem do ensaio de tração direta, muitos corpos de prova fissuraram no sentido transversal. Visto que o ensaio de tração direta é o

mais indicado para o caso de compósitos com reforço têxtil, as amostras íntegras foram destinadas a este ensaio e aquelas que tiveram suas dimensões reduzidas (comprimento) puderam ser aproveitados no ensaio de flexão em três pontos.

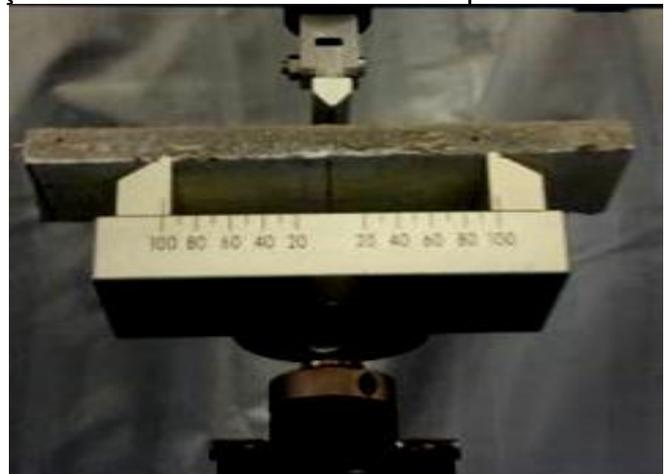
Os ensaios de flexão em três pontos foram realizados na máquina de ensaios mecânicos Shimadzu AGS-X 5 kN (Figura 17-a) à uma velocidade de ensaio de 0,2 mm/min. As amostras apresentavam largura de 50 mm e espessura de 12 mm, enquanto o comprimento variou entre 150 mm e 200 mm. Como é possível ver na Figura 17-b, o vão entre os apoios foi de 100 mm, sendo a carga aplicada no meio do vão. Os deslocamentos foram medidos através do deslocamento do travessão da máquina; a partir dos diagramas de tensão x deslocamento elaborados foram retirados todos os dados necessários para a análise dos resultados. Ademais, para calcular todas as tensões, tanto no ensaio de flexão em três pontos como no ensaio de tração direta, as dimensões das seções foram medidas com o auxílio de um paquímetro digital e os valores utilizados no cálculo foram os resultados da média de três medições.

Figura 17 - Ensaio de flexão em três pontos: (a) Máquina de Ensaio Universal Shimadzu AGS-5 kN e (b) configuração do ensaio de flexão em três pontos



(a)

Fonte: Elaboração própria



(b)

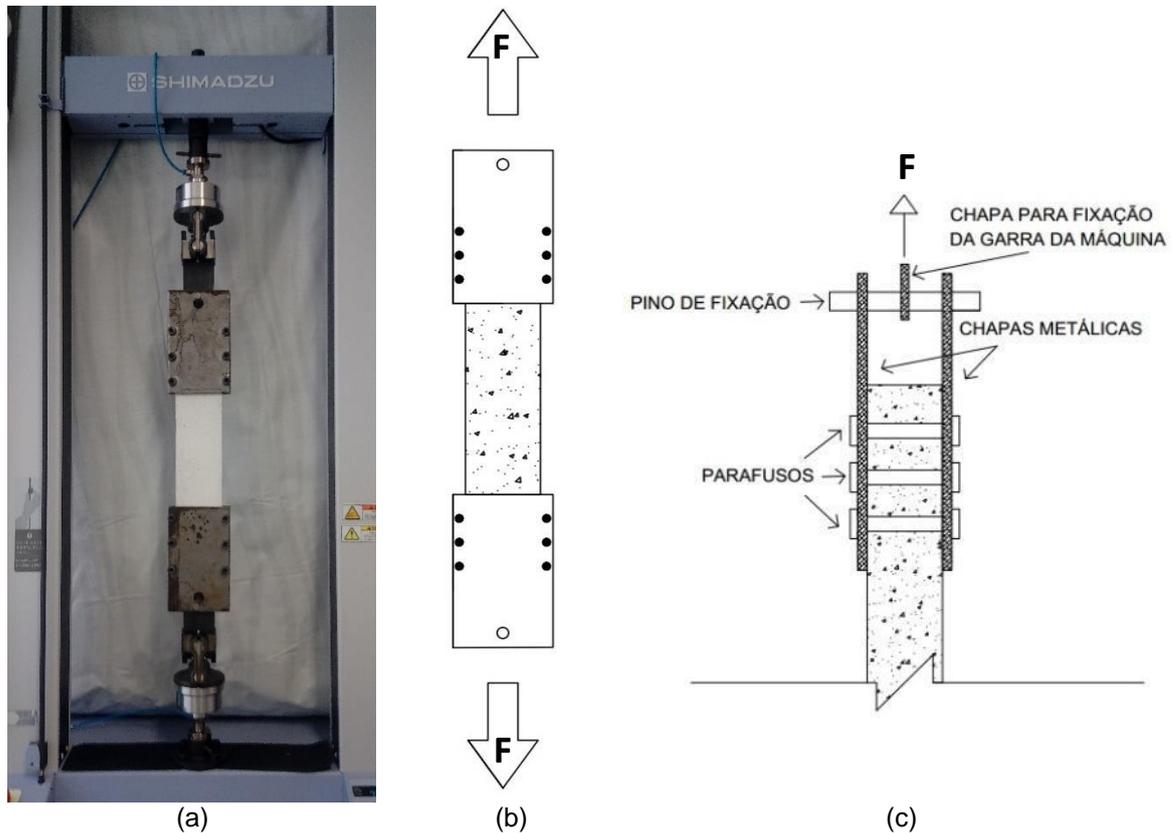
3.4.2.1 Tenacidade à flexão em três pontos

A tenacidade à flexão foi calculada através da relação da área sob a curva carga x deslocamento sobre a área da seção transversal da amostra. Nesse trabalho foram retirados os valores de tenacidade para o deslocamento correspondente à carga máxima e para os deslocamentos de 0,5 mm, 2 mm e 5 mm.

3.4.3 Ensaios de tração direta

Os ensaios de tração direta foram realizados na máquina de ensaios mecânicos Shimadzu AGS-X 5 kN (Figura 18-a). As Figuras 18-b-c contêm desenhos esquemáticos do aparato que foi utilizado (vista frontal e lateral, respectivamente) no ensaio de resistência à tração direta. A velocidade de ensaio utilizada foi de 0,5 mm/min. As dimensões dos corpos de prova foram de 70 mm x 400 mm x 12 mm (largura x comprimento x espessura).

Figura 18 - Ensaio Ensaio de tração direta: (a) máquina de ensaios universal Shimadzu AGS-5 kN, (b) esquema frontal do aparato utilizado para execução dos ensaios de tração direta – onde “F” é a força axial de tração – e (c) vista esquemática lateral do aparato de ensaio



A partir desse ensaio foram obtidos os diagramas de tensão x deslocamento dos compósitos (medido pelo movimento do travessão da máquina), dos quais foi possível retirar os valores de tensão máxima e o tipo de comportamento do compósito.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaio de compressão axial

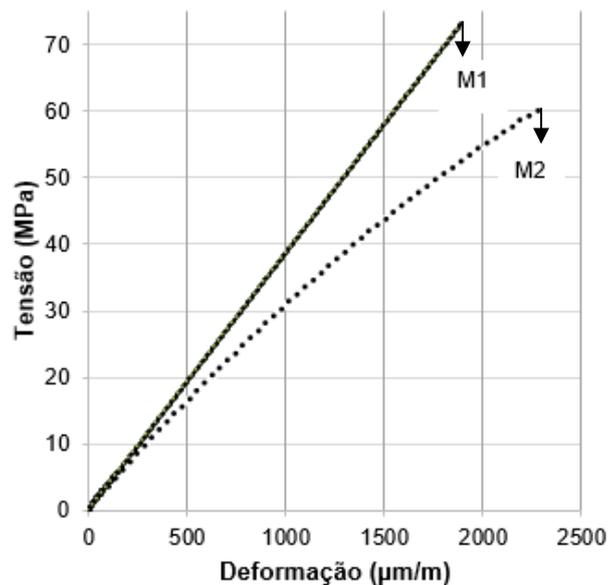
A Tabela 5 apresenta os valores de resistência máxima à compressão e o módulo de elasticidade das matrizes, obtidos a partir da média de quatro corpos de prova. A Figura 19 contém as curvas típicas do ensaio de resistência à compressão das matrizes M1 e M2. No Apêndice A encontram-se os dados de resistência à compressão e módulo de elasticidade por corpo de prova.

Tabela 5 - Valores médios de resistência à compressão das matrizes e os seus respectivos desvios padrão (DP) e coeficientes de variação (CV)

Matriz	Resistência à Compressão			Módulo de Elasticidade		
	f_c (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)	DP (GPa)	CV (%)
M1	79,21	5,26	6,64	37,29	2,83	7,59
M2	58,61	1,87	3,19	29,25	2,90	9,91

Fonte: Elaboração própria

Figura 19 - Curvas típicas do ensaio de resistência à compressão



Fonte: Elaboração própria

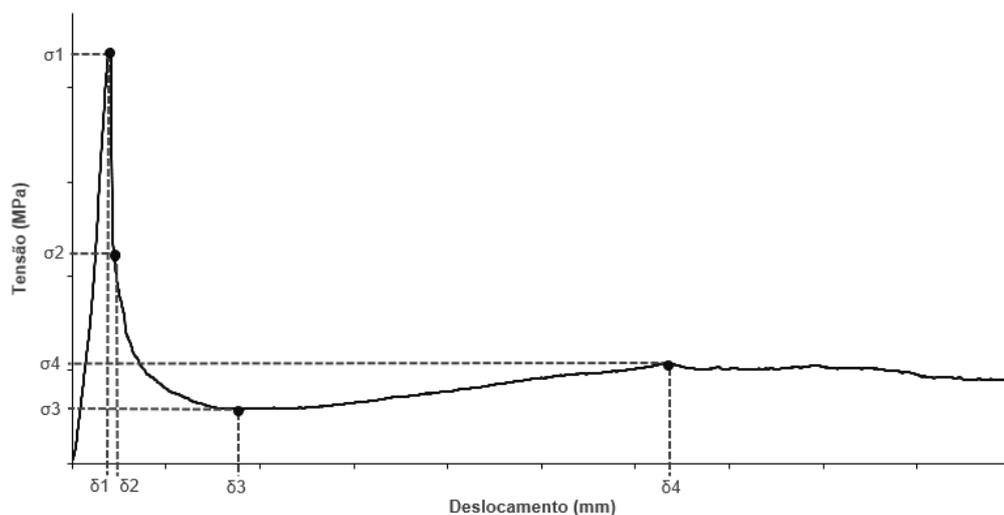
A partir dos dados apresentados, verificou-se que a substituição de 50% do cimento Portland CPV-ARI por cinza volante provocou decréscimo nos valores de resistência à compressão e do módulo de elasticidade quando comparado com a matriz de referência. Para a resistência à compressão essa redução corresponde a

26,00%, enquanto que para o módulo de elasticidade a queda do valor médio foi de 21,56%. Essa diferença é facilmente observada na Figura 19, principalmente devido a diferença de inclinação das curvas típicas de cada matriz. Dessa maneira, entende-se que o teor de cinza volante utilizado foi muito elevado e prejudicou as propriedades mecânicas à compressão da matriz.

4.2 Ensaio de flexão em três pontos

A Tabela 6 apresenta os valores médios das tensões σ_1 , σ_2 , σ_3 e σ_4 dos compósitos submetidos ao ensaio de flexão em três pontos e também a porcentagem de resistência mantida após a primeira fissura do compósito. A Figura 20 representa uma curva esquemática dos gráficos obtidos nesse ensaio, na qual estão indicados os pontos utilizados para a obtenção de cada tipo de tensão. A tensão σ_1 corresponde à tensão de pico dos compósitos, enquanto que a tensão σ_2 refere-se à região do gráfico onde a reta da queda de tensão pós-fissuração começa a ter sua inclinação suavizada. Por sua vez, o ponto σ_3 corresponde ao valor de tensão mais baixo após a fissuração e antes dos valores da curva voltarem a aumentar. Por fim, a tensão σ_4 é o maior valor de tensão encontrado após a ocorrência da tensão σ_3 . A Figura 21 representa o tipo de ruptura que todos os compósitos com fibras apresentaram quando submetidos ao ensaio de flexão em três pontos: surgimento de uma única fissura sob o ponto de aplicação de carga.

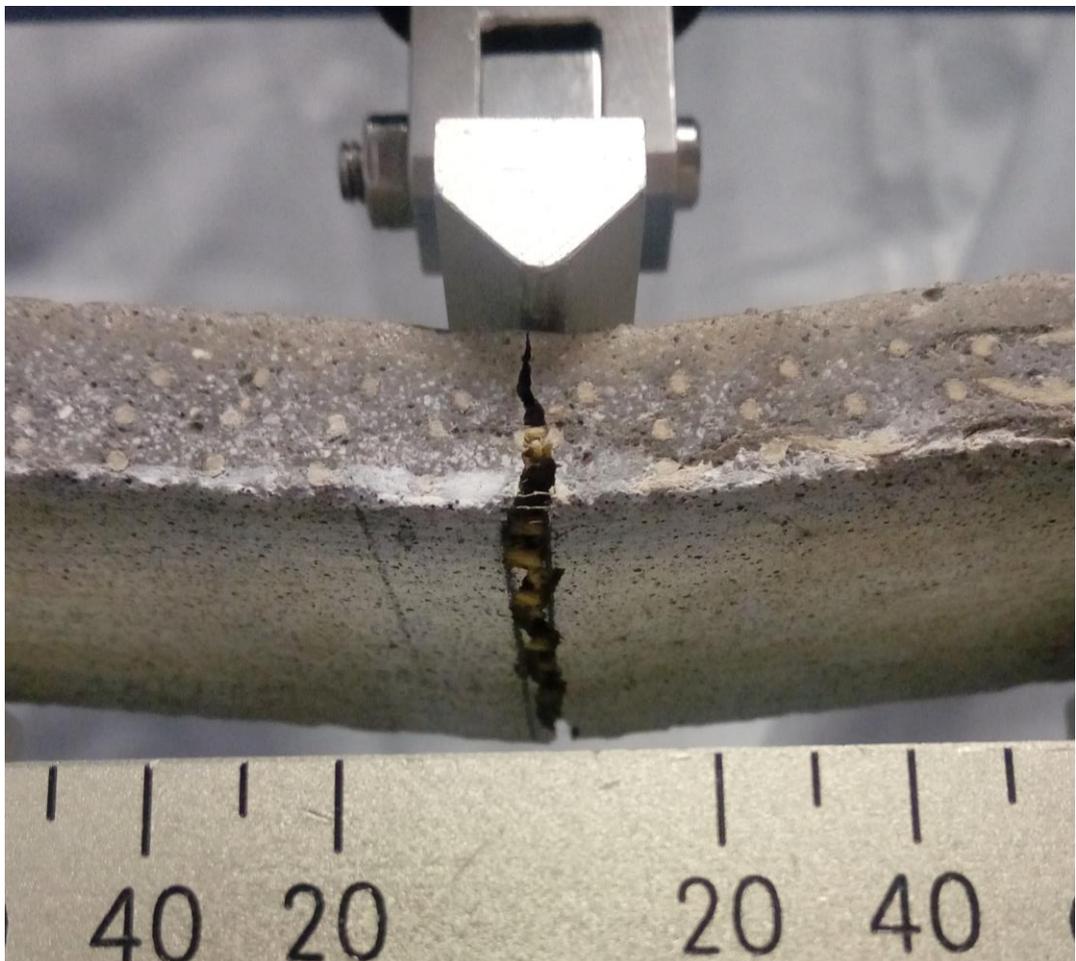
Figura 20 - Curva esquemática dos compósitos quando submetidos ao ensaio de flexão em três pontos indicando os pontos utilizados para a retirada das tensões σ_1 , σ_2 , σ_3 e σ_4



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 22 estão apresentadas as curvas típicas tensão x deslocamento para cada matriz e configuração de reforço, enquanto que na Figura 23 estão sintetizados os dados referentes às médias de cada tensão para todos os tipos de compósitos produzidos. Todos os dados contidos nas Tabelas 6 e 7 e nas Figuras 23 e 24 foram calculados a partir da média de 7 amostras. No Apêndice B encontram os dados das tensões σ_1 , σ_2 , σ_3 e σ_4 por amostra e no Apêndice C estão os dados referente ao cálculo das tenacidades à flexão em três pontos por amostra.

Figura 21– Ruptura característica do comportamento *strain-softening* – apresentada por todos os compósitos com fibras quando submetidos ao ensaio de flexão em três pontos



Fonte: Elaboração própria

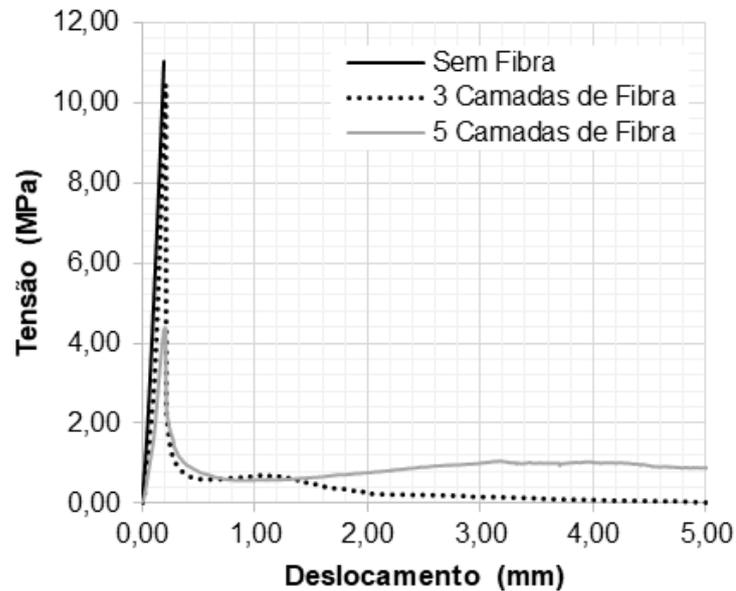
Tabela 6 - Tensões σ_1 , σ_2 , σ_3 e σ_4 e resistência mantida após a primeira fissura; os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão

Tipo da amostra		Tensão (MPa)				Resistência mantida após 1ª fissura (%)
Matriz	Fibra	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	
M1	Sem Fibra	9,99 (1,22)				0,00
	3 Camadas de Fibra	9,80 (4,14)	2,62 (1,20)	0,49 (0,31)	0,78 (0,38)	26,76
	5 Camadas de Fibra	4,36 (0,33)	2,30 (0,24)	0,68 (0,10)	0,94 (0,20)	52,79
M2	Sem Fibra	9,35 (2,22)				0,00
	3 Camadas de Fibra	5,67 (1,10)	1,91 (0,32)	0,37 (0,07)	0,44 (0,07)	33,72
	5 Camadas de Fibra	4,02 (0,49)	1,61 (0,24)	0,56 (0,24)	0,73 (0,22)	40,13

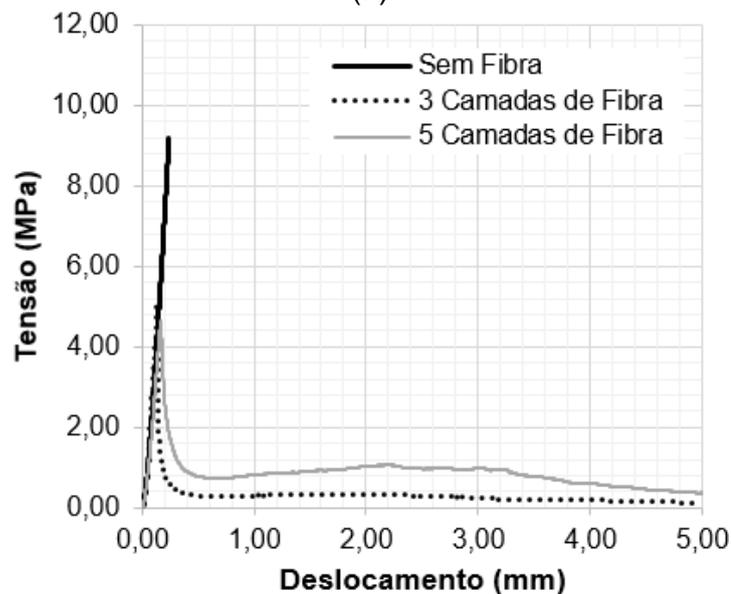
Fonte: Elaboração própria

A partir da Tabela 6, da comparação da Figura 22-a com a Figura 22-b e da Figura 23-a com a Figura 23-b, é possível perceber que a substituição de 50% do cimento Portland CPV-ARI por cinza volante provocou, em todos os casos, decréscimo nos valores de tensão. Comparando a tensão máxima média (σ_1) das amostras sem fibra, esse decréscimo é de 6,41%. Para as amostras reforçadas, o decréscimo da tensão máxima corresponde a 42,14% para a configuração com 3 camadas de tecido de juta e 7,80% para os com 5 camadas.

Figura 22 - Curvas típicas tensão x deslocamento dos compósitos produzidos a partir das matrizes M1 e M2, respectivamente



(a)



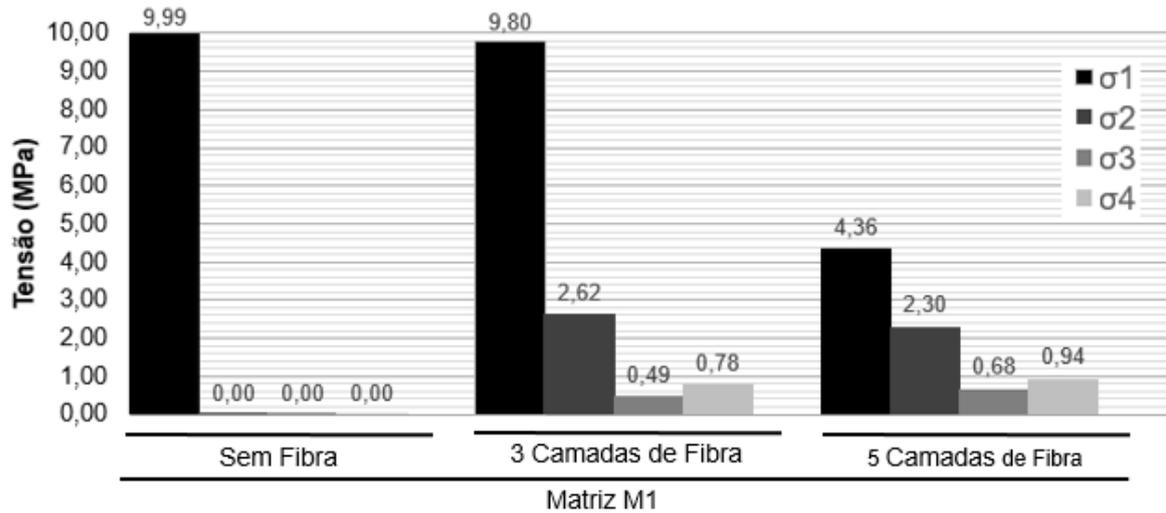
(b)

Fonte: Elaboração própria

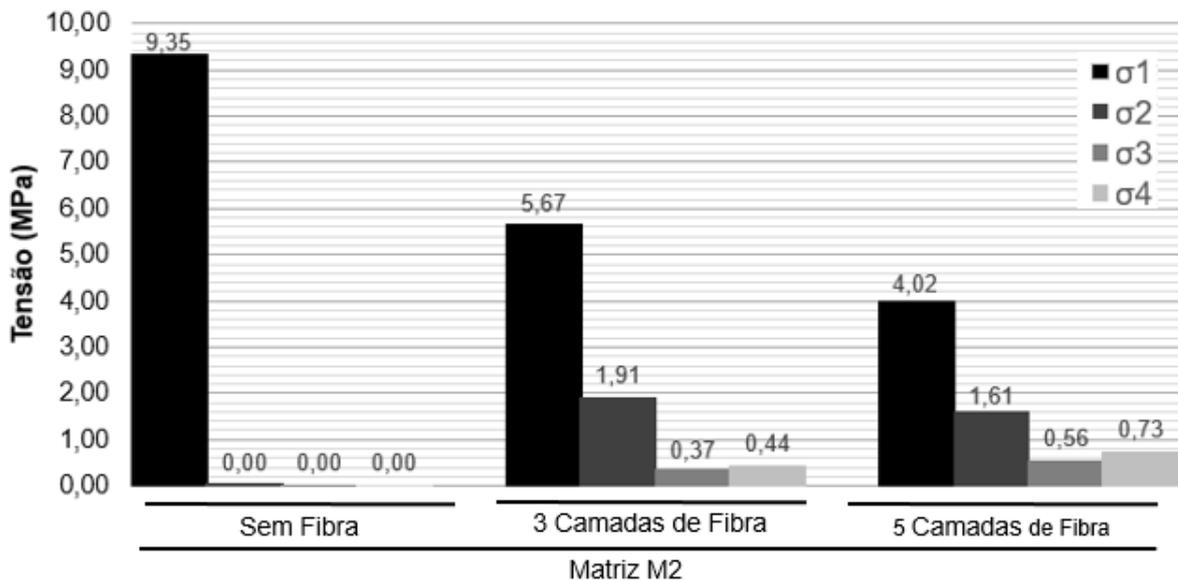
Tanto nos compósitos produzidos a partir da matriz M1 como nos produzidos a partir da matriz M2, o uso do reforço fibroso provocou queda nos valores de tensão máxima, mas contornou o comportamento frágil da matriz cimentícia. Quanto aos resultados referentes à matriz M1, os compósitos com 3 camadas apresentaram uma queda de tensão máxima de apenas 1,90% em relação àqueles sem fibra; entretanto, apresentaram tensão σ_2 de 2,62 MPa. Nos compósitos com 5 camadas de tecido de fibra de juta, a tensão máxima caiu 56,36% em relação à referência e a tensão σ_2 foi

de 2,30 MPa. No que tange os dados pertinentes à matriz M2, os valores de tensão máxima diminuíram, em relação à média das amostras sem fibra, 39,36% e 57,00% para os compósitos com 3 e 5 camadas de tecido de fibra juta, respectivamente.

Figura 23 - Tensões σ_1 , σ_2 , σ_3 e σ_4 médias para os compósitos (a) produzidos a partir da matriz M1 e (b) a partir da matriz M2



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria

Em ambas as matrizes, as amostras com 3 camadas de reforço de tecido apresentaram valores de tensão máxima e de pós-pico superiores às amostras reforçadas com 5 camadas. Entretanto, nos compósitos com 5 camadas a

transferência de tensão da matriz para as fibras ocorreu mais adequadamente, uma vez que os valores de tensão máxima e da tensão σ_2 dessas amostras são mais próximos. Tal fato pode ser observado na Tabela 6, comparando as porcentagens de resistência mantida após a primeira fissura, sendo sempre superiores para os compósitos de 5 camadas. Em ambas as matrizes, os compósitos com 5 camadas de fibra também apresentaram tensões σ_3 e σ_4 mais elevadas.

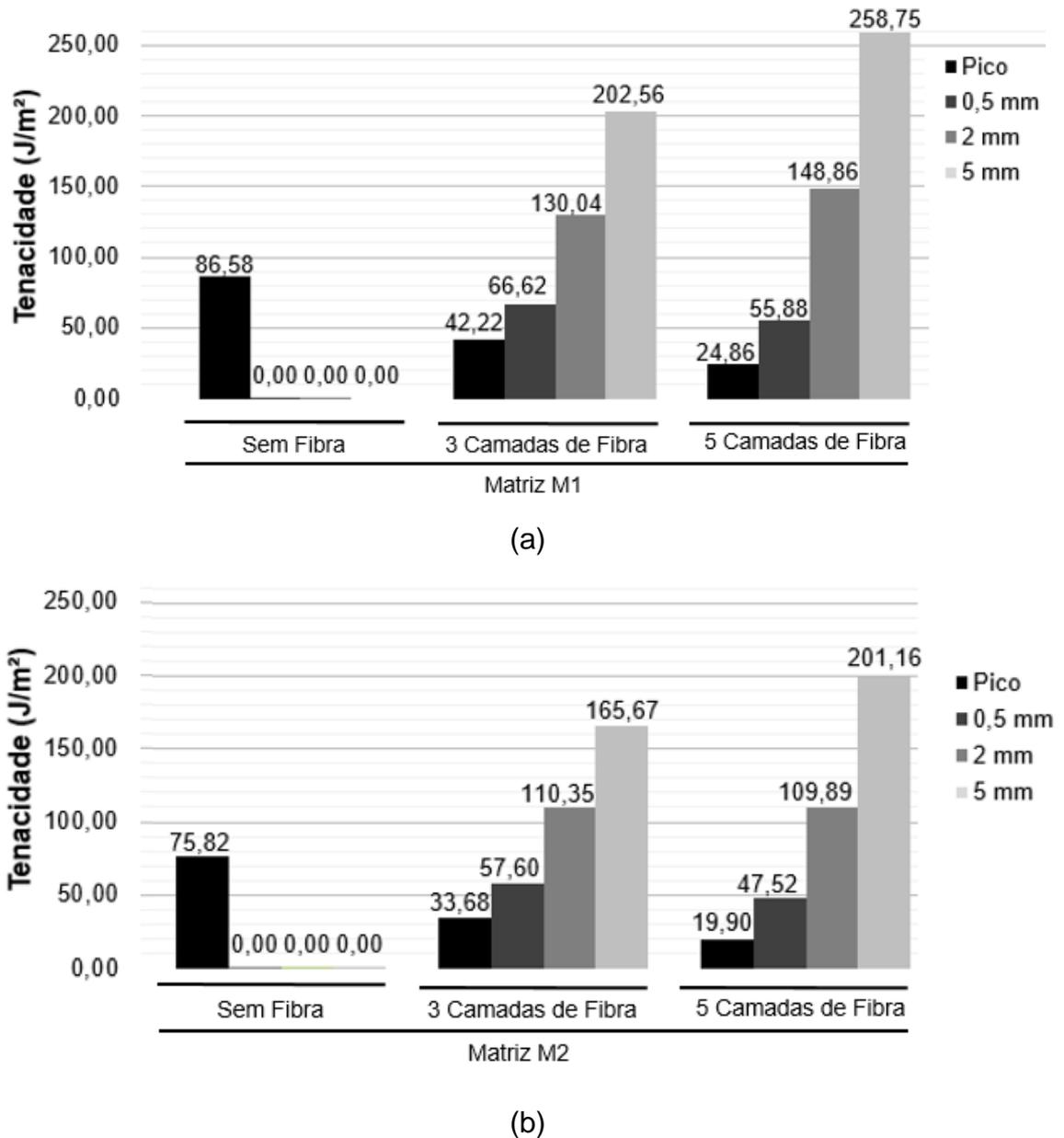
Para avaliar a capacidade de absorção de energia dos compósitos, foram calculadas as tenacidades à flexão para o deslocamento corresponde ao ponto de fissuração das amostras e para os deslocamentos de 0,5 mm, 2 mm e 5 mm; os resultados encontram-se na Tabela 7 e estão sintetizados na Figura 24.

Tabela 7 - Tenacidades médias para cada configuração de compósito, calculadas a partir da área sob a curva até o ponto de tensão máxima e para os deslocamentos de 0,5 mm, 2 mm e 5mm; os valores entre parênteses referem-se aos desvios padrão

Tipo da amostra		Tenacidade (J/m ²)			
		Deslocamento			
Matriz	Fibra	Pico	0,5 mm	2 mm	5 mm
M1	Sem Fibra	86,58 (33,72)			
	3 Camadas de Fibra	42,22 (12,86)	66,62 (15,91)	130,04 (33,69)	202,56 (82,89)
	5 Camadas de Fibra	24,86 (7,12)	55,88 (8,88)	148,86 (28,45)	258,75 (67,43)
M2	Sem Fibra	75,82 (25,77)			
	3 Camadas de Fibra	33,68 (15,34)	57,6 (17,35)	110,35 (24,12)	165,67 (29,43)
	5 Camadas de Fibra	19,9 (4,84)	47,52 (11,30)	109,89 (35,91)	201,16 (74,97)

Fonte: Elaboração própria

Figura 24 - Tenacidades à flexão médias para cada configuração de compósito: (a) produzidos a partir da matriz M1 e (b) a partir da matriz M2



Fonte: Elaboração própria

Através da análise desses dados inferiu-se que quanto menor o volume de fibra da amostra, mais energia ela absorve até o pico; esse fato ocorre devido a tensão máxima dessas amostras serem superiores. Entretanto, após a fissuração, as amostras sem fibra rompem e não apresentam mais a capacidade de absorver energia.

Aos 0,5 mm de deslocamento, as amostras com 3 camadas de fibra absorveram 19,22% (M1) e 21,21% (M2) mais energia em relação as amostras com 5

camadas de fibra, ainda devido ao fato de apresentarem resistências máximas superiores. Contudo, a medida que o deslocamento aumenta, as amostras com maior volume de fibra conseguem segurar mais tensão e, por consequência, absorver mais energia.

Na matriz M1, até o deslocamento de 2 mm, as amostras contendo 5 camadas de fibra passam a apresentar uma tenacidade 14,20% maior do que as amostras com 3 camadas; aos 5 mm de deslocamento este valor sobe para 27,74%. Na matriz M2, aos 2 mm de deslocamento, o valor da tenacidade para os compósitos com 3 e 5 camadas de fibra é muito próximo. Contudo, aos 5 mm de deslocamento a tenacidade dos compósitos com 5 camadas passa a ser 21,42% maior que os com 3 camadas.

Considerando que a diferença entre os valores de tensão máxima para as amostras sem fibras produzidas a partir da matriz M1 e da matriz M2 não é estatisticamente significativa (análise realizadas pela técnica ANOVA, pelo método de Tukey e com nível de significância de 5% - os dados dessa análise encontram-se no Apêndice D), acredita-se que a trabalhabilidade da matriz M2 foi um fator determinante para a significativa queda de tensão máxima ao ser adicionada as fibras. Uma trabalhabilidade inadequada na presença das fibras não só dificulta o processo de moldagem dos compósitos (acarretando em irregularidades) como também propicia a existência de vazios nas amostras, principalmente no cruzamento entre cordões da malha. Mesmo a matriz referência apresentando trabalhabilidade melhor que a matriz M2, ainda assim não foi suficiente para realizar adequadamente a moldagem dos compósitos com 5 camadas de fibra, uma vez que a dificuldade de moldagem destes em relação aos de 3 camadas é muito maior.

4.3 Ensaio de tração direta

A Tabela 8 apresenta os valores de tensão máxima e média de cada amostra, o desvio padrão e o coeficiente de variação. Os asteriscos correspondem ao tipo de ruptura de cada amostra, conforme a legenda abaixo da referida tabela. Cabe salientar que o valor do desvio padrão é alto. Entretanto, essa discrepância é encontrada em diversos trabalhos científicos, devido à dificuldade de realização do ensaio. Na Figura 25-a-b estão representadas as curvas típicas dos compósitos produzidos a partir da matriz M1 e M2, respectivamente.

A Figura 26 apresenta o tipo de fissura que ocorreu nos compósitos com fibras que apresentaram comportamento *strain-softening* (conforme legenda da Tabela 8). A ruptura dessas amostras ocorreu pelo surgimento e alargamento de uma única fissura, sendo essa fissura perpendicular à direção da força e o local do seu surgimento entre as posições de fixação das placas metálicas.

Tabela 8 - Tensão máxima à tração direta por amostra, tensão máxima média, desvio padrão e coeficiente de variação

Configuração		CP	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{máx}}$ Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
Matriz	Fibra					
M1	Sem Fibra	CP01*	0,76	1,12	0,30	26,89
		CP02*	1,01			
		CP03*	1,45			
		CP04*	1,27			
	3 Camadas de Fibra	CP01**	0,36	0,36	-	-
		CP02***				
		CP03***				
		CP04***				
	5 Camadas de Fibra	CP01*	0,43	0,36	0,20	54,47
		CP02*	0,20			
		CP03*	0,21			
		CP04**	0,61			
M2	Sem Fibra	CP01*	1,06	1,30	0,31	24,21
		CP02*	1,72			
		CP03*	1,06			
		CP04*	1,36			
	3 Camadas de Fibra	CP01**	0,83	0,78	0,09	11,50
		CP02*	0,78			
		CP03**	0,85			
		CP04**	0,65			
	5 Camadas de Fibra	CP01**	0,75	0,81	0,29	36,36
		CP02**	0,50			
		CP03*	0,78			
		CP04**	1,21			

*Amostras que apresentaram ruptura frágil;

**Apresentaram comportamento *strain-softening*;

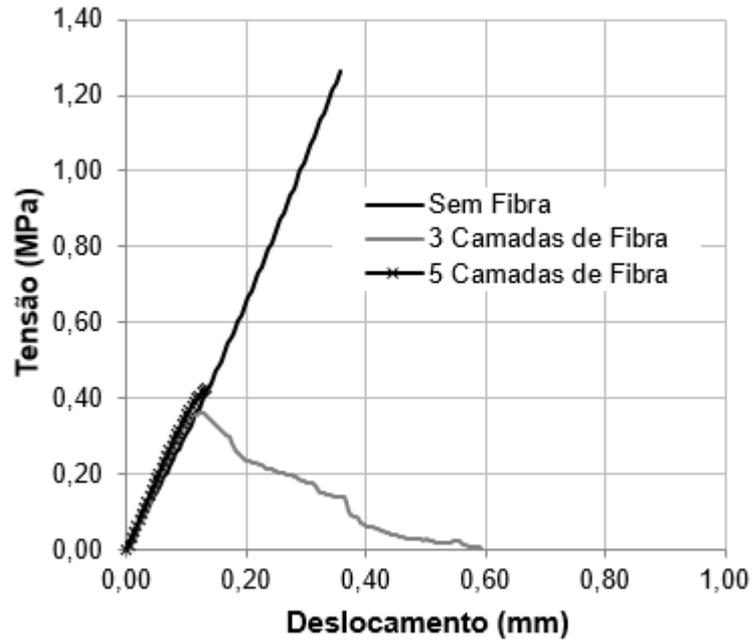
***Romperam durante o processo de fabricação e preparação das amostras.

Fonte: Elaboração própria

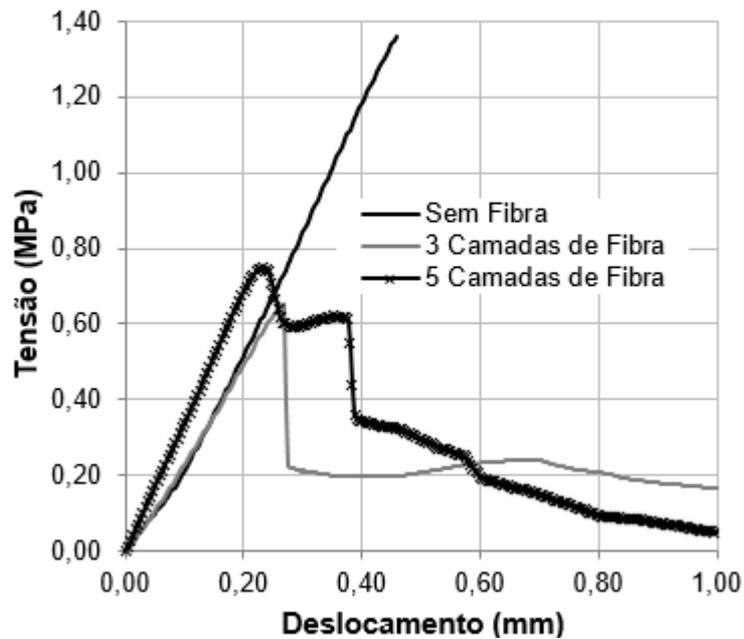
A partir da Tabela 7 e da comparação entre as Figuras 25-a e Figura 25-b é possível perceber que, de modo geral, a adição de cinza volante (matriz M2) proporcionou o aumento da tensão máxima em relação às amostras feitas a partir da

matriz M1. Comparando a média das amostras sem fibra, esse aumento é de 16,07%. Nas amostras reforçadas, esse incremento é mais significativo: corresponde à 116,66% para os compósitos reforçados com 3 camadas de tecido de juta e 125% para os com 5 camadas.

Figura 25 - Curvas típicas dos compósitos quando submetidos a esforço de tração direta: (a) produzidos a partir da matriz M1 e (b) da matriz M2



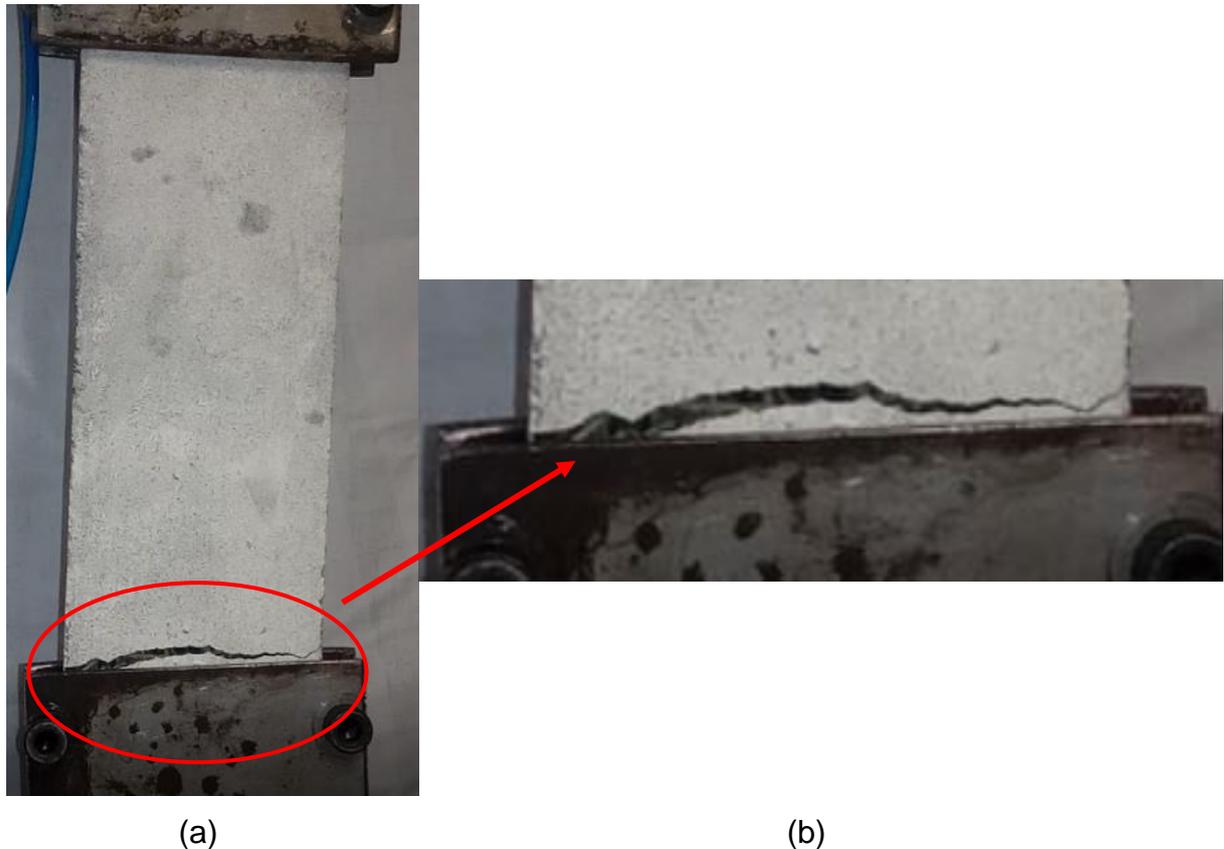
(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria

Figura 26 – Fissuração característica das amostras que apresentaram comportamento *strain-softening*



Fonte: Elaboração própria

Observando os resultados referentes à matriz M1, conclui-se que os compósitos reforçados apresentaram uma tensão de pico 67,86% menor em relação àqueles sem fibra. Quanto aos produzidos a partir da matriz M2, a tensão máxima decaiu 40,00% para os CP's reforçados com 3 camadas e 37,69% para os com 5 camadas.

Em todas as amostras a ruptura aconteceu pela abertura e alargamento de uma única fissura. Entretanto, nos compósitos sem a adição mineral, apenas 2 amostras apresentaram comportamento *strain-softening*, enquanto que nos compósitos com adição de cinza volante, este número aumentou para 6.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A resistência máxima média à compressão da matriz M2 foi de 58,61 MPa, enquanto a da matriz de referência foi de 79,21 MPa. Por sua vez, os módulos de elasticidade obtidos foram de 29,25 GPa para a matriz M2 e 37,29 GPa para a matriz de referência. Dessa maneira, a substituição de 50% de cimento Portland CPV – ARI por cinza volante significou uma queda de 26,00% no valor de resistência à compressão e de 21,56% no valor do módulo de elasticidade.

No ensaio de flexão em três pontos, os valores de resistência máxima média das duas matrizes não apresentaram diferença significativa a um nível de significância de 0,05 (Apêndice D), alcançando as médias de 9,99 MPa para a matriz M1 e 9,80 MPa para a matriz M2. No ensaio de tração direta as duas matrizes também não apresentaram diferença significativa (Apêndice E); entretanto, enquanto a resistência média da matriz M1 foi de 1,12 MPa, a da matriz M2 foi de 1,30 MPa.

Quanto à caracterização das amostras reforçadas com fibra de juta, os resultados obtidos a partir do ensaio de flexão em três pontos e do ensaio de tração direta foram divergentes. No ensaio de flexão em três pontos, em todas as configurações de reforço, as amostras produzidas a partir da matriz de referência apresentaram resultados superiores às aquelas feitas a partir a matriz M2. Por outro lado, no ensaio de tração direta, os resultados obtidos com as amostras contendo cinza volante foram melhores para todas as configurações de reforço.

Contudo, tanto no ensaio de flexão em três pontos quanto nos de tração direta, os valores de tensão máxima suportada caíram ao passo que foi adicionada a fibra aos compósitos e a ruptura de todas as amostras aconteceu pela abertura e alargamento de uma única fissura. Então, pode-se concluir que apenas a utilização da adição de cinza volante não foi suficiente para garantir a durabilidade da fibra dentro da matriz cimentícia e em decorrência dos 6 meses de envelhecimento, é possível que as fibras já se encontravam com sua integridade severamente diminuída na data dos ensaios.

Tanto no ensaio de flexão em três pontos quanto no de tração direta, o uso de fibra de juta provocou queda na tensão máxima, mas contornou o comportamento frágil das matrizes. No ensaio de flexão, as amostras reforçadas com 3 camadas de fibra apresentaram resistência máxima (σ_1) e de pós-fissuração (σ_2) superiores às amostras com 5 camadas. Entretanto, quando reforçados com 5 camadas de fibra, os

compósitos conseguiram manter maior porcentagem da carga após a fissuração e apresentaram valores maiores para as tensões σ_3 e σ_4 .

No ensaio de tração direta, para a matriz de referência, as amostras com 5 camadas de fibra apresentaram uma tensão máxima 72,30% maior que as com 3 camadas; para a matriz contendo cinza volante, a resistência máxima das amostras com 5 camadas de fibra em relação às com 3 camadas foi 3,70% maior. Além disso, vale ressaltar que nesse ensaio, para os compósitos sem a adição mineral, apenas duas amostras apresentaram comportamento *strain-softening*, enquanto que nos compósitos com adição de cinza volante, este número aumentou para 6.

A queda da tensão máxima que ocorre ao adicionar o reforço têxtil à matriz pode ser atribuída à trabalhabilidade inadequada das matrizes para a produção de amostras com fibra. Dessa maneira, acredita-se houve a ocorrência de espaços vazios, principalmente, como já havia sido verificado por Fidelis (2014), no cruzamento entre os cordões da malha.

Em suma, considera-se que cinza volante prejudicou o comportamento mecânico à compressão e não proporcionou significativa mudança nas propriedades mecânicas à flexão e à tração direta. Tendo isso em vista, acredita-se que a granulometria da cinza volante empregada não foi adequada para a interação química com o hidróxido de cálcio produzido pela hidratação do cimento Portland. Por sua vez, a fibra de juta, por já se encontrar com sua integridade comprometida no momento dos ensaios, não foi capaz de proporcionar aumento da tensão de primeira fissura dos compósitos e nem a ocorrência do comportamento *strain-hardening* com múltipla fissuração, mas contornou o comportamento frágil da matriz cimentícia.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Quanto à matriz:

- Verificar a utilização de uma cinza volante com um menor módulo de finura, tendo em vista o aumento da reatividade com os produtos provenientes da hidratação do cimento Portland;
- Estudar outras matrizes cimentícias, compostas por diferentes materiais pozolânicos em diferentes porcentagens, realizando a averiguação da trabalhabilidade de cada mistura e consumo de hidróxido de cálcio que cada uma apresenta em uma idade de cura padrão.

Quanto à fibra:

- Como a configuração de fibra utilizada (formada por cordões) apresenta uma área superficial muito inferior ao ser comparada com o mesmo volume de fibras em formas de fios soltos, ela oferece pouca aderência entre as fibras e a matriz; sendo assim, seria interessante estudar o emprego da fibra de juta em forma de fios alinhados longitudinalmente;
- Em paralelo ao emprego de uma matriz livre de hidróxido de cálcio, estudar um tratamento superficial para a fibra de juta – como hornificação ou impregnação com polímero – para que ela apresente estabilidade dimensional e não se degrade ao longo do tempo, proporcionado assim o aumento da resistência máxima do compósito e conferindo a ele comportamento *strain-hardening* com múltipla fissuração.

Quanto aos procedimentos a serem adotados:

- Estabelecer um método para a produção dos compósitos que seja de maior facilidade de execução e proporcione maior uniformização entre as amostras;
- Ensaia um maior número de amostras para o ensaio de tração direta;
- Ensaia os compósitos em diferentes idades, afim de avaliar o processo de degradação da fibra.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

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

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; FILHO, R. D. T. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: a review of recent research. *Construction and building materials*, Elsevier, v. 79, p. 115–128, 2015.

BALAGURU, P.N.; SHAH, S.P. **Fiber Reinforced Cement Composites**, McGraw Hill, New York, 1992.

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

DITTENBER, D. B.; GANGARAO, H. V. S. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 43, n. 8, p. 1419-1429, 2012.

Ecológica, juta mira mercado de saco plástico. **Ambiente Sustentável**. São Paulo, 29 set. 2011. Disponível em: < <http://ambientalsustentavel.org/2011/ecologica-juta-mira-mercado-de-saco-plastico/>>. Acesso em: 23 de abr. de 2017.

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.

FIDELIS, M. E. A. **Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta**. 2014. 290 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

GRAM, H. E. **Durability of Natural Fibres in Concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 255 p. 1983

GRAUPNER, N.; MUSSIG, J. Technical applications of natural fibres: an overview. **Industrial applications of natural fibres: structure, properties and technical applications**, p. 63-71, 2010.

ISAIA, G.C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão de armadura.** 1995. 280 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. **Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso.** Ambiente Construído, v. 4, n. 2, p. 19-30, 2004.

Juta e malva são plantadas às margens do rio, em floresta amazônica. **Pautas na Web**, São Paulo, 27 mai. 2012. Disponível em: <<http://pautasnaweb.wordpress.com/2012/05/27/juta-e-malva-sao-plantadas-asmargens-do-rio-em-plena-floresta-amazonica/>>. Acesso em: 26 abr. 2017

Jute. **International Natural Fiber Organization**, 2 set. 2012. Disponível em: <naturalfibersinfo.org/natural-fibers/jute/>. Acesso: 22 abr. 2017.

LIMA, P. R. L. 2004. **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal.** 287 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MALLICK, P. K. **Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design.** CRC press, 2007.

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

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.

NEVILLE, A. M. Cements of different types. In: **Properties of Concrete.** 3 rd. Longman Scientific & Technical, 1982. P.63-117

OLIVEIRA, M. S. **Desenvolvimento e caracterização de telhas cimentícias reforçadas com tecido de fibras vegetais da Amazônia.** 2017. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

PELED, A.; MOBASHER, B. Pultruded fabric-cement composites. **ACI Materials Journal-American Concrete Institute**, v. 102, n. 1, p. 15-23, 2005.

PIRES, E. N. **Efeito do tratamento de superfície em fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi**. 2009. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009

Produtos feitos da juta. **Castanhal Companhia Têxtil**. São Paulo, 2013. Disponível em: < <http://www.castanhal.com.br/>>. Acesso em: 6 mai. 2017

RAMBO, D. A. S. **Efeito da temperatura no comportamento mecânico de compósitos refratários reforçados com tecidos de basalto e carbono**. 2016. 228 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

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.

SILVA, F. 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.

SILVA, M. G. da. **Cimentos Portland com adições minerais**. Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais. Isaia, GC (ed.). São Paulo: Ibracon, p. 761-793, 2007.

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.

TOMCZAK, F. **Estudo sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil**. 2010. 135 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

VELASCO, R. V., **Concretos Autoadensáveis Reforçados com Elevadas Frações Volumétricas de Fibras de Aço: Propriedades Reológicas, Físicas, Mecânicas e Térmicas**. 2008. 349 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

APÊNDICE A – Resultados por corpo de prova obtidos através dos ensaios de resistência à compressão

Matriz	Nº CP	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
M1	CP01	73,24	38,378
	CP02	81,23	29,63*
	CP03	83,16	34,075
	CP04	62,50*	39,409
M2	CP01	56,0	31,99
	CP02	58,5	26,60
	CP03	59,5	31,50
	CP04	60,4	26,89

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

Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE B – Resultados por amostra das tensões σ_1 , σ_2 , σ_3 e σ_4 obtidas através do ensaio de flexão em três pontos

Tipo da Amostra		Nº CP	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_3 (MPa)	σ_4 (MPa)
Matriz	Fibra					
M1	Sem Fibra	CP01	10,78	0,00	0,00	0,00
		CP02	8,24	0,00	0,00	0,00
		CP03	9,23	0,00	0,00	0,00
		CP04	8,72	0,00	0,00	0,00
		CP05	10,65	0,00	0,00	0,00
		CP06	11,03	0,00	0,00	0,00
		CP07	11,26	0,00	0,00	0,00
	3 Camadas de Fibra	CP01	15,61	3,84	0,98	1,65
		CP02	13,65	1,71	0,00*	0,00*
		CP03	10,98	4,08*	1,07*	1,23
		CP04	8,23	3,92	0,36	0,36
		CP05	10,44	2,31	0,61	0,70
		CP06	4,39	1,32	0,27	0,35
		CP07	5,28	0,99*	0,23	0,41
	5 Camadas de Fibra	CP01	4,57	2,72	0,79	1,19
		CP02	4,54	2,53	0,66	0,95
		CP03	4,18	2,13	0,78	1,08
		CP04	4,79	2,09	0,74	0,77
		CP05	4,27	2,23	0,70	0,92
		CP06	3,78	2,08	0,52	0,61
		CP07	4,38	2,33	0,58	1,06
M2	Sem fibra	CP01	14,14	0,00	0,00	0,00
		CP02	9,20	0,00	0,00	0,00
		CP03	7,93	0,00	0,00	0,00
		CP04	7,27	0,00	0,00	0,00
		CP05	9,15	0,00	0,00	0,00
		CP06	9,68	0,00	0,00	0,00
		CP07	8,06	0,00	0,00	0,00
	3 camadas de Fibra	CP01	5,93	1,82	0,46	0,53
		CP02	4,01	1,90	0,37	0,41
		CP03	7,64	2,38	0,44	0,50
		CP04	5,57	1,52	0,34	0,44
		CP05	5,38	1,53	0,40	0,51
		CP06	5,09	2,01	0,28	0,35
		CP07	6,06	2,22	0,31	0,35
5 Camadas de Fibra	CP01	3,66	1,88	0,60	0,78	
	CP02	3,63	1,43	0,83	0,83	
	CP03	4,64	1,18	0,73	1,07	
	CP04	3,82	1,69	0,15*	0,55	
	CP05	4,07	1,56	0,00*	0,00*	
	CP06	3,59	1,79	0,40	0,72	
	CP07	4,76	1,77	0,23	0,43	

*Valores não utilizados para o cálculo das médias e desvios padrão;

Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE C – Resultados por amostra da tenacidade à flexão em três pontos para os deslocamentos correspondente à tensão de pico, 0,5 mm, 2 mm e 5 mm

Tipo da Amostra		Nº CP	Tenacidade (J/m ²)			
Matriz	Fibra		Pico	0,5 mm	2 mm	5 mm
M1	Sem Fibra	CP01	72,98	0,00	0,00	0,00
		CP02	54,36	0,00	0,00	0,00
		CP03	64,57	0,00	0,00	0,00
		CP04	61,57	0,00	0,00	0,00
		CP05	108,09	0,00	0,00	0,00
		CP06	95,01	0,00	0,00	0,00
		CP07	149,48	0,00	0,00	0,00
	3 Camadas de Fibra	CP01	48,57	84,19	175,01	362,39
		CP02	37,63	45,49	0,00	0,00
		CP03	31,34	72,32	157,64	212,66
		CP04	38,81	73,91	126,16	144,36
		CP05	54,50	77,04	132,98	163,27
		CP06	24,32	43,03	81,92	142,33
		CP07	60,37	70,35	106,53	190,38
	5 Camadas de Fibra	CP01	32,33	71,07	209,57	336,29
		CP02	20,70	54,45	143,86	217,46
		CP03	18,78	48,00	152,18	220,53
		CP04	22,80	51,98	134,80	218,18
		CP05	15,46	45,90	137,99	215,61
		CP06	31,54	55,94	120,92	227,67
		CP07	32,41	63,84	142,73	375,52
M2	Sem Fibra	CP01	124,73	0,00	0,00	0,00
		CP02	88,16	0,00	0,00	0,00
		CP03	54,52	0,00	0,00	0,00
		CP04	50,92	0,00	0,00	0,00
		CP05	73,57	0,00	0,00	0,00
		CP06	81,24	0,00	0,00	0,00
		CP07	57,58	0,00	0,00	0,00
	3 Camadas de Fibra	CP01	34,42	57,76	121,66	171,10
		CP02	18,86	44,99	99,56	136,65
		CP03	65,98	93,89	157,68	225,21
		CP04	27,28	48,20	91,82	159,62
		CP05	29,27	51,73	111,45	171,92
		CP06	24,45	44,06	85,18	142,52
		CP07	35,47	62,58	105,10	152,68
5 Camadas de Fibra	CP01	17,79	44,57	130,87	203,57	
	CP02	17,60	53,77	123,47	145,78	
	CP03	26,90	65,33	168,76	349,56	
	CP04	13,75	29,62	60,41	162,13	
	CP05	21,56	53,32	111,00	131,59	
	CP06	16,41	41,18	96,77	240,73	
	CP07	25,31	44,83	77,90	174,77	

Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE D – Resultados da análise estatística da comparação entre os compósitos sem fibra produzidos a partir da matriz M1 e a partir da matriz M2 quando submetidos ao ensaio de flexão em três pontos

ANOVAOneWay (07/12/2017 01:53:53)

Notes

Input Data

Descriptive Statistics

	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
A	7	9,98714	1,22523	0,46309
B	7	9,34714	2,27751	0,86082

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	1,4336	1,4336	0,42869	0,52498
Error	12	40,12949	3,34412		
Total	13	41,56309			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
 At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

Fit Statistics

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,03449	0,18917	1,82869	9,66714

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
M2 M1	-0,64	0,97748	0,92595	0,52498	0,05	0	-2,76974	1,48974

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
 Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE E – Resultados da análise estatística da comparação entre os compósitos sem fibra produzidos a partir da matriz M1 e a partir da matriz M2 quando submetidos ao ensaio de tração direta

ANOVAOneWay (07/12/2017 01:59:48)

Notes

Input Data

Descriptive Statistics

	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
A	4	1,1225	0,3017	0,15085
B	4	1,3	0,31369	0,15684

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0,06301	0,06301	0,6653	0,44586
Error	6	0,56827	0,09471		
Total	7	0,63129			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
 At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

Fit Statistics

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,09982	0,25408	0,30775	1,21125

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
M2 M1	0,1775	0,21761	1,15352	0,44586	0,05	0	-0,35498	0,70998

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
 Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Fonte: Elaboração própria