

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE  
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM TECIDO TÊXTIL DE FIBRAS DE  
ALGODÃO

DANIELA OLIVEIRA DE LIMA

MANAUS

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DANIELA OLIVEIRA DE LIMA

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE  
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM TECIDO TÊXTIL DE FIBRAS DE  
ALGODÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte do requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais e Componentes de Construção.

Orientador: Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho

MANAUS  
2019

## Ficha Catalográfica

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

L732d Lima, Daniela Oliveira de  
Desenvolvimento e caracterização física e mecânica de  
compósitos cimentícios reforçados com tecido têxtil de fibras de  
algodão / Daniela Oliveira de Lima. 2019  
107 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: João de Almeida Melo Filho  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade  
Federal do Amazonas.

1. Compósitos. 2. Metacaulinita. 3. Matriz Cimentícia. 4. Tecido  
Têxtil. 5. Fibra de Algodão. I. Melo Filho, João de Almeida II.  
Universidade Federal do Amazonas III. Título



**ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº. 009/2019**

ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO AO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

DATA DO EXAME: 18/072019

DISCENTE: Daniela Oliveira de Lima

ORIENTADOR: Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho

**BANCA EXAMINADORA: (Nome Completo)**

Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho (Presidente)

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos (Membro Interno)

Prof. Dr. Rannier Marques Mendonça (Membro Externo)

**TÍTULO DA PROPOSTA DE DISSERTAÇÃO: DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM TECIDO TÊXTIL DE FIBRAS DE ALGODÃO**

**LOCAL: Sala Multiuso I da Faculdade de Tecnologia**

**HORA DE INÍCIO: 09h00**

De acordo com o Regimento Interno do **Programa Pós – Graduação em Engenharia Civil**, aprovados pelo Conselho de Ensino e Pesquisa/CONSEP/UFAM e CAPES, o (a) aluno (a) submeteu sua dissertação em forma escrita e oral, sendo após exposição de cerca de 50 minutos arguido oralmente pelos membros da banca, tendo tido como resultado:

Aprovação por unanimidade de sua dissertação. O (A) aluno (a) foi considerado aprovado, podendo pleitear o título de Mestre.

Reprovação de sua Dissertação. O (A) aluno (a) não foi considerado aprovado (a) na sua Defesa de Dissertação. Não podendo pleitear o título de Mestre.

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que será assinada pelos membros da banca e pelo (a) aluno (a).

Observações \_\_\_\_\_

Manaus, 18 de julho de 2019

Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho (Presidente)

*João de Almeida M. Filho*

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos (Membro Interno)

*Raimundo Pereira de Vasconcelos*

Prof. Dr. Rannier Marques Mendonça (Membro Externo)

*Rannier Marques Mendonça*

Daniela Oliveira de Lima (Discente)

*Daniela Oliveira de Lima*

*Dedico aos meus pais, por todo apoio, carinho, compreensão e incentivo. Amo vocês.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois este é minha base, pela força a mim foi concedida para lutar pelos meus objetivos sempre com fé, garra e honestidade, pois só o senhor sabe de todos os obstáculos encontrados para vencer esta jornada.

A toda minha família por sempre acreditar na minha capacidade, por ter dado todo apoio necessário para finalizar mais essa jornada.

Ao meu noivo, Klinsman Maia, por desde o princípio me apoiar e me incentivar, principalmente pela paciência, compreendendo a minha ausência para me dedicar a esta pesquisa.

Ao Dr. João de Almeida Melo Filho, orientador deste trabalho, pelo carinho, paciência, amizade, disponibilidade e empenho em todo o auxílio que necessitei para elaboração deste trabalho.

Aos professores Raimundo Vasconcelos e Lizandro Manzato, pela participação na banca de qualificação, na qual deram generosas contribuições para este trabalho.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pelos ensinamentos e por estarem sempre prontos para ajudar.

Aos colegas e amigos que fiz durante todo este período de UFAM, pelo carinho e ajuda, que serão sempre lembrados, Luane Ricarte, Michell Barros, Ewerton Mazoni, Maria Clara. Em especial a engenheira Ana Paula que se tornou uma grande amiga e parceira de laboratório, sempre com uma palavra de motivação e disposta a ajudar, muito obrigada pela parceria, pois só nós sabemos das dificuldades que enfrentamos (rsrsrs). A Armirys, por sempre ter uma palavra de carinho e por estar sempre disposta a ajudar. E aos Sr. Alcides pelos ensinamentos transmitidos.

Aos técnicos dos Laboratórios da UFAM, em especial ao Sr. Zeca do Laboratório de Pavimentação, que sempre esteve disposto a auxiliar nos ensaios com paciência e dedicação. Ao técnico Diogo do Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LAMAC), que me ajudou com tantos ensaios de TG, FRX, sempre com rapidez e generosidade. Aos técnicos do Laboratório de Materiais (LEM), Sr. Jorge e Nilson pelo carinho e ajuda com os ensaios e

pelo auxílio para utilizar os equipamentos. Ao Alfredo, do Laboratório de ensaios de minerais, por tantos MEV realizados, sempre com muito carinho e dedicação em ajudar. Aos técnicos do Laboratório de Laminação, Sr. Jorge e Glauco que me auxiliaram na calcinação do caulim.

Agradeço aos técnicos do Instituto Federal do Amazonas – IFAM que colaboraram para realização dos ensaios, em especial ao Mitsou e o Wanison do Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais (LSCN) pelos DRX e pelos ensinamentos transmitidos para analisar os difratogramas. Ao técnico André Huck do Laboratório de mecânica, pela atenção e disponibilidade em romper minhas amostras à compressão. Em nome destes, agradeço a todos os outros técnicos que me ajudaram direta e indiretamente.

Ao auxílio financeiro concedido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM.

A todos estes e aqueles não mencionados, que me apoiaram em diversos momentos, minha eterna gratidão!

## RESUMO

No presente estudo realizou-se o desenvolvimento e a caracterização de compósitos cimentícios reforçados com tecido têxtil de algodão. Os compósitos foram produzidos a partir de matriz cimentícia, constituída por cimento CP II E-32, metacaulinita, areia, água e superplastificante, traço 1:1:0,4. A matriz cimentícia foi dosada com substituição parcial de cimento *Portland* por 50% de metacaulinita com a finalidade de reduzir a quantidade de hidróxido de cálcio. O tecido foi caracterizado através de ensaios de absorção de água, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os laminados cimentícios produzidos foram reforçados com tecido de algodão com frações volumétricas de 2, 3, 4 e 6%, sendo avaliados aos 28 dias por meio de ensaios físicos e mecânicos. Para a maioria das condições experimentais os compósitos apresentaram comportamento “*strain hardening*”, com formação de múltiplas fissuras, havendo incremento na resistência, deformação e tenacidade, à medida que foi aumentado o teor de fibra. O Compósito com teor de 6% de fibra resistiu a tensão máxima de ruptura de 7,26 MPa, apresentando em média 23 fissuras no terço médio da amostra, e cerca de 5,86 MPa com média de 57 de fissuras, submetidos a cargas de flexão e tração, respectivamente. Analisando os resultados, conclui-se que a fibra utilizada apresenta um potencial uso como reforço de laminados cimentícios, formando compósitos com boas propriedades físico-mecânicas.

**Palavras-chave:** Compósitos; Metacaulinita; Matriz Cimentícia; Tecido Têxtil; Fibra de algodão.

## ABSTRACT

In the present study the development and characterization of cementitious composites reinforced with cotton textile fabric was carried out. The composites were produced from cementitious matrix, constituted by cement CP II E-32, metakaolin, sand, water and superplasticizer, trace 1: 1: 0.4. The cementitious matrix was made with partial Portland cement by 50% of metakaolin with the proposition to reduce the quantity of calcium hydroxide. The textile fabric was characterized by water absorption, X-ray diffraction (XRD), thermogravimetry (TG) and scanning electron microscopy (SEM) tests. The cementitious laminates produced were reinforced with cotton fabric with volumetric fractions of 2, 3, 4 and 6%, they were evaluated at 28 days by means of physical and mechanical tests. For most of the experimental conditions, the composites presented a “*strain hardening*” behavior, with formation of multiple cracking, with increase in the strength, deformation and tenacity, as the fiber content increased. The composite with a 6% fiber content presented the maximum tensile stress of 7.26 MPa, with on average 23 cracks in the middle third of the sample, and about 5.86 MPa with average of 57 cracks, subjected to flexural and tensile loads, respectively. Analyzing the results, it was concluded that the fiber used presents a potential use as reinforcement of cementitious laminates, forming composites with good physico-mechanical properties.

**Keywords:** Composites; Metakaolin; Cementitious matrix; Textile Fabric; Fiber cotton.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Estrutura da fibra de algodão	25
Figura 2	Fibra imatura (a); maturação média (b) e fibra madura (c)	26
Figura 3	Fibra madura (a) e imatura (b) em seção transversal	27
Figura 4	Tecido tramado	27
Figura 5	Alguns tipos de tecelagem mais comuns em compósitos	28
Figura 6	Comportamento de compósitos fibrosos: frágil (a), <i>strain softening</i> (b) e <i>strain hardening</i> (c)	30
Figura 7	Representação esquemática da resposta típica de um CRT sob tração	31
Figura 8	Compósitos têxteis reforçados com 6 e 10% de tecido de juta	32
Figura 9	Compósitos com teor de 6% de fibra de sisal: a flexão (a) e a tração (b)	32
Figura 10	Compósitos reforçados com malhas de cânhamo, linho, sisal e algodão	33
Figura 11	Representação esquemática do desenvolvimento do trabalho	38
Figura 12	Cimento composto com escória de alto forno	39
Figura 13	Localização da coleta do caulim	40
Figura 14	Areia de rio utilizada na pesquisa	40
Figura 15	Embalagem do superplastificante	41
Figura 16	Tecido têxtil de algodão (a), dimensão das aberturas do tecido (b)	41
Figura 17	Lavagem do caulim (a); decantação do caulim (b); caulim após secagem em estufa (c)	42
Figura 18	Processo de calcinação: material no forno mufla (a); caulim no cadinho de porcelana (b)	43
Figura 19	Separador mecânico	44
Figura 20	Densidade através do frasco Le Chatelier: metacaulinita (a) e cimento (b)	45
Figura 21	Equipamento para ensaio de granulometria	46
Figura 22	Equipamento de fluorescência de raios-X	47
Figura 23	Equipamento Bruker D2 Phaser	47
Figura 24	Mistura manual dos materiais (a); mistura dos materiais secos (b); adição da metade do superplastificante diluído (c); incorporação da segunda metade do aditivo (d); homogeneização da argamassa (e)	48
Figura 25	Colocação da argamassa no molde (a); argamassa no tronco-cônico (b); retirada do molde (c)	50
Figura 26	Equipamento de termogravimetria	51
Figura 27	Moldagem dos corpos de prova para compressão	52

Figura 28	Corpo de prova à compressão	52
Figura 29	Pesagem inicial da amostra (a); Imersão da amostra em água destilada (b)	53
Figura 30	Equipamento para MEV (a); amostras no <i>stub</i> (b)	55
Figura 31	Esquema de moldagem dos compósitos: com 2, 3 e 4% de fibra (a) e com 6% de fibra (b)	56
Figura 32	Primeira camada de argamassa (a); colocação do reforço (b); placa após desmoldagem (c)	57
Figura 33	Amostras após pintura com tinta branca	57
Figura 34	Esquema do ensaio de flexão (a) e amostra sendo submetida à flexão (b)	58
Figura 35	Esquema da amostra submetida à tração	59
Figura 36	Massa inicial da amostra (a); Pesagem da amostra imersa (b)	60
Figura 37	Curva granulométrica da areia, do cimento e da metacaulinita	61
Figura 38	Difratograma do cimento CP II E-32	63
Figura 39	Difratograma do caulim e da metacaulinita	63
Figura 40	Medida do diâmetro do espalhamento	64
Figura 41	Gráfico do ponto de saturação do superplastificante para matriz M1	64
Figura 42	Curva de TG e DTG das matrizes M0 e M1 aos 28 dias	65
Figura 43	Valores médios de resistência à compressão	67
Figura 44	Modo de fratura dos corpos de prova submetidos à compressão	68
Figura 45	Absorção de água do tecido de algodão	68
Figura 46	Difratograma do tecido de algodão	69
Figura 47	Curva de TG e DTG da fibra de algodão	70
Figura 48	Micrografia do fio de algodão (a); seção transversal da fibra (b)	71
Figura 49	Micrografia da seção longitudinal do fio de algodão (a); ampliação da seção longitudinal do fio (b)	72
Figura 50	Curva tensão equivalente x deflexão central das matrizes M0 e M1	73
Figura 51	Curva tensão x deflexão dos compósitos têxteis a partir da matriz M0	73
Figura 52	Curva tensão x deflexão dos compósitos têxteis produzidos a partir de M1	74
Figura 53	Tenacidades à flexão para os compósitos	77
Figura 54	Modo de ruptura dos compósitos M0	78
Figura 55	Modo de fratura dos compósitos M1	79
Figura 56	Curva tensão de tração direta x deslocamento das matrizes M0 e M1	80
Figura 57	Curva tensão de tração direta x deslocamento dos compósitos	81
Figura 58	Modo de fratura dos espécimes submetidos à tração direta	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição química principal do cimento <i>Portland</i>	18
Tabela 2	Propriedades de fibras vegetais usadas na indústria têxtil	24
Tabela 3	Ensaio realizados para caracterização do agregado miúdo natural	44
Tabela 4	Quantidade de materiais utilizados para ensaios na argamassa	49
Tabela 5	Traço e nomenclatura dos compósitos	56
Tabela 6	Diâmetros referentes a 10%, 50%, 90% do material passante e diâmetro médio	61
Tabela 7	Características físicas da areia	62
Tabela 8	Fluorescência de raios-X do cimento, caulim e metacaulinita	62
Tabela 9	Faixa de temperatura em uma matriz de cimento	65
Tabela 10	Teor de água quimicamente combinada, CH e CC	66
Tabela 11	Índice de cristalinidade pelo método de Segal	70
Tabela 12	Valores médios das propriedades mecânicas à flexão	75
Tabela 13	Resultados da tenacidade à flexão de quatro pontos	77
Tabela 14	Número e espaçamento médio das fissuras	79
Tabela 15	Valores médios das propriedades mecânicas à tração direta	82
Tabela 16	Resultados da tenacidade à tração direta	82
Tabela 17	Número e espaçamento médio das fissuras à tração	84
Tabela 18	Valores médios da absorção e densidade dos compósitos cimentícios	84

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 Motivação.....	16
1.2 Objetivos .....	17
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
2.1 Matriz Cimentícia .....	18
2.1.1 Adições pozolânicas .....	19
2.1.2 Metacaulinita .....	20
2.2 Fibras Vegetais Têxteis .....	22
2.2.1 Fibra de algodão .....	24
2.2.2 Tecidos .....	27
2.3 Compósitos Cimentícios Reforçados com Tecidos Vegetais .....	28
2.3.1 Comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras.....	29
2.4 Durabilidade de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais .....	33
2.4.1 Tratamentos em matrizes cimentícias.....	35
2.4.2 Tratamentos em fibras .....	36
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>38</b>
3.1 Materiais.....	39
3.1.1 Cimento .....	39
3.1.2 Caulim .....	39
3.1.3 Agregado miúdo .....	40
3.1.4 Água .....	40
3.1.5 Superplastificante .....	41
3.1.6 Tecido de fibras de algodão.....	41
3.2 Métodos.....	42
3.2.1 Processo de produção da metacaulinita.....	42
3.2.2 Caracterização dos componentes da matriz cimentícia .....	44
3.2.2.1 Areia .....	44
3.2.2.2 Cimento, caulim e metacaulinita.....	45
3.2.2.2.1 Densidade .....	45
3.2.2.2.2 Granulometria a laser .....	46
3.2.2.2.3 Espectrometria fluorescência de raios-X por energia dispersiva.....	46
3.2.2.2.4 Difração de raios-X.....	47
3.2.3 Produção e caracterização da matriz .....	48
3.2.3.1 Dosagem da matriz .....	48

3.2.3.2	<i>Determinação do teor do aditivo superplastificante</i> .....	49
3.2.3.3	<i>Análise termogravimétrica da matriz cimentícia</i> .....	50
3.2.3.4	<i>Moldagem de corpos de prova e ensaio de compressão</i> .....	51
3.2.4	Caracterização do tecido têxtil de algodão .....	53
3.2.4.1	<i>Absorção de água do tecido têxtil</i> .....	53
3.2.4.2	<i>Índice de cristalinidade</i> .....	54
3.2.4.3	<i>Análise termogravimétrica</i> .....	54
3.2.4.4	<i>Microscopia eletrônica de varredura</i> .....	55
3.2.5	Produção e caracterização dos compósitos têxteis .....	55
3.2.5.1	<i>Ensaio mecânicos</i> .....	57
3.2.5.1.1	<i>Flexão em quatro pontos</i> .....	57
3.2.5.1.2	<i>Tração direta</i> .....	59
3.2.5.2	<i>Ensaio físicos nos compósitos têxteis</i> .....	59
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>61</b>
4.1	Caracterização dos Materiais da Matriz Cimentícia .....	61
4.2	Caracterização da Matriz Cimentícia.....	64
4.2.1	Matriz em estado fresco.....	64
4.2.2	Matriz em estado endurecido.....	65
4.2.2.1	<i>Análise Térmica da Pasta</i> .....	65
4.2.2.2	<i>Compressão axial</i> .....	67
4.3	Caracterização do Tecido Têxtil de Algodão.....	68
4.3.1	Absorção de água.....	68
4.3.2	Índice de cristalinidade .....	69
4.3.3	Análise termogravimétrica .....	70
4.3.4	Análise morfológica .....	71
4.4	Caracterização dos Compósitos Têxteis .....	72
4.4.1	Flexão em quatro pontos .....	72
4.4.2	Tração direta .....	80
4.4.3	Ensaio de Absorção de Água e Densidade Aparente .....	84
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>86</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES FUTURAS</b> .....	<b>89</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>90</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, houve um aumento no interesse pelo uso de fibras naturais como uma alternativa de reforço para materiais compósitos. O desenvolvimento de materiais sustentáveis, corretos e comercialmente viáveis, baseados em recursos naturais, está em ascensão. Nesse sentido, as fibras naturais como reforço de compósito cimentício pode ser uma opção atrativa para a construção civil.

Segundo os autores Maden & Ramstedt (2013), as fibras naturais vegetais são uma alternativa promissora para o desenvolvimento de compósitos fibrosos, destinados a produtos da construção civil, por serem materiais sustentáveis e por incrementarem as propriedades mecânicas do compósito. Essas fibras estão sendo consideradas um material de substituição ambientalmente correto para fibras sintéticas, por serem de fontes renováveis, de baixo custo, de boas propriedades mecânicas, térmicas e acústicas (MELO FILHO, 2012; SEPE *et al.*, 2018). Além disso, só necessitam de 20 a 40% da energia de produção, e são menos abrasivas que as fibras sintéticas (DITTENBER & GANGARAO, 2012).

A grande vantagem da fibra como reforço, é melhorar as propriedades mecânicas (por exemplo, propriedades de tração, flexão e impacto) de um material de comportamento frágil, e principalmente melhorar a ductilidade e a tenacidade pós-fissuração do compósito cimentício (YAN & CHOUW, 2013; SLISERIS *et al.*, 2016). No entanto, o incremento nas propriedades estruturais e mecânicas dos compósitos fibrosos é geralmente influenciado pelas características das fibras naturais, tais como, local de origem, condições climáticas, idade das plantas e dos métodos de extração utilizados (KABIR *et al.*, 2012).

As fibras podem ser dispostas de quatro formas diferentes dentro da matriz, que são elas: fibras longas alinhadas, fibras curtas distribuídas aleatoriamente, fibras em forma de polpa e fibras na forma de tecidos bidirecionais (FIDELIS, 2014).

As fibras naturais usadas na forma tecido possuem muitos benefícios, como facilidade no manuseio e também o fornecimento de distribuição homogênea para a matriz e fibra de reforço. O tecido tem sido utilizado em diversas aplicações, que incluem peças aeroespaciais, automotivas e reforços estruturais devido à sua alta resistência e rigidez (FAZITA *et al.*, 2016).

Atualmente, sua utilização tem sido estudada com a finalidade de substituir o reforço convencional (aço). Os compósitos reforçados com fibras na forma de tecido apresentam usualmente comportamento *strain hardening* com múltipla fissuração, alcançando valores de

tenacidade, resistência à tração e capacidade de deformação superior aos compósitos reforçados com fibras longas alinhadas ou aleatoriamente distribuídas (FIDELIS *et al.*, 2017).

Por possuírem excelentes propriedades mecânicas, os compósitos reforçados com tecido possuem grande potencial na produção de laminados, como por exemplo, elementos de fachadas e divisórias, no fortalecimento e reparo em membros estruturais e na concepção de estruturas leves e mobiliário (RAMBO *et al.*, 2016). Pesquisadores como Melo Filho (2012); Fidelis (2014); Oliveira (2017) apresentaram bons resultados em ensaios físicos e mecânicos realizados em compósitos reforçados com fibras vegetais, para produção de elementos de pouca espessura, que podem ser utilizados para revestimentos externos, divisórias e telhas.

No entanto, apesar do potencial uso das fibras naturais vegetais existem alguns fatores críticos quanto à sua durabilidade na matriz cimentícia, ocasionados principalmente, pelos produtos de hidratação do cimento, principalmente o hidróxido de cálcio, que migram para paredes, lumens e vazios das fibras, resultando na sua mineralização e o caráter higroscópico das fibras, relacionado à capacidade das fibras absorverem a água presente na matriz provocando inchaço e efeito de plasticidade, o que resulta em instabilidade dimensional e baixas propriedades mecânicas (SAWSEN *et al.*, 2014; FIDELIS, 2014; SAWSEN *et al.*, 2015). Autores como, Ferreira *et al.* (2015), Sawsen *et al.* (2015), Wei & Meyer (2017) sugerem modificações nas matrizes e/ou tratamentos nas fibras, para mitigar este problema.

Neste contexto, a presente pesquisa desenvolveu e caracterizou compósitos cimentícios reforçados com tecido de algodão. Realizando substituição do cimento *Portland* por metacaulinita, produzida em laboratório, a partir de argila natural do caulim da região amazônica. Com a finalidade, de diminuir o teor de hidróxido de cálcio presente nas matrizes à base de cimento, e assim evitar a mineralização das fibras.

## 1.1 Motivação

Compósitos reforçados com fibras de algodão são usados atualmente nas partes internas de automóveis, painéis de isolamento termoacústico, placas de fibra e várias partes de conjuntos mecânicos de alta fricção (CHAND & FAHIM, 2008; CHAUDHARY & GOHIL, 2016). O desenvolvimento e a caracterização destes compósitos têm sido explorados por diversos pesquisadores, principalmente em matrizes poliméricas e geopoliméricas, utilizando na forma de fibras curtas, unidirecionais, bidirecionais (tecidos ou malhas) e resíduos da indústria têxtil.

Finkler *et al.* (2005); Borsoi *et al.* (2011); Zonatti *et al.* (2015); Portella *et al.* (2016), são exemplos de pesquisadores que utilizaram resíduos têxteis de algodão como reforço de compósitos poliméricos. Branco *et al.* (2016) produziram compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas e alinhadas de algodão. Chaudhary & Gohil (2016) confeccionaram compósitos poliméricos reforçados com tecido bidirecional de algodão. Alomayri *et al.* (2013) empregaram fibras curtas de algodão para reforçar matriz geopoliméricas. Alomayri *et al.* (2014) reforçaram compósitos geopoliméricos com tecido de algodão curado. No entanto, quando trata-se de compósitos cimentícios reforçados com fibras de algodão, os estudos são quase escassos. Porém, Mercedes *et al.* (2018) produziram malhas de algodão, com o objetivo de empregar como reforço de matriz cimentícia.

Neste contexto, a motivação desta pesquisa, está relacionada à consideração futura de matrizes cimentícias reforçadas com fibras de algodão. Uma vez que, os estudos sobre estes compósitos ainda não possuem tanta ênfase, em comparação com outras fibras naturais, como por exemplo, juta, sisal, coco e bambu.

Além disso, a utilização da fibra de algodão como reforço torna-se atrativa pela sua disponibilidade, uma vez que, é a principal fibra têxtil de produção, com comercialização e uso em larga escala mundial. Pois sabe-se das dificuldades de localizar, extrair e beneficiar determinadas fibras naturais, impossibilitando a reprodução em larga escala de novos materiais, principalmente no setor da construção civil.

Além da utilização da fibra de algodão, esta pesquisa produziu metacaulinita a partir de caulins da região amazônica, o que proporcionará um produto comercial para essa região. Assim como, contribuirá para diminuição de CO<sub>2</sub> na atmosfera, visto que o cimento *Portland* será substituído em uma fração de 50% pela pozolana. E proporcionará melhor durabilidade para o compósito fibroso.

Portanto, esta pesquisa tem como objetivo desenvolver e caracterizar compósitos cimentícios reforçados com tecido de fibras de algodão, utilizando substituição parcial de cimento *Portland* por metacaulinita, a fim de obter uma matriz livre de hidróxido de cálcio [Ca (OH)<sub>2</sub>], colaborando com futuras pesquisas e melhorias nos compósitos feitos com o tecido de fibras de algodão.

## **1.2 Objetivos**

### **Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e caracterizar física e mecanicamente laminados cimentícios reforçados com tecido têxtil de fibras de algodão.

### **Objetivos Específicos**

- Produzir e caracterizar uma metacaulinita com alta amorficidade para utilizá-la como substituição do cimento *Portland*;
- Produzir e caracterizar físico e mecanicamente uma matriz cimentícia livre de hidróxido de cálcio;
- Caracterizar a fibra de algodão quanto à composição química, física e morfológica;
- Desenvolver e caracterizar compósitos cimentícios reforçados com teores de 2, 3, 4 e 6% de fibras de algodão.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Matriz Cimentícia

O cimento é o segundo componente mais consumido no mundo, atrás somente da água (CARVALHO *et al.*, 2019). Atualmente, sua produção anual é cerca de 2,8 bilhões de toneladas e espera-se considerável aumento nos próximos anos (MATOS & COUTINHO, 2012).

O cimento *Portland* é produzido pela moagem do clínquer, composto por silicatos e aluminatos de cálcio (WANG *et al.*, 2001). De acordo com a ASTM C 150-07 (1991), o cimento é obtido por meio da calcinação e clínquerização de uma mistura de calcário e argila em proporções adequadas. O clínquer é composto por quatro fases principais, o silicato tricálcico ou alita ( $C_3S$ ), o silicato dicálcico ou belita ( $C_2S$ ), a fase aluminato ( $C_3A$ ) e a fase ferrita ( $C_4AF$ ). Segundo a ABNT NBR 14656 (2001) os principais componentes químicos do cimento *Portland* são o óxido de cálcio, dióxido de sílica, óxido de alumínio e óxido de ferro, como apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química principal do cimento *Portland*.

Nome do Composto	Abreviação	Teor médio de %
Óxido de cálcio	CaO	60-67
Dióxido de sílica	SiO <sub>2</sub>	17-25
Óxido de alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3-8
Óxido de ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5-6

Fonte: NBR 14656, 2001.

A matriz cimentícia é resultado da junção de aglomerantes e água, podendo conter agregados, superplastificantes e aditivos, que dão origem a pastas, argamassas e concretos (SILVA *et al.*, 2012; TIAN *et al.*, 2017). Diversos motivos fizeram este material se consagrar, entre eles por apresentar baixo custo, alta durabilidade, grande facilidade de fabricação, possibilidade de moldagem em estado fresco, adaptando-se a diversas formas e concepções arquitetônicas. No entanto, o mesmo pode ser considerado um material frágil, com baixa resistência das cargas de tração, flexão e baixa capacidade de deformação (CARVALHO *et al.*, 2019).

O endurecimento é desencadeado por uma série de reações químicas entre o cimento e a água, que promove a formação de microestrutura de cristais complexos, apresentando

como resultante suas propriedades, como boa resistência à compressão e baixo módulo de elasticidade (OLIVEIRA, 2017). O processo de hidratação do cimento é complexo, e apresenta-se simplificado em 5 etapas:

**Etapa 1** – nos primeiros minutos ocorre essencialmente a reação da água com: (I) o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e o gesso ( $C\bar{S}$ ) formando-se cristais curtos de tri-sulfoaluminato de cálcio hidratado, ou etringita (AFt); e (II) o silicato tricálcico ( $C_3S$ ), formando-se um gel amorfo de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que se deposita na superfície da partícula, e hidróxido de cálcio (CH), que precipita nos espaço entre as partículas de cimento com um hábito hexagonal (DIAMOND, 2004);

**Etapa 2** – prossegue a reação da água com os silicatos de cálcio (alita e belita), formando-se uma camada adicional de C-S-H em torno da partícula a uma distância de cerca 1  $\mu$ m, que se designa correntemente por “C-S-H exterior” (HADLEY *et al.*, 2000; KJELLESEN & JUSTNES, 2004);

**Etapa 3** – Ocorre uma reação de hidratação secundária dos aluminatos de cálcio ( $C_3A$  e  $C_4AF$ ) formando-se compostos aciculares longos de tri-sulfoaluminato de cálcio hidratado (AFt). O C-S-H que se começa a formar nesta etapa designa-se por “interior” uma vez que, devido à mobilidade progressivamente mais reduzida dos produtos das reações, se deposita dentro da camada de hidratação formada nas etapas anteriores (COSTA *et al.*, 2009);

**Etapa 4** – A hidratação prossegue a uma velocidade lenta, correspondente a reações em estado sólido. Quando o gesso é totalmente consumido na reação química, a etringita (AFt) reage com o aluminado de cálcio ( $C_3A$ ), e aparece uma nova fase de aluminato, conhecido como monossulfato (AFm) (HEWLLET & LISKA, 2019);

**Etapa 5** – As reações de hidratação continuam ao longo de anos, continuando essencialmente formando “C-S-H interior” adicional (COSTA *et al.*, 2009).

### 2.1.1 Adições pozolânicas

As adições pozolânicas podem ser definidas como todo material inorgânico, natural ou artificial, silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade pozolânica, mas que, quando utilizadas em conjunto com ligantes hidráulicos, juntamente com água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes (ASTM C618, 2008; ABNT 12653, 2015).

Os materiais pozolânicos naturais são originários de rochas magmáticas ou sedimentares, que necessitam de um tratamento de moagem. As artificiais, são subprodutos oriundos da indústria, em geral, necessitam de tratamentos térmicos, e por vezes moagem (PONTES *et al.*, 2012), como cinzas de fornos e caldeiras, cinzas volantes, argila calcinada (MASSAZZA, 2008; DONATELLO *et al.*, 2010). As adições minerais mais comumente usadas, que proporcionam reações pozolânicas são a metacaulinita, os resíduos cerâmicos, a sílica ativa, cinza volante, casca de arroz e do bagaço de cana-de-açúcar (SOKOLOVICZ *et al.*, 2009).

As principais fases ativas das pozolanas são a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Essas fases devem apresentar elevado grau de amorficidade para garantir a atividade pozolânica (REGO *et al.*, 2006; JOHN *et al.*, 2003). Segundo a NBR 12653 (2015) as pozolanas naturais e artificiais, devem ter a soma dos componentes  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  de no mínimo 70%.

Segundo Antoni *et al.* (2012) os materiais cimentícios suplementares são utilizados para reduzir a quantidade de clínquer nos cimentos. Além disso, podem influenciar positivamente no grau de hidratação do cimento e reduzir o hidróxido de cálcio, que compromete a integridade da fibra em matrizes cimentícias (WEI & MEYER, 2016). Deste modo, viabilizar a utilização das fibras vegetais em compósitos cimentícios.

Outro fator de relevância, que instiga diferentes autores a pesquisar sobre materiais cimentícios suplementares, é o fator impacto, pois, além do cimento ser um material não renovável ele gera impactos ao meio ambiente. Kua & Kamath (2014) ressaltam que a produção do cimento *Portland* é responsável por 7% das emissões de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) em todo mundo. As pozolanas quando utilizadas em substituição do cimento *Portland*, contribuem para a diminuição a emissão de  $\text{CO}_2$  colaborando, portanto, com o aquecimento global, além de exigir menos energia de produção (MEDINA, 2011).

### **2.1.2 Metacaulinita**

O caulim é um minério composto por silicatos hidratados de alumínio, principalmente caulinita e haloisita. Contém outras substâncias sob forma de impurezas como areia, quartzo, palhetas de mica, grãos de feldspato, óxidos de ferro e titânio, entre outros (MÁRTIRES, 2009). A caulinita, principal componente do caulim, é um argilomineral formado pela decomposição de feldspato e empilhamento regular de lamelas do tipo 1:1,

apresentando uma cor branca ou quase branca, devido ao baixo teor de ferro (Bertolino *et al.* 2012).

Segundo Cunha *et al.* (2010) a metacaulinita é obtida através da calcinação do caulim, por meio de um processo industrial de ativação térmica entre 600 °C e 850 °C. Existe a preocupação de alguns autores quanto à temperatura máxima de calcinação do caulim, pelo fato que em temperaturas superiores a 900 °C a metacaulinita tende a cristalizar novamente formando espinélio Al/Si, que após 1100 °C forma a mulita ( $Al_6Si_2O_{13}$ ) e a cristobalita ( $SiO_2$ ), fazendo com que o material possua pouca ou praticamente nenhuma atividade pozolânica (GRIM, 1962; ANDRIOLO, 1984; SCANDIUZZI & ANDRIOLO, 1986; SANTOS, 1992).

A adição de metacaulinita, em substituição parcial ao cimento *Portland*, traz muitos benefícios às matrizes de argamassa, pois produzem mais produtos hidratados devido à reação pozolânica (CABRERA & LYNDALE, 1996), oferecendo maior incremento na resistência à compressão, reduz o pH e, conseqüentemente, a concentração de íon hidroxila (OH<sup>-</sup>) na água de poro, além de reduzir a permeabilidade de pastas e concretos (COLEMAN & PAGE, 1997; FRIAS & CABRERA, 2000; WONG & RAZAK, 2005).

A utilização da metacaulinita possibilita aos compósitos (concreto, argamassa e pasta), melhoria das propriedades relacionadas à durabilidade e ao desempenho mecânico. Além disso, proporciona diminuição do teor de hidróxido de cálcio, que migra para as paredes da fibra, ocasionando sua mineralização, resultando no comprometimento da durabilidade de compósitos cimentícios.

A eficiência da substituição parcial do cimento *Portland* por metacaulinita foi comprovada por diversos autores, como Melo Filho (2012), que substituiu 50% de cimento por metacaulinita, obtendo uma matriz isenta de hidróxido de cálcio. Além disso, a utilização da pozolana proporcionou acréscimo na resistência dos compósitos, diminuiu a porosidade e a absorção de água, e ainda preservou as propriedades mecânicas das fibras vegetais, comprovado através de ciclos de molhagem e secagem.

Cavalcante *et al.* (2018) estudou através da análise térmica a diminuição do teor de hidróxido em pastas cimentícias substituindo parcialmente o cimento em 20, 30, 40 e 50% por metacaulinita. Os resultados comprovaram que os teores de 40 e 50% de pozolana foram suficientes para obter uma matriz isenta de hidróxido de cálcio.

## 2.2 Fibras Vegetais Têxteis

Existe uma grande diversidade de fibras utilizadas na indústria têxtil, as quais são classificadas em naturais, artificiais e sintéticas. As fibras naturais são obtidas na natureza, sendo beneficiadas de uma forma que se tornem aptas para a utilização têxtil, podendo ser de origem vegetal, animal ou mineral. As artificiais são de origem celulósica, modificadas a partir de processos químicos. E as fibras sintéticas (não naturais) são obtidas por meio de compostos petroquímicos (SANCHES *et al.*, 2014).

A grande variedade de espécies vegetais possibilita a produção de fibras de qualidade e em quantidades para serem comercializadas em muitas atividades e setores como da construção civil, naval, saúde, espacial, entre outras. As fibras podem ser encontradas diariamente de várias formas, tais como filamentos, feixes, cordas, tecidos, compósitos, revestimentos, entre outros (CARDOSO, 2009).

A fibra vegetal mais conhecida na indústria têxtil é o algodão, porém existe uma infinidade de fibras utilizadas como o linho, juta, sisal, cânhamo, coco, entre outros. Por serem abundantes, de baixo impacto ambiental e oferecerem propriedades mecânicas, físicas e térmicas adequadas a algumas aplicações na indústria, às fibras vegetais estão se tornando alternativas atrativas na indústria têxtil, do ponto de vista econômico e sustentável (GUIMARÃES *et al.*, 2010). A seguir serão apresentadas algumas das fibras mais utilizadas comercialmente.

O linho (*Linum usitatissimum*) é uma das fibras mais utilizadas. Foi uma das primeiras fibras a ser extraída, fiada e ser transformada em tecido têxtil, a planta tem sido usada para produção de fibras desde os tempos pré-históricos (YAN *et al.*, 2014). A fibra de linho é obtida do caule da planta. Assim como o algodão, a fibra de linho é um polímero de celulose, possuindo sua estrutura mais cristalina, tornando-a mais forte, mais nítida e rígida de manusear e mais facilmente enrugada. A fibra varia em comprimento de até 90 cm e diâmetro médio de 12 a 16 microns (INTERNATIONAL YEAR OF NATURAL FIBRES, 2009). De acordo com o *Flax Council of Canada* (2019), o Canadá é o líder mundial na produção e exportação do linho do mundo desde 1994. Em 2014/2015, o Canadá produziu 875 mil toneladas de linho, exportando 50% do linho canadense para a China, 23% para a UE e 21% para os EUA. O tecido de linho mantém um forte nicho tradicional entre os têxteis domésticos de alta qualidade, tais como roupa de cama, tecidos de decoração e acessórios de decoração de interiores. (YAN *et al.*, 2014).

O sisal (*agave sisalana*) é originado do México, porém sua comercialização e explosão econômica teve lugar em outros países. No Brasil, a Bahia é responsável por 80% da produção da fibra de sisal do país (ARAÚJO, 2009). A fibra de sisal mede até 1m de comprimento, com diâmetro entre 200 a 400  $\mu\text{m}$ . É uma fibra grossa, dura, inadequada para tecidos. No entanto, é uma fibra forte, durável e elástica, não absorve umidade facilmente, é resistente a deterioração da água salgada e possui uma textura de superfície fina que aceita uma ampla variedade de corantes (INTERNATIONAL YEAR OF NATURAL FIBRES, 2009). Sua produção está voltada para a indústria têxtil, sendo utilizada para fabricação de cordas, fios, tapetes, dentre outros artigos. Por trata-se de um filamento natural de origem vegetal, o sisal foi reconhecido pela *Food and Agriculture Organization* (FAO, 2019) como a “Fibra do Futuro”, devido aos seus mais variados usos, de natureza 100% renovável, orgânica e biodegradável desde a produção, até o momento de descarte do produto acabado, ao contrário do fio sintético, seu concorrente no mercado (SOUZA *et al.*, 2018).

A juta (*Corchorus capsularis L. e Corchorus olitorius L.*) é uma herbácea que chega a uma altura entre 1 a 4 metros e diâmetro médio de 17 a 20  $\mu\text{m}$ , é de clima quente e úmido, cujo centro de origem pode ser a África e a Ásia. Foi introduzida no Brasil por imigrantes japoneses, onde as primeiras tentativas de cultivo ocorreram no Rio de Janeiro e em São Paulo no final do século XIX e início do XX, mas sem êxito comercial. Apenas na Amazônia ela foi aclimatada com sucesso e hoje é uma das principais atividades econômicas das populações ribeirinhas da Região Amazônica (QUIRINO, 2010; FERREIRA *et al.*, 2018). A juta é uma das fibras vegetais mais fortes da natureza e a segunda em termos de quantidade de produção, ficando atrás somente do algodão. Possui altas propriedades isolantes e antiestáticas, recuperação moderada de umidade e baixa condutividade térmica (INTERNATIONAL YEAR OF NATURAL FIBRES, 2009). A juta é uma fibra versátil que pode ser encontrada na forma de fios, cordéis, sacos, tecido para tapetes, entre outros. De acordo FAO (2019), Bangladesh possui vários projetos com a finalidade de criar novos nichos de mercado para a fibra de juta, melhorando e diversificando a sua utilização.

O cânhamo (*Cannabis sativa L.*) cresce facilmente a uma altura de até 4 metros. A fibra de cânhamo é obtida a partir do caule da planta, com diâmetro médio que varia entre 16 a 50  $\mu\text{m}$ . A fibra é bastante forte e resistente, formada por 70% de celulose e cerca de 8-10% de lignina (INTERNATIONAL YEAR OF NATURAL FIBRES, 2009). O cânhamo é uma planta anual nativa da Ásia Central, cultivado há mais de 12 mil anos. Atualmente é cultivado principalmente na UE, na Ásia Central, nas Filipinas e na China (SHAHZAD, 2011). Sendo a China a maior produtora mundial de cânhamo (FAO, 2019). Estima-se que o mercado global

é composto por mais de 25 mil produtos produzidos com o cânhamo, distribuídos em diversas áreas, tais como, agroindustrial, têxtil, fabricação de papel, automotivo, biocompostos, construção, biocombustível, entre outros (SALENTIJJN *et al.*, 2015).

A Tabela 2 apresenta a densidade e a propriedade mecânica das fibras vegetais mais utilizadas na indústria têxtil. Ressalta-se, que os dados podem variar por influência de alguns fatores, como por exemplo, as espécies e as variedades da planta, variáveis agrícolas como a qualidade do solo, o intemperismo, o nível de maturidade das plantas, entre outros.

Tabela 2 – Propriedades de fibras vegetais usadas na indústria têxtil.

<b>Fibra</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>Resistência à Tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>
Algodão	1,50 – 1,60	3,0–10,0	287 – 800	5,5 – 12,6
Juta	1,30 – 1,49	1,0 – 1,80	320 – 800	30,0
Cânhamo	1,40 – 1,50	1,0 – 3,50	270 – 900	23,5 – 90
Linho	1,40 – 1,50	1,20 – 3,30	343 – 2000	27,6 – 103
Sisal	1,33 – 1,50	2,0 – 7,0	363 – 700	9,0 – 38,0
Fibra de coco	1,15 – 1,46	3,0	95 – 230	2,8 – 6,0

Fonte: Adaptado de YAN *et al.*, (2014).

### 2.2.1 Fibra de algodão

O algodão está entre as mais importantes fibras do mundo. O algodão é uma fibra branca de origem vegetal, obtida dos frutos de algumas espécies do gênero *Gossypium*, família *Malvaceae*. Gerada ao redor das sementes do algodoeiro, essa fibra constitui uma das principais fibras têxteis de produção, com comercialização e uso em larga escala mundial (CARMONA *et al.*, 2015).

Anualmente são cultivados cerca de 35 milhões de hectares de algodão distribuídos por 60 países, nos cinco continentes. A indústria desta planta movimenta anualmente cerca de US\$ 12 bilhões e emprega mais de 350 milhões de pessoas em sua produção, que envolve logística, descaroçamento, processamento e embalagem (ABRAPA, 2019).

O Brasil é um dos cinco maiores produtores mundiais de algodão, ao lado da Índia, China, Estados Unidos e Paquistão (MEYER, 2017). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2017), as regiões Centro-oeste e Nordeste são as maiores produtoras de algodão do Brasil. Na safra de 2018/2019, o Brasil apresentou uma área

plantada de aproximadamente 1.570,2 hectares e produção de 2.575 mil toneladas de fibras (ABRAPA, 2019).

A fibra de algodão para ser trabalhada deve ser transformada em fio. Depois da coleta, as fibras são obtidas a partir do beneficiamento do algodão em caroço. A pluma é separada do caroço pelo processo mecânico denominado descaroçamento, utilizando descaroçadores, do tipo rolo e serra. Para obter uma pluma eficiente é necessário considerar fatores, tais como gestão da umidade, limpeza da fibra e dos equipamentos. Após este processo ocorre à fiação das fibras (ALMEIDA *et al.*, 2011). Em relação à sua morfologia, o algodão é uma fibra unicelular, constituída basicamente de celulose, seu comprimento varia de 10 a 65 mm e o diâmetro médio entre 11 a 22 microns (INTERNATIONAL YEAR OF NATURAL FIBRES, 2009).

Em termos de proporção, a fibra é composta de 88-96% de celulose, entre 1% a 2% de proteínas, de 0,7-1,2% de pectinas, ceras variando de 0,4% até 1%, açúcares fisiológicos 0,3% e outros elementos não dosados de 0,5 a 3%. A formação da fibra de algodão consiste em camadas de fibrilas que crescem com inclinação diferente a cada camada. As fibrilas são responsáveis por determinarem as convoluções, que é um dos aspectos morfológicos das fibras de algodão. A composição da fibra varia conforme seu estágio de desenvolvimento e a estrutura que está sendo formada. A primeira estrutura formada é a cutícula, composta por ceras, açúcares, óleos, sais de ácidos orgânicos, entre outros, com função de proteção. Durante o crescimento da fibra, são gerados os componentes da parede primária, pectinas, hemicelulose, lignina e celulose. E na fase de maturação, é produzida a celulose, que é o único composto que preenche a parede secundária da fibra. (MARTINS *et al.*, 2011; FURTADO, 2015; BACHELIER & GOURLLOT, 2018; ECHER *et al.*, 2018). Na Figura 1 é apresentada a estrutura da fibra de algodão.

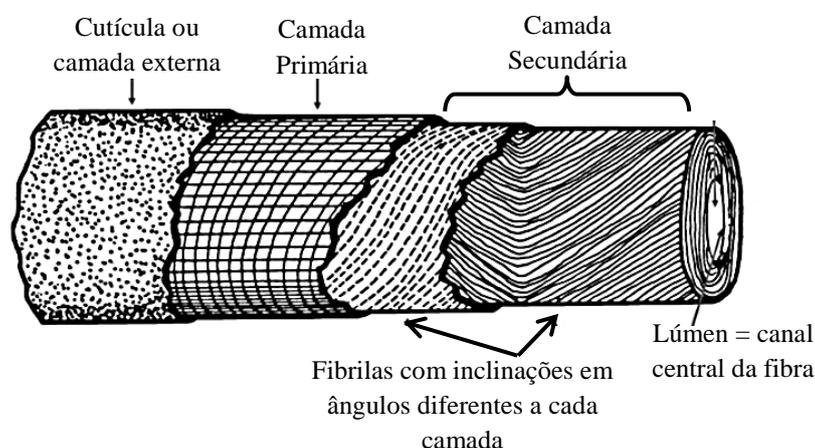


Figura 1: Estrutura da fibra de algodão. Fonte: Adaptado de BACHELIER & GOURLLOT, 2018.

A maturidade da fibra está relacionada à espessura de sua parede. As fibras imaturas são determinadas por apresentarem pouco depósito de celulose (Figura 2 (a)). Nesse caso, acarretando no achatamento do lúmen, tendo um aspecto de fita. Se as fibras forem pouco maduras, ou seja, tiverem seu processo de maturação prejudicado por algum fator, apresentarão um aspecto pouco achatado (Figura 2 (b)). Em uma fibra madura, quando bem desenvolvida, apresenta forma arredondada ou elíptica (Figura 2 (c)), a parede secundária é espessa e o lúmen é reduzido, o que indica o preenchimento bem sucedido das camadas internas, pois apresenta um depósito maior de celulose. (ECHER *et al.*, 2018; BACHELIER & GOURLOT, 2018).

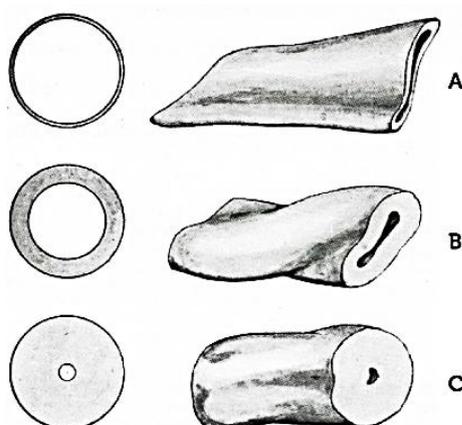


Figura 2: Fibra imatura (a); maturação média (b) e fibra madura (c). Fonte: ECHER *et al.*, 2018.

A maturidade da fibra influencia fortemente a resistência, o seu poder de fiabilidade e a produtividade dos processos. O beneficiamento não tem efeito sobre a maturidade, mas as fibras imaturas não suportam os esforços, as tensões e os atritos que sofrem desde a colheita até a fiação, logo se quebram, diminuindo o índice de uniformidade do comprimento e aumentando o conteúdo das fibras curtas. Maturidade baixa indica baixo número de anéis de celulose, ou seja, estreita parede secundária da fibra, que resulta em redução da capacidade de absorção dos corantes por fibras, fios, linhas e tecidos após o processo de tingimento, causando irregularidade nas cores aplicadas (LIMA, 2014; ECHER *et al.*, 2018). Na Figura 3 (a) nota-se a seção transversal de fibras de algodão maduras, em forma elíptica e cilíndrica com lúmen reduzido. As fibras imaturas (Figura 3 (b)), são finas e achatadas, características do pouco depósito de celulose.

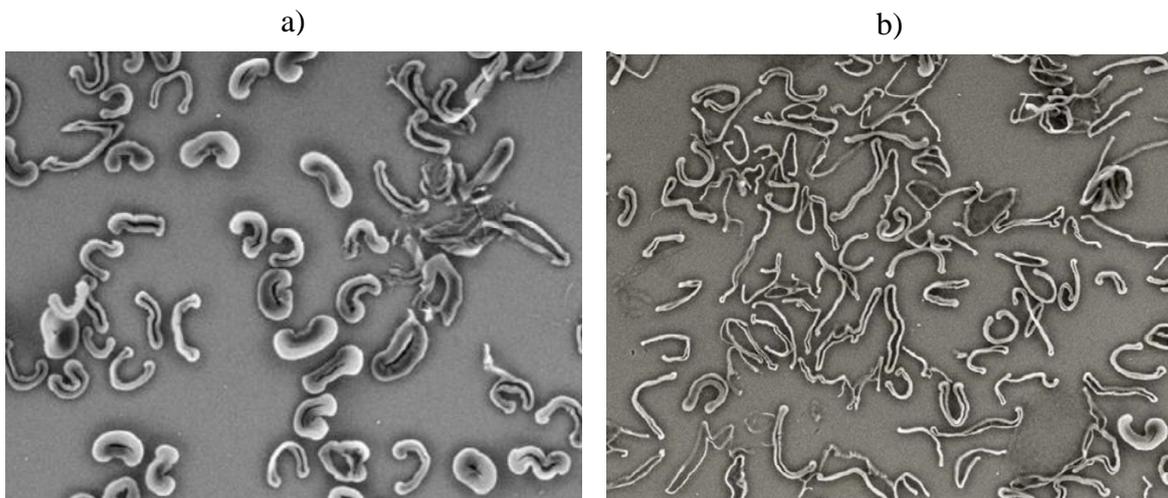


Figura 3: Fibra madura (a) e imatura (b) em seção transversal. Foto: E. Hequet. (In: Qualidade da fibra do algodão de Mato Grosso, 2014).

### 2.2.2 Tecidos

O tecido é um material à base de fios de fibra natural, artificial ou sintética, compostos por cordões, onde esses são formados pela união de filamentos (CERCHIARO, 2010).

Os tecidos urdidos ou tramados são formados intercalando cordões em duas direções: o urdume, que são dispostos na direção longitudinal (comprimento) do tecido, e a trama, composta de fios na direção transversal (largura) do tecido (CERCHIARO, 2010; MARQUES 2016), como apresentado na Figura 4.



Figura 4: Tecido tramado. Fonte: Levy Neto & Pardini, (2006).

Existem quatro os tipos principais de tecidos tramados, sendo os mais utilizados os do tipo simples e do tipo sarja. O tipo simples é obtido pelo cruzamento alternado de fios perpendiculares e o tipo sarja é obtido pelo cruzamento alternado de dois ou mais fios. Na

Figura 5, são apresentadas algumas tramas encontradas em tecidos urdidos (ARRUDA FILHO, 2015).

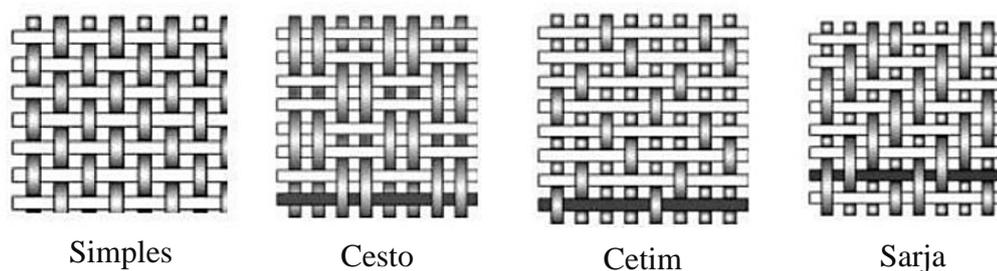


Figura 5: Alguns tipos de tecelagem mais comuns em compósitos. Fonte: John & Thomas (2008).

Há uma variedade de tecidos com diferentes geometrias e feitos de diferentes fibras. Os tecidos podem variar na geometria, na distribuição das fibras em duas ou três dimensões, além de combinações de diferentes tipos de fibras no mesmo tecido (FIDELIS *et al.*, 2014).

### 2.3 Compósitos Cimentícios Reforçados com Tecidos Vegetais

A matriz cimentícia reforçada com tecido (MCRT) surgiu como uma alternativa promissora para substituir matriz à base de polímeros reforçados com fibras, devido sua capacidade simples de trabalho, resistência ao fogo significativa e capacidade para dissipar energia através do desenvolvimento de padrões de múltiplas fissuras, entre outras vantagens (BERNAT-MASO, 2013). A MCRT consiste em um tecido embutido em uma matriz de argamassa. Este tecido pode ser produzido de diversos materiais, como fibra de vidro, carbono, basalto e fibra vegetal (ESCRIG *et al.*, 2015).

Os tecidos mais utilizados para produzir materiais compósitos são os tecidos 2D, que são classificados em quatro tipologias: estruturas não tecidas, estruturas trançadas, estruturas não trançadas e estruturas de malha (CADISPOTI *et al.*, 2015).

Rambo (2016) explica que o tipo de tecido e sua configuração são determinados com o tipo de aplicação e as condições que o compósito será submetido. Os tecidos planos unidirecionais ou bidirecionais são tipicamente empregados na produção de laminados finos, ou como reforço/reparo de estruturas. Os tecidos 3D são produzidos com o objetivo de reforçar elementos estruturais como vigas, pilares e placas.

Butler *et al.* (2010) afirmam que as fibras têxteis, não tem sua utilização restrita somente a novas estruturas, mas é possível aplicá-la também no reforço ou mesmo reparo de

estruturas pré-existentes, construídas inicialmente em concreto armado. Os autores em seus estudos destacam que o reforço com fibras têxteis é simples e pode ser adaptada para formas geométricas complexas. Faella *et al.* (2010); Gopinath *et al.* (2014) ressaltam que os tecidos tem sido aplicados, com limitação, na produção de placas cimentícias de pequena espessura e em aplicações *in situ* como reparo e reabilitação.

Pesquisas que utilizam fibras têxteis vegetais como reforço estão mais amplamente voltadas para aplicações em matrizes poliméricas. Marques (2016) em seu estudo usou tecido plano de algodão em matriz de poliéster; Motta *et al.* (2016) reforçaram painéis sanduíches de poliéster com tecido bidirecional de fios de rami; Varela (2017) empregou tecido plano de juta como reforço de matriz de resina ortoftálica. No entanto, existem poucos trabalhos sobre compósitos cimentícios com tecidos têxteis. Porém, nos últimos anos alguns autores realizaram pesquisas com esta finalidade, como Fidelis *et al.* (2014) que utilizou tecido têxtil de juta como reforço de compósitos cimentícios de pouca espessura; Oliveira (2017) empregou tecido vegetal como reforço de telhas cimentícias; Mercedes *et al.* (2018) produziram diversas malhas utilizando fibras de cânhamo, linho, sisal e algodão para empregar como reforço de matriz cimentícia.

### **2.3.1 Comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras**

As fibras como reforço de materiais compósitos cimentícios, possuem a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas, principalmente a ductilidade, após a primeira fissura. No entanto, o comportamento mecânico do compósito depende das propriedades das fibras, da matriz e da interface fibra-matriz. Sendo fatores que influenciam esse comportamento: a fração volumétrica e a orientação das fibras (curtas, polpa, longas unidirecionais, bidirecionais na forma de tecido), a geometria, o comprimento e o comportamento mecânico das fibras (FIDELIS, 2014; ARRUDA FILHO, 2015).

De acordo com Balaguru & Shah (1992), as matrizes frágeis reforçadas com fibras, podem se comportar de três maneiras distintas, quando submetidas a esforços de tração. O primeiro comportamento é caracterizado quando as cargas não são transmitidas efetivamente da matriz para as fibras, resultando no rompimento imediato do compósito após a fissuração da matriz (Figura 6 (a)). Esse comportamento é denominado frágil e costuma ocorrer quando a fração volumétrica é inferior ao volume crítico de fibras.

O segundo comportamento, é caracterizado pelo amolecimento de tensão, denominado de *strain softening*. Neste caso, a matriz domina até o momento da sua

fissuração, após isto, as cargas inferiores são transmitidas para fibra, sendo a ruptura caracterizada pelo arrancamento das fibras (Figura 6 (b)). Nesse tipo de compósito, mesmo não havendo acréscimo na resistência, a fibra proporciona ductilidade ao material.

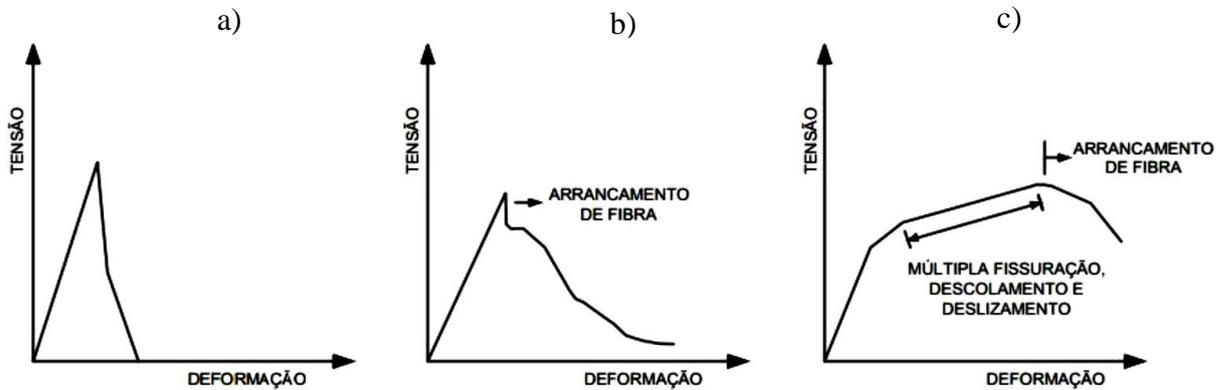


Figura 6: Comportamento de compósitos fibrosos: frágil (a), *strain softening* (b) e *strain hardening* (c). Fonte: Balaguru & Shah (1992).

O terceiro comportamento é caracterizado pelo endurecimento de tensão, conhecido como *strain hardening* (Figura 6 (c)). Neste caso, ocorre um acréscimo de tensão mesmo após a fissuração da matriz. Para esse comportamento existir é necessário um maior teor de fibras, suficiente para proporcionar o aumento de carga após a fissuração da matriz (BALAGURU & SHAH, 1992; LI *et al.*, 1995). Com esse aumento de carga ocorre o processo denominado múltipla fissuração, o qual pode ser subdividido em três fases principais, Rambo (2016) exemplifica essas fases como:

1. **Fase elástica:** composta pela resposta elástica do compósito, predominantemente governada pela matriz. O fim desta fase é alcançado quando o nível de tensão imposto ao compósito supera a resistência à tração do concreto.
2. **Formação de múltiplas fissuras:** após a formação da primeira fissura, inicia-se o processo de múltipla-fissuração do compósito, como apresentado na Figura 7.
3. **Localização de fissuras:** esta última fase é caracterizada pela abertura das fissuras, bem como, pela localização de uma das fissuras, a qual passa a abrir mais que as demais, levando o compósito ao colapso.

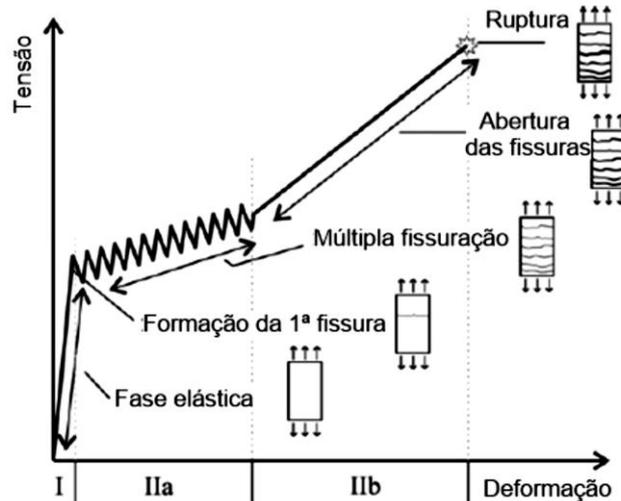


Figura 7: Representação esquemática da resposta típica de um CRT sob tração. Fonte: Adaptado de BARHUM & MECHTCHERINE, 2012.

Segundo Bernat-Maso (2013) é essencial entender que a matriz cimentícia reforçada com tecido (MCRT) fornece resistência à tração graças às fibras dos tecidos e que essas fibras só suportam as cargas que a argamassa é capaz de transmitir. Portanto, a transferência de tensões da matriz é um dos principais requisitos a serem considerados, assim como a geometria do tecido e sua estabilidade química (durabilidade) dentro da matriz.

A interface fibra-matriz dos compósitos cimentícios reforçados com têxteis (CRT), é completamente diferente de outros materiais usados como reforço, uma vez que a seção transversal do tecido não é homogênea. Os tecidos são formados por fios compostos por filamentos. Os filamentos externos de um fio têm contato direto com a matriz, ou seja, apenas uma parte do tecido é ancorada na matriz. Os filamentos internos não são afetados pelos produtos de hidratação do cimento. Assim, há apenas atrito entre os filamentos (FIDELIS *et al.*, 2014; 2016). Neste caso, é necessário e importante que exista uma forte aderência entre a matriz e o reforço, caso contrário ocorrerá à descolagem do composto (FELICE *et al.*, 2014).

Fidelis *et al.* (2014) produziu compósitos têxteis reforçados com tecido de juta, nas frações volumétricas de 6 e 10%, equivalente a 3 e 5 camadas, respectivamente. As amostras foram submetidas a ensaios de tração direta aos 28 dias. Os compósitos apresentaram maior capacidade de deformação e múltipla fissuração, apresentando comportamento *strain hardening* (Figura 8 (a)). O compósito com teor de 6% de fibra resistiu a tensão máxima de 4,38 MPa, e apresentou seis fissuras no terço médio. Enquanto o compósito com 5 camadas, resistiu a tensão de 4,73 MPa, e apresentou 11 fissuras, como apresentado na Figura 8 (b).

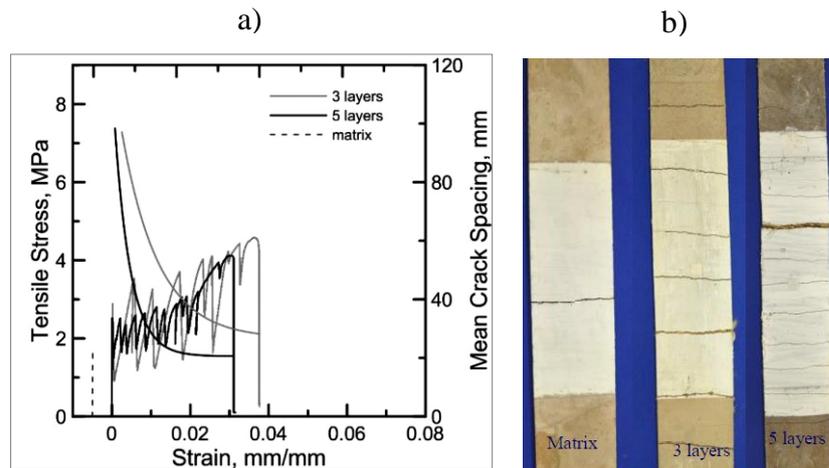


Figura 8: Compósitos têxteis reforçados com 6 e 10% de tecido de juta. Fonte: Fidelis *et al.*, 2014.

Arruda Filho (2015) desenvolveu placas cimentícias reforçadas com tecido estrutural de sisal, com fração volumétrica de 3, 4, 6, 9 e 10%. Amostras de 40 x 10 x 1 cm (comprimento, largura, espessura) foram utilizadas para ensaios de flexão, e espécimes de 20 x 5 x 1 cm (comprimento, largura, espessura) foram submetidos a tração direta, ambos aos 28 dias. De modo geral, os compósitos apresentaram comportamento *strain hardening*, tanto para flexão, quanto para tração. As amostras com teor 6% de fibra testadas a flexão, tiveram média de resistência máxima de 14,38 MPa e apresentaram em média 14 fissuras com espaçamento médio de 7,26 mm, o gráfico característico da amostra encontra-se na Figura 9 (a). Quando submetidas à tração direta as amostras tiveram média de tensão máxima de 6,89 MPa, cujo gráfico tipo é apresentado na Figura 9 (b), com média de 8 fissuras com espaçamento de 11,4 mm.

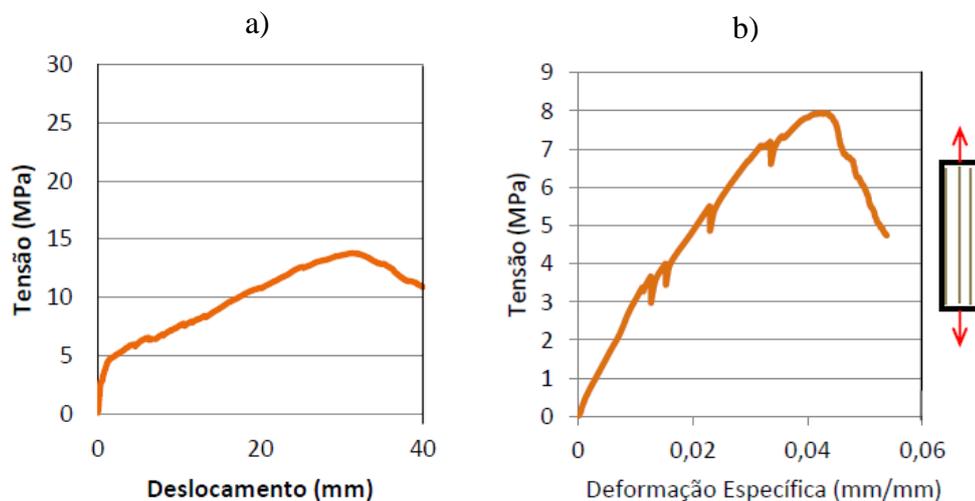


Figura 9: Compósitos com teor 6% de fibra de sisal: a flexão (a) e a tração (b). Fonte: Arruda Filho, 2015.

Mercedes *et al.* (2018) produziram compósitos cimentícios reforçados com malhas confeccionadas a partir de fios têxteis de cânhamo, linho, sisal e algodão. Os pesquisadores revestiram as malhas com resina de poliéster e epóxi. Os compósitos produzidos foram submetidos a ensaios de tração direta, aos 28 dias de idade. O revestimento com epóxi e poliéster melhorou as propriedades mecânicas dos fios e, aparentemente evitou as falhas típicas de escorregamento dos compósitos. Os laminados reforçados de cânhamo e linho são os que atingiram a maior resistência mecânica. Quanto o reforçado com algodão, suportou tensão máxima de 5,4 MPa, quando tratado com poliéster e 4,34 MPa para a fibra tratada com epóxi. Considerando que o compósito reforçado com algodão apresentou maior capacidade de alongamento e múltipla fissuração. Apresentando entre 7 e 18 fissuras ( maior quantidade de fissuras observadas nos casos com tela de algodão revestida com epóxi), verificando-se a interação malha-matriz adequada que permitiu o uso da capacidade de alongamento dos fios de algodão. Na figura 10, apresenta-se o modo de fratura dos compósitos.

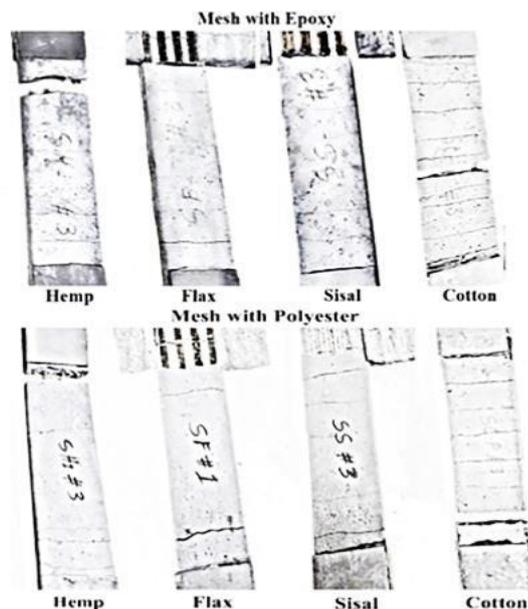


Figura 10: Compósitos reforçados com malhas de cânhamo, linho, sisal e algodão. Mercedes *et al.*, 2018.

## 2.4 Durabilidade de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais

A durabilidade é um dos aspectos mais importantes no desenvolvimento de um novo material, sendo esta característica fundamental para que um novo produto seja inserido no mercado, principalmente no setor da construção civil onde existem grandes investimentos.

Desde a proibição do amianto, as fibras naturais vegetais despertaram o interesse de pesquisadores por estarem prontamente disponíveis e por serem renováveis. A partir de então,

começou-se a estudar os compósitos reforçados com estas fibras. Contudo, para a aplicabilidade destes materiais na construção civil é necessário estudos sobre seu comportamento ao envelhecimento. No entanto, a degradação das fibras naturais no ambiente alcalino não foi totalmente entendida. Além disso, o impacto da hidratação do cimento *Portland* na taxa de deterioração das fibras raramente é estudado. Portanto, o modelo de predição da durabilidade para fibra natural em materiais cimentícios não foi desenvolvido. Poucos projetistas estão dispostos a aceitar o risco de trabalhar com reforços não confiáveis, problema este que poderia ser atenuado se um modelo parametrizado fosse desenvolvido para simular a taxa de degradação da fibra como uma função do tempo de serviço (WEI, 2018).

A durabilidade dos compostos de cimento *Portland*, está vinculada ao tempo no qual o material mantém suas propriedades mecânicas e químicas, sem a presença de fissuração ou deterioração (desgaste visual na sua superfície ou no volume) que possam reduzir o peso ou a massa específica (SILVA *et al.*, 2018). Se estiverem sendo usados na prática, é necessário entender que os compósitos fibrosos serão expostos a várias condições ambientais. Estes necessitam resistir tanto a variações externas (como variações de temperatura e umidade, chuvas, soluções ácidas e alcalina, luz UV, congelamento e descongelamento, ciclos térmicos, ataque de cloretos, entre outros) quanto a danos internos (compatibilidade entre fibras e várias matrizes, mudanças volumétricas) (YAN & CHOUW, 2013; 2015; YAN *et al.* 2015).

A perda de resistência dos compósitos fibrosos com o passar do tempo deve-se, ao ataque alcalino, mineralização das fibras devido à migração dos produtos de hidratação para o lúmen e os vazios das células vegetais, além da hidrofiliabilidade das fibras, fazendo que as mesmas absorvam água da matriz ocasionando sua expansão. Estes mecanismos fazem com que o compósito reduza resistência pós-pico (ARDANUY *et al.* 2011; FIDELIS, 2014; MARQUES, 2015). Portanto, é importante que as fibras apresentem boa aderência com a matriz ao longo do tempo, uma vez que estas problemáticas podem levar a falha prematura dos compósitos (ARDANUY, 2015; WEI & MEYER, 2017).

Estudos sobre a redução da alcalinidade da matriz vêm sendo realizados a fim de diminuir a degradação da fibra, como pode-se observar em pesquisas realizadas pelos autores Melo Filho *et al.* (2013); Wei (2014; 2018); Wei & Meyer (2015; 2017) que dedicaram-se a estudar a durabilidade de compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais quando expostos a diferentes meios e condições. Os pesquisadores realizaram modificações nas matrizes cimentícias, substituindo parcialmente o cimento *Portland* por material, com efeito, pozolânico, a fim de se obter uma matriz livre de hidróxido de cálcio.

A preocupação em desenvolver técnicas com o intuito de solucionar o problema de durabilidade de compósitos é antiga e vários autores buscam por soluções, a fim de aumentar a durabilidade dos materiais laminados com fibras vegetais, seja por meio de modificações na matriz ou através de tratamentos nas fibras.

Claramunt *et al.* (2011) realizaram um estudo sobre hornificação de fibras vegetais com a finalidade de melhorar durabilidade de compósitos cimentícios. Os autores submeteram fibras de polpa de celulose e algodão a quatro ciclos de molhagem e secagem. Após os ciclos avaliaram o comportamento mecânico dos compósitos produzidos com essas fibras, através de ensaios de compressão e flexão. Os resultados indicaram que o tratamento das fibras foi satisfatório no comportamento mecânico e na durabilidade dos compósitos. Os compósitos reforçados com fibras tratadas apresentaram maior resistência à flexão entre 8% (compósitos com polpa de celulose) e 16% (com fibra de algodão), do que compósitos com fibras não tratadas. Houve uma diminuição da resistência após o envelhecimento, como esperado. No entanto, os compósitos com fibras tratadas mantiveram resistência na pós-fissuração e os compósitos com fibras não tratadas apresentaram comportamento semelhante à matriz sem reforço.

Wei (2014) concentrou sua pesquisa em estudar mecanismos de envelhecimento e a cinética de degradação da fibra de sisal, bem como abordagens para mitigar sua degradação no compósito cimentício. O autor propôs dois mecanismos para minimizar a degradação da fibra, a modificação da matriz cimentícia e o tratamento da fibra. Para modificar a matriz o autor substituiu parte do cimento por uma combinação de metacaulim e nanocélula, e uma combinação de cinzas de casca de arroz e calcário. As abordagens apresentadas reduzem efetivamente o teor de hidróxido de cálcio e a alcalinidade da solução de poros, minimizando a degradação das fibras melhorando as propriedades mecânicas iniciais e a durabilidade dos compósitos de fibra e cimento. A fim de melhorar a resistência à degradação da própria fibra de sisal, foram investigados dois novos, simples e econômicos pré-tratamentos das fibras (tratamento térmico e de carbonato de sódio). Tanto o tratamento térmico como o tratamento com  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  melhoraram efetivamente a durabilidade do concreto reforçado com fibra de sisal.

#### **2.4.1 Tratamentos em matrizes cimentícias**

A composição química das fibras vegetais e do cimento é diferente e a interação entre eles é geralmente complicada, ocasionando incompatibilidade ao longo da interface dos

compósitos (KABIR *et al.*, 2012). A fim de solucionar este problema pesquisadores propuseram dois métodos, o primeiro trata-se de modificações na composição da matriz, com o propósito de diminuir a alcalinidade e diminuir os poros, a segunda possibilidade é realizar tratamentos químicos ou físicos para aumentar a estabilidade dimensional da fibra na matriz cimentícia, assim os métodos proporcionam melhor desempenho ao compósito fibroso e aumentam sua durabilidade (ARDANUY, 2015; MARQUES, 2015).

O tratamento para modificar a matriz cimentícia na maioria das pesquisas está concentrada no uso de materiais cimentícios suplementares (que possuam atividade pozolânica) (ARSÈNE *et al.*, 2013; MELO FILHO *et al.*, 2013; FERREIRA *et al.*, 2015) ou na redução da alcalinidade da matriz pelo processo de carbonatação acelerada (ALMEIDA *et al.*, 2013; PIZZOL, *et al.*, 2014; CORREIA *et al.*, 2017).

As adições minerais utilizadas em compósitos cimentícios com fibras vegetais podem ser metacaulim (MELO FILHO, 2013; WEI, 2018), resíduo de cerâmica vermelha (FARIAS FILHO *et al.*, 2010; OLIVEIRA, 2017), cinza de casca de arroz (WEI & MEYER, 2016), resíduo de vidro (ALY *et al.*, 2011), entre outros. A utilização destes materiais no compósito provoca uma reação com o hidróxido de cálcio, denominada de reação pozolânica, formando novos compostos hidratados, diminuindo a alcalinidade, além de elevar à resistência a compressão e reduzir a permeabilidade (ARDANUY, 2015).

O processo de carbonatação acelerada ocorre com a difusão do gás carbônico (CO<sub>2</sub>) presente na atmosfera, através dos poros insaturados de matrizes cimentícias. O CO<sub>2</sub> é dissolvido na fase aquosa nos poros, transformando em ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Este é dissociado em íons de HCO<sup>3-</sup> e CO<sup>3-</sup>, enquanto o hidróxido de cálcio, dissocia-se em Ca<sup>2+</sup> e OH<sup>-</sup>, resultando na precipitação do CaCO<sub>3</sub> (ALMEIDA *et al.* 2013; PIZZOL, 2013). Tonoli *et al.*(2010) afirmam que a carbonatação pode ser um tratamento eficaz para aumentar a durabilidade das fibras naturais em matrizes cimentícias.

#### **2.4.2 Tratamentos em fibras**

Os tratamentos realizados para combater o caráter hidrofílico das fibras e melhorar a adesão da interface fibra-matriz podem ser químicos e físicos. Entre os tratamentos químicos mais relatados são o tratamento alcalino ou mercerização, acetilação, silano, permanganato, impregnação, entre outros (ONUAGULUCHI & BANTHIA, 2016; PICKERING *et al.* 2016). Entre estes métodos, o mais utilizado é o de mercerização, por possuir baixo custo.

Esse tratamento consiste em remover grande parte da hemicelulose, lignina e materiais solúveis da fibra, tornando sua superfície áspera (ARSYAD *et al.*, 2015).

Os tratamentos físicos nas fibras modificam suas propriedades estruturais e superficiais sem transformar sua composição química. Dentre os tratamentos físicos incluem-se a hornificação, corona, plasma frio, raios ultravioletas, tratamentos térmicos com radiação de elétrons, entre outros (FARUK *et al.*, 2012; PIECKERING *et al.*, 2016).

A aplicação de ciclos de molhagem e secagem nas fibras é um tipo de tratamento, cujo processo é conhecido como hornificação (FIDELIS, 2014). Esse método consiste na alteração da retenção de água, além de modificações no comportamento mecânico. Após os ciclos de molhagem e secagem, as paredes celulares da fibra entram em colapso, resultando em modificações de sua estrutura, como redução do diâmetro do lúmen e deformações nas paredes fibrocelulares (FERREIRA, 2012).

Com o intuito de proteger e melhorar a aderência fibra-matriz, vários autores vem realizando tratamentos superficiais nas fibras, antes de produzir os compósitos fibrosos:

Oliveira (2017) utilizou resina acrílica para tratamento de tecido de fibras de juta e malva, com o objetivo de impermeabilizar as fibras para evitar a troca de água da matriz cimentícia com a fibra do compósito. Além disso, o autor modificou a matriz cimentícia substituindo 50% do cimento *Portland* por resíduo de tijolo moído. A caracterização mecânica dos compósitos a partir dos ensaios de tração direta, tração na flexão em quatro pontos apresentaram bons resultados, que teve um aumento médio em cerca de 18%, maiores do que a referência.

Mercedes *et al.* (2018) realizaram tratamentos em tecidos de cânhamo, linho, sisal e algodão com resina de epóxi e resina de poliéster. Em seus estudos os autores observaram que o cânhamo tratado com a resina de poliéster obteve melhor resultado, o tratamento resultou em um aumento de 84% na resistência à tração e cerca de 92% no módulo de Young. No entanto, este mesmo tratamento no fio de sisal ocasionou na diminuição da resistência à tração e aumentou o módulo de elasticidade apenas em 1%. De maneira geral, os autores observaram que o tratamento com resina epóxi foi mais satisfatório, aumentando a resistência à tração e a rigidez dos fios analisados. Além disso, este tratamento proporcionou melhor compatibilidade com a matriz cimentícia.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

São apresentados os materiais utilizados, os equipamentos e os métodos que foram adotados para atingir os objetivos propostos pelo trabalho. O fluxograma, apresentado na Figura 11 mostra o esquema geral do presente estudo.

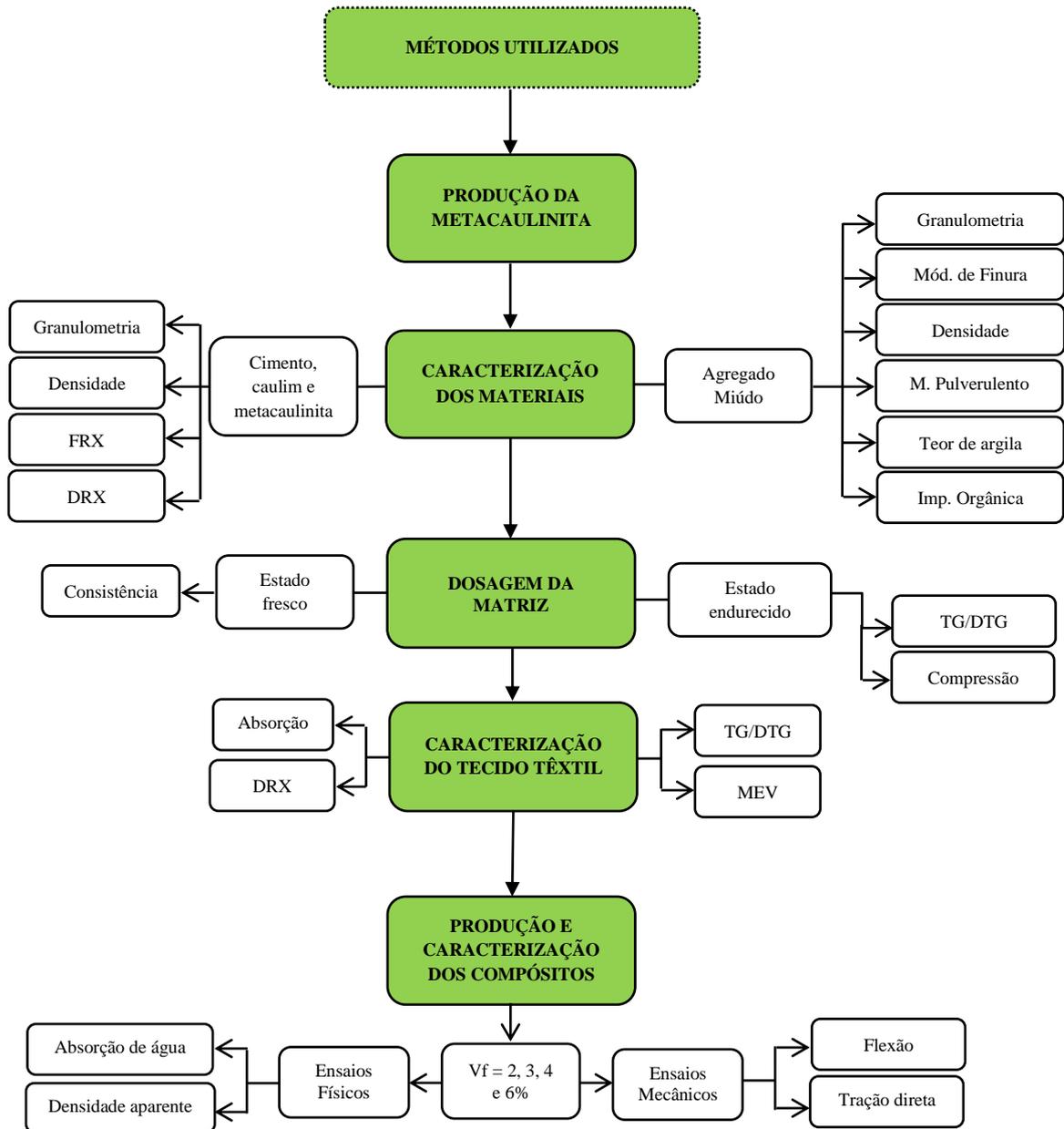


Figura 11: Representação esquemática do desenvolvimento do trabalho.

### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados para desenvolvimento desta pesquisa são apresentados a seguir.

#### 3.1.1 Cimento

Neste trabalho foi utilizado o Cimento *Portland* composto com escória, marca CEMEX, tipo CP II E-32 (Figura 12).

O cimento composto com escória (CP II E-32) apresenta, além da sua composição básica (clínquer e gesso), contém adição de escória granulada de alto-forno, o que lhe confere a propriedade de baixo calor de hidratação. Segundo Nascimento (2009), este tipo de cimento é composto por aproximadamente 56% a 94% de clínquer e gesso, 6% a 34% de escória, e pode ou não ter adição de material carbonático, no limite máximo de 10 % em massa.

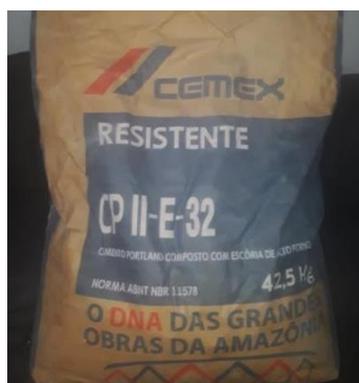


Figura 12: Cimento composto com escória de alto forno.

A escolha deste cimento deu-se por sua composição apresentar uma porcentagem de escória de alto forno moída, tal qual, atuará juntamente com a metacaulinita para obter uma matriz com menor teor de hidróxido de cálcio, evitando a mineralização das fibras.

#### 3.1.2 Caulim

A metacaulinita utilizada nesta pesquisa é proveniente da calcinação do caulim, coletado na BR 174 (Km 44), Manaus-AM. Localização apresentada na Figura 13, possuindo Latitude: 2° 35'13,28" S e Longitude 60°01'58,53" O.



Figura 13: Localização da coleta do caulim. Fonte: GoogleEarth.

### 3.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado para a produção dos compósitos foi uma areia de rio, adquirida no comercio local de Manaus – AM, passante na peneira 0,59 mm (Figura 14).



Figura 14: Areia de rio utilizada na pesquisa.

### 3.1.4 Água

A água utilizada nos ensaios experimentais foi proveniente de poços artesianos localizados na Universidade Federal do Amazonas e que abastecem os laboratórios utilizados nesta pesquisa.

### 3.1.5 Superplastificante

O superplastificante utilizado foi o MC-Powerflow 1160, que é um superplastificante sintético de alto desempenho baseado na nova tecnologia de polímeros policarboxilatos (PCE) desenvolvido pela MC-Barchemie Brasil, com massa específica de  $1,07 \text{ g/cm}^3$  (Figura 15).



Figura 15: Embalagem do tipo de superplastificante. Fonte: Oliveira, 2017.

### 3.1.6 Tecido de fibras de algodão

O material utilizado como reforço foi adquirido no mercado local de Manaus. É um tecido têxtil produzido a partir dos filamentos da fibra de algodão (Figura 16 (a)). O tecido é composto por uma dupla camada, com aberturas de 1 mm, tanto na direção da trama, quanto na direção do urdume (Figura 16 (b)).

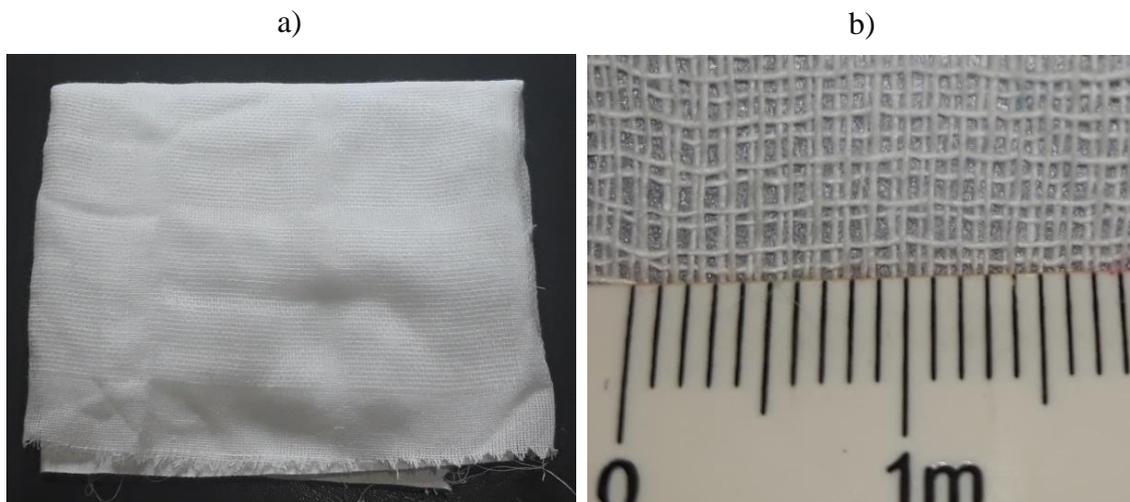


Figura 16: Tecido têxtil de algodão (a), dimensão das aberturas do tecido (b).

## 3.2 Métodos

São apresentados os métodos utilizados para desenvolvimento deste trabalho. As caracterizações dos materiais foram realizadas de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

### 3.2.1 Processo de produção da metacaulinita

A metacaulinita utilizada neste estudo foi produzida nos laboratórios da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Para produzir a metacaulinita realizou-se primeiramente à coleta do caulim. Em seguida, o caulim foi depositado em um recipiente com água por aproximadamente 24 horas. Posteriormente, o material foi passado na peneira 0,075 mm (200 mesh) por via úmida (Figura 17 (a)). Após este procedimento deixou-se o material decantar (separação da água do caulim), por um período de 24h (Figura 17 (b)). Logo após, o caulim retirado foi colocado em estufa (marca DeLeo), a uma temperatura de 100 °C, até o material ficar completamente seco (Figura 17 (c)). Depois, realizou-se o destorroamento com o auxílio de um pistilo e um almofariz.

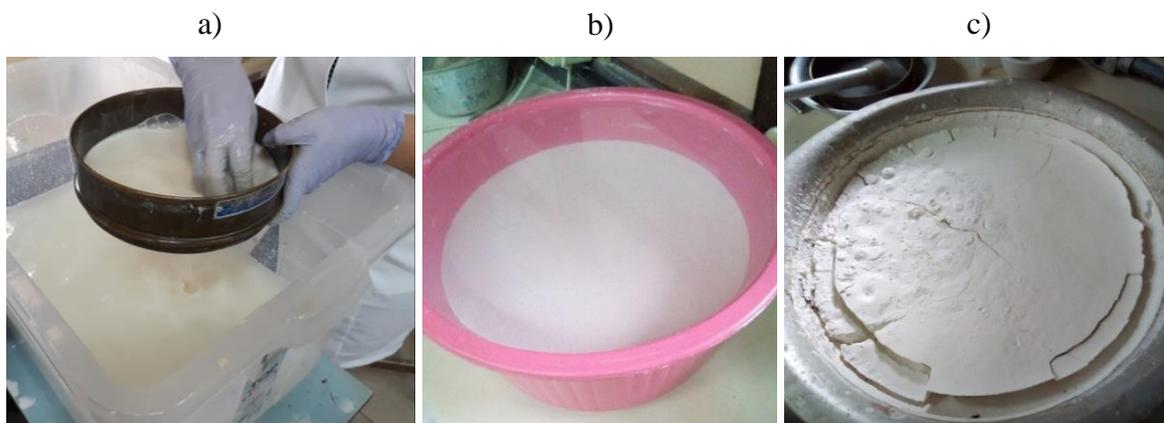


Figura 17: Lavagem do caulim (a); decantação do caulim (b); caulim após secagem em estufa (c);

Por fim, o material foi calcinado ao forno mufla (Figura 18 (a)) da marca Linn Elektro Therm, no laboratório de laminação (UFAM). O caulim foi distribuído em recipientes de porcelana, no qual foram realizadas pequenas cavidades, com a finalidade de proporcionar uma calcinação uniforme do material (Figura 18 (b)). Para a calcinação o equipamento operou com uma taxa de aquecimento de aproximadamente 20 graus por minuto, até atingir a temperatura de 750 °C, o qual manteve-se neste patamar durante 4 horas. Após este período, o

material ficou dentro do forno mufla até o seu resfriamento. Neste processo, cabe ressaltar que a temperatura e o tempo de calcinação foram determinados através de análises prévias, semelhantes à desenvolvida por Mazza (2010). O autor utilizou em sua pesquisa 3 tipos de argila caulim, diferenciando-se pelo percentual de sílica e alumina. Para escolher a temperatura ideal de calcinação e o tempo ideal de queima, o autor produziu amostras, as quais foram avaliadas através de análises de difração de raios X. Este processo foi realizado até a obtenção da metacaulinita mais amorfa.

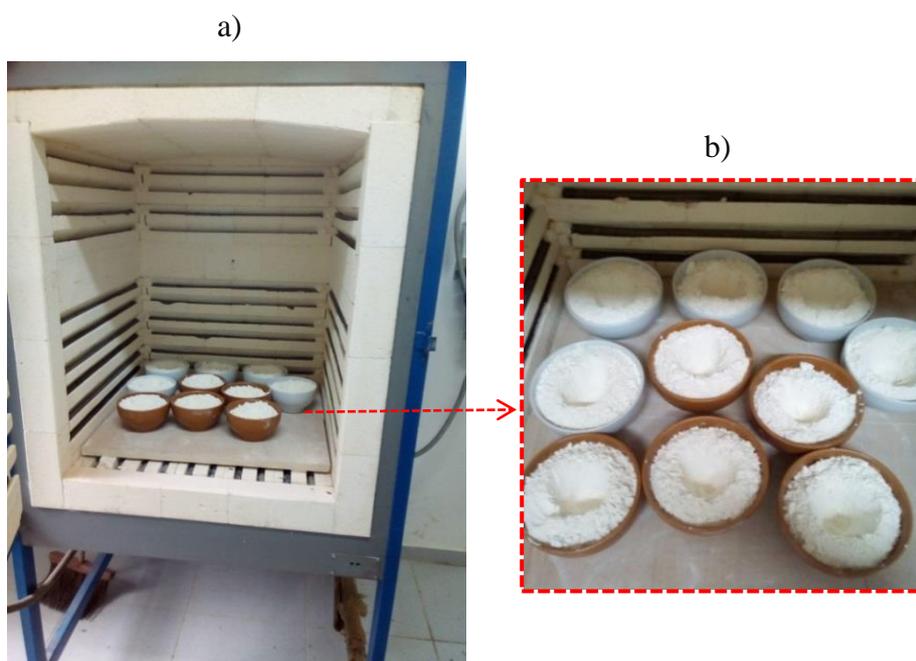


Figura 18: Processo de calcinação: material no forno mufla (a); caulim no cadinho de porcelana (b).

Assim como Mazza (2010), nesta pesquisa foram estudados dois tipos de caulins, coletados na BR 174 e na BR 372, com a finalidade de definir a melhor metacaulinita a ser utilizada nesta pesquisa. Realizaram-se várias calcinações em tempos e temperaturas diferentes, a fim de estabelecer a mais adequada para se realizar a calcinação mais eficiente, de modo a garantir sua reatividade. Amostras foram calcinadas a temperaturas de 750 °C durante 2 e 4 horas e a 650 °C durante 4h. As metacaulinitas foram submetidas a ensaios de difração de raios-X e analisadas, a fim de determinar a metacaulinita com maior amorficidade.

### 3.2.2 Caracterização dos componentes da matriz cimentícia

#### 3.2.2.1 Areia

O procedimento para coleta de amostragem do agregado miúdo foi realizado de acordo com a NBR NM 27 (2001). O quarteamento da areia foi realizado através de um separador mecânico, disponível no Laboratório de Pavimentação (LABPAV), da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), como mostrado na Figura 19.



Figura 19: Separador mecânico.

Na Tabela 3 apresentam-se os ensaios realizados para caracterização do agregado miúdo.

Tabela 3 – Ensaios realizados para caracterização do agregado miúdo natural.

<b>Características</b>	<b>Métodos</b>
Composição granulométrica e Módulo de finura	NBR NM 248:2003
Massa específica por meio do frasco Chapman	NBR NM 52:2009
Teor de material fino que passa através da peneira 75 $\mu\text{m}$ , por lavagem	NBR NM 46:2003
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	NBR 7218:2010
Impurezas orgânicas	NBR NM 49:2001

Para executar a granulometria do agregado miúdo utilizou-se um agitador mecânico, utilizando um conjunto de peneiras com aberturas de 0,15 mm; 0,3 mm; 0,59 mm; 1,18 mm; 2,40 mm e 4,75 mm.

### 3.2.2.2 Cimento, caulim e metacaulinita

O cimento e a metacaulinita foram caracterizados através de ensaios de granulometria a laser, massa específica, difração de raios-X (DRX) e espectrometria fluorescência de raios-X por energia dispersiva (FRX), no qual os dois últimos métodos foram utilizados para caracterizar a argila caulinítica *in natura*, conforme os métodos descritos a seguir.

#### 3.2.2.2.1 Densidade

A massa específica das amostras foi determinada de acordo com os parâmetros descritos na NBR NM 23 (2010). No qual, empregou-se o frasco Le Chatelier, com capacidade de 250 cm<sup>3</sup>, com leitura de precisão de 0,05 cm<sup>3</sup>, e como reagente utilizou-se o querosene. O ensaio foi realizado no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Amazonas para amostra de metacaulinita (Figura 20 (a)) e para o cimento *Portland* (Figura 20 (b)).

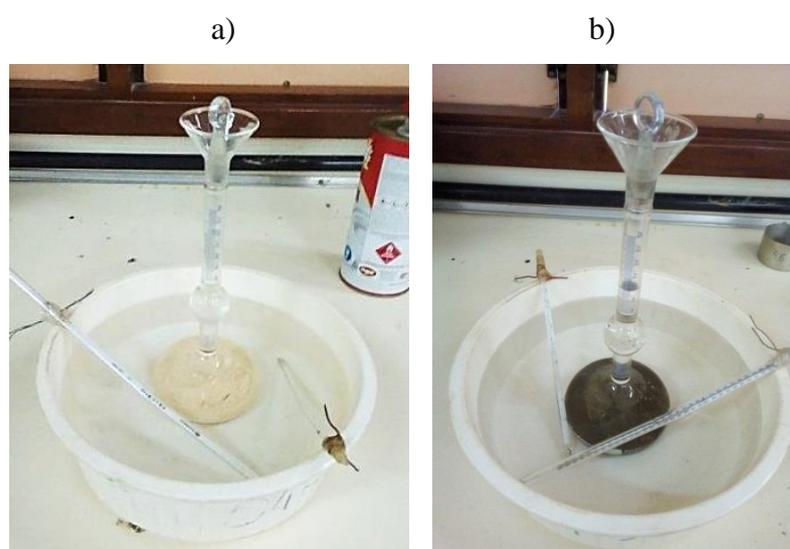


Figura 20: Densidade através do frasco Le Chatelier: metacaulinita (a) e cimento (b).

Para proceder à análise, as amostras foram secas em estufa a 100 °C. Em seguida, pesou-se 60 g de cada amostra. Posteriormente, adicionou-se ao poucos no querosene, o qual foi estabilizado a uma temperatura de 25 °C. Realizaram-se duas repetições para o cimento e a metacaulinita, obtendo o resultado de suas médias.

### **3.2.2.2 Granulometria a laser**

O ensaio de granulometria é um procedimento utilizado para determinação da porcentagem em peso de cada faixa especificada de tamanho de partículas. A análise granulométrica foi utilizada para caracterizar o cimento CP II E-32 e a metacaulinita. A granulometria a laser foi realizada em equipamento CILAS 1180 – Particle Size Analyzer, com capacidade de detecção entre 0,00004 a 2,5 mm (Figura 21), no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Onde o cimento foi disperso em água e a metacaulinita dispersa em água deionizada. O tempo de ultrassom foi de 60 segundos.

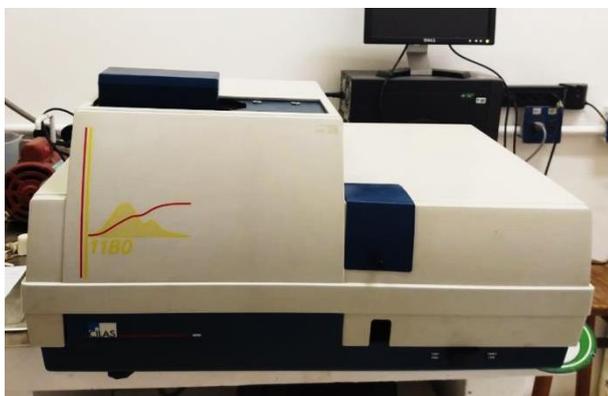


Figura 21: Equipamento para ensaio de granulometria.

### **3.2.2.2.3 Espectrometria fluorescência de raios-X por energia dispersiva**

A análise por fluorescência de raios-X é um método que qualifica e quantifica a composição química das amostras, baseado na medida das intensidades (número de raios-X detectados por unidade de tempo) dos raios-X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra, quando devidamente excitada (FERRETI, 2009).

A composição química foi determinada por meio de espectrometria fluorescência de raios-X (FRX) por energia dispersiva, identificando-se os elementos constituintes do cimento, do caulim e da metacaulinita. As análises foram realizadas em equipamento da marca PANalytical, modelo EPSILON 3-XL (Figura 22), com tensão máxima de 50 kV, realizado com corrente máxima de 3 mA e gás hélio com pressão de 10 kgf/cm<sup>2</sup>, no Laboratório de Ensaio Físico-Químicos da Universidade Federal do Amazonas (UFAM).



Figura 22: Equipamento de fluorescência de raios-X.

#### 3.2.2.2.4 Difração de raios-X

Amostras de cimento, caulim e metacaulinita foram submetidos à análise de difração de raios-X. O ensaio procedeu-se no Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais (LSCN), no Instituto Federal do Amazonas (IFAM). A análise foi realizada em um difractômetro Bruker D2 Phaser (Figura 23), com radiação de cobre ( $\text{Cu-K}\alpha$ ,  $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$ ), operando a 30 kV e 10 mA, num passo de  $0,02^\circ$  por segundo e intervalo de medida entre os ângulos de Bragg ( $2\theta$ ) de  $10^\circ$  até  $70^\circ$ , com intensidades registradas em cada passo. Para executar o ensaio, colocou-se aproximadamente 10 g de material no porta amostras, posteriormente foi colocada no equipamento para análise, seguindo um por vez.



Figura 23: Equipamento Bruker D2 Phaser.

Os resultados obtidos foram trabalhados no software X'Pert HighScore Plus, no qual identificou-se as composições mineralógicas dos sólidos cristalinos, através do banco de dados de estruturas mineralógicas padrão (PDF 2, 2004).

### 3.2.3 Produção e caracterização da matriz

#### 3.2.3.1 Dosagem da matriz

Para comparar o efeito da substituição de cimento *Portland* por metacaulinita foram produzidas duas matrizes cimentícias: a matriz M0 (referência), que utiliza somente o cimento *Portland* CP II E-32 como aglomerante, e a matriz M1, que substitui 50% do cimento por metacaulinita. As argamassas foram produzidas de acordo com Melo Filho (2012), utilizando-se o traço 1:1:0,4 (material cimentício: areia: água/material cimentício em peso). O autor obteve excelentes resultados com essa dosagem, de maneira que a porcentagem de material pozolânico não prejudicasse a resistência mecânica do material e fosse suficiente para garantir o consumo do hidróxido de cálcio presente na matriz cimentícia, evitando o processo de degradação das fibras.

As matrizes foram produzidas em argamassadeira da marca MATEST com capacidade de 5 litros, contendo duas velocidades uma baixa (60 rpm) e uma alta (120 rpm). Para o processo de produção adotou-se a seguinte sequência: primeiramente pesaram-se todos os materiais em balança com precisão de 0,1 g. Posteriormente, os materiais secos foram misturados manualmente até ficarem homogêneos (Figura 24 (a)). Em seguida, na argamassadeira, misturou-se por mais 1 minuto em velocidade de 60 rpm (Figura 24 (b)). Logo após, adicionou-se a metade do superplastificante diluído em água e deixou-se misturar por 1 minuto em velocidade de 60 rpm (Figura 24 (c)). Após isto, incorporou-se o restante do superplastificante diluído e misturou-se por mais 1 minuto (Figura 24 (d)). Por fim, para homogeneizar a argamassa, deixou-se mais 2 minutos em velocidade de 60 rpm (Figura 24 (e)).

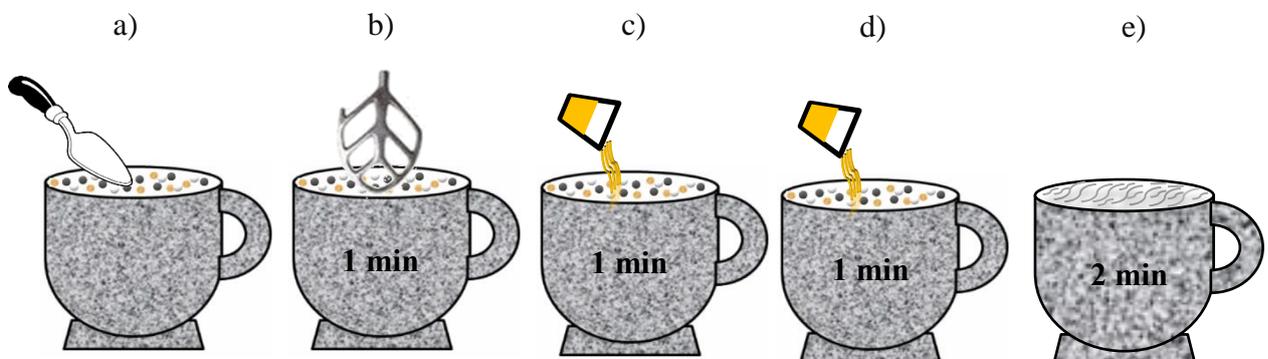


Figura 24: Mistura manual dos materiais (a); mistura dos materiais secos (b); adição da metade do superplastificante diluído (c); incorporação da segunda metade do aditivo (d); homogeneização da argamassa (e).

### 3.2.3.2 Determinação do teor do aditivo superplastificante

O ensaio de teor ótimo de superplastificante na matriz M1 foi realizado para avaliar sua compatibilidade com o cimento CP II E-32 e produzir uma matriz de alta fluidez. O ponto ótimo de saturação indica para o superplastificante a dosagem ótima, a partir da qual são verifica-se ganhos relevantes de fluidez. Para isso, realizaram-se ensaios de consistência.

Os ensaios de consistência foram realizados com base na NBR 13276 (2016), que usa uma mesa horizontal lisa e plana, um molde tronco-cônico e o soquete de metal. Para este tipo de ensaio normalmente são aplicados golpes na mesa e depois mede-se o espalhamento, mas neste caso, realizou-se uma adaptação da norma. Devido à utilização do superplastificante não foi necessário o uso dos golpes, pois a presença oferece uma alta fluidez.

O teor ótimo de superplastificante foi definido com referência em pesquisas realizadas anteriormente por (Toledo Filho *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2010; Fidelis, 2014) onde foi obtido um valor de espalhamento de aproximadamente 400 mm, para dar trabalhabilidade a matriz cimentícia. Outras características foram avaliadas durante o espalhamento, como bordas uniformes, exsudação e segregação do material. Na Tabela 4, apresenta-se as massas dos materiais, utilizados para desenvolver este ensaio. No qual foram empregados teores de 0,4; 0,6; 0,8 e 1,0% de superplastificante e a relação água/cimento foi mantida em 0,4%.

Tabela 4 – Quantidade de materiais utilizados para ensaios na argamassa.

Materiais	Teor de Superplastificante (%)			
	0,4	0,6	0,8	1,0
Cimento (g)	244,81	244,81	244,81	244,81
Metacaulinita (g)	244,81	244,81	244,81	244,81
Areia (g)	489,62	489,62	489,62	489,62
Água (g)	193,36	192,11	190,86	189,62
Aditivo SP (g)	4,45	6,68	8,90	11,13

Para executar o ensaio de consistência seguiu os seguintes procedimentos: colocação da argamassa no tronco-cônico (Figura 25 (a)), remoção do excesso de argamassa e arrasamento da superfície (Figura 25 (b)), retirada do molde (Figura 25 (c)). O índice de consistência foi determinado através da média aritmética de três diâmetros ortogonais, quando

transcorrido em 1 minuto do início do ensaio e mantendo-se o registro de espalhamento médio.

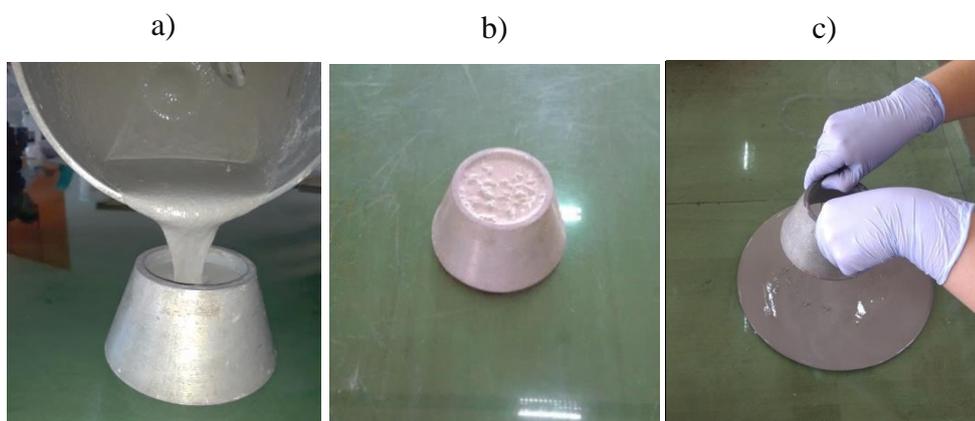


Figura 25: Colocação da argamassa no molde (a); argamassa no tronco-cônico (b); retirada do molde (c).

### 3.2.3.3 *Análise termogravimétrica da matriz cimentícia*

A análise termogravimétrica é uma das melhores técnicas entre vários métodos para medir o teor de hidróxido de cálcio e avaliar a atividade pozolânica em materiais cimentícios (BAERT *et al.*, 2008). Segundo Elbeyli *et al.* (2003), o hidróxido de cálcio (CH) se decompõe quimicamente a temperaturas entre 420 e 520 °C e perde água nesse processo de desidratação.

Nesta pesquisa, a análise foi realizada para avaliar a atividade pozolânica, a partir do teor de hidróxido de cálcio. Produziu-se a pasta de referência (M0) e com 50% de metacaulinita (M1), as quais foram preparadas e analisadas aos 28 dias. Para tanto, as amostras foram colocadas em sacos plásticos vedados no dia da mistura até o dia do ensaio. As amostras foram analisadas com a umidade natural, sem nenhum processo de secagem. No dia da execução do ensaio, as amostras foram moídas em almofariz.

O ensaio procedeu-se no Laboratório de Ensaio Físico-Químicos, da Universidade Federal do Amazonas, utilizando um equipamento modelo SDT Q600 da TA Instrument (Figura 26), operando com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, da temperatura ambiente até 900 °C, em atmosfera de nitrogênio e fluxo 30 ml/min, para este procedimento utilizou-se cadinho de alumina de 90 microlitros, com amostras de aproximadamente 10 mg.



Figura 26: Equipamento de termogravimetria.

Para determinar o teor de hidróxido de cálcio livre ( $CH_L$ ) presente na pasta após a hidratação foi utilizada a equação 1. O teor de água quimicamente combinada é determinado através da equação 2 (BAERT *et al.*, 2008).

$$CH_L = Ca(OH)_2 [\%] = ML_{Ca(OH)_2} [\%] \cdot \frac{MM_{Ca(OH)_2}}{MM_{H_2O}} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$H_2O_{Q.com} = \text{mass}(\text{loss}\%)_{1000^\circ\text{C}} - \text{mass}(\text{loss}\%)_{105^\circ\text{C}} \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

- $CH_L$  = Teor de hidróxido cálcio livre produzido durante a hidratação da pasta;
- $ML_{Ca(OH)_2}$  = Perda de massa em % verificada na curva TG para  $Ca(OH)_2$ ;
- $MM_{Ca(OH)_2}$  = Massa molecular do  $Ca(OH)_2$ ;
- $MM_{H_2O}$  = Massa molecular do  $H_2O$ ;
- $H_2O_{Q.com}$  = Água quimicamente combinada;
- $\text{mass}(\text{loss}\%)_{1000^\circ\text{C}}$  = Perda de massa total entre 0 e  $1000^\circ\text{C}$ ;
- $\text{mass}(\text{loss}\%)_{105^\circ\text{C}}$  = Perda de massa referente à água livre, entre  $35$  e  $105^\circ\text{C}$ .

#### 3.2.3.4 Moldagem de corpos de prova e ensaio de compressão

Para análise mecânica das argamassas foram produzidos corpos de prova cilíndricos com dimensões de  $100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$  (altura x diâmetro), tanto para matriz referência (M0), quanto para matriz com substituição parcial do cimento por metacaulinita (M1). Para

realização da moldagem dos corpos de prova seguiu-se os parâmetros da NBR 7215 (1996). Na Figura 27 apresentam-se os corpos de prova.



Figura 27: Moldagem dos corpos de prova para compressão.

Os corpos de prova foram curados em água até a realização do ensaio de compressão. Para analisar a resistência das argamassas os espécimes foram rompidos aos 28 dias de idade, nos quais se usaram seis amostras moldadas para cada traço. O rompimento dos corpos de prova foi realizado no Instituto Federal do Amazonas (IFAM), utilizando máquina Universal da marca EQUILAM, modelo EQRB 100, com célula de carga de 100 kN, a uma velocidade constante de 0,5 mm/min, até a ruptura do corpo de prova. Na Figura 28 apresenta-se o corpo de prova sendo submetido à carga de compressão axial.



Figura 28: Corpo de prova à compressão.

### 3.2.4 Caracterização do tecido têxtil de algodão

O tecido de algodão foi caracterizado através de ensaios de absorção de água, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), conforme prescrito a seguir.

#### 3.2.4.1 Absorção de água do tecido têxtil

Para determinar a absorção de água do tecido de algodão, amostras com dimensões 10 x 10 cm foram cortadas. Antecedendo o ensaio, as amostras foram secas em estufa a 100 °C até constância de massa, e, em seguida, transferiu-se para um dessecador, as quais foram resfriadas a temperatura ambiente. A massa inicial foi determinada em balança eletrônica analítica da marca SHIMADZU AUY220, com precisão de 0,0001g, no Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LAMAC), (Figura 29 (a)). Posteriormente, as amostras foram imersas em água destilada (Figura, 29 (b)). Procedeu-se a leitura das massas nos intervalos de 5 min, 30 min, 1, 2, 3, 24, 48 e 72 horas do início do teste. Para determinação da massa, retirou-se o excesso de água das amostras com papel absorvente. A capacidade de absorção do tecido foi obtida através da Equação 03:

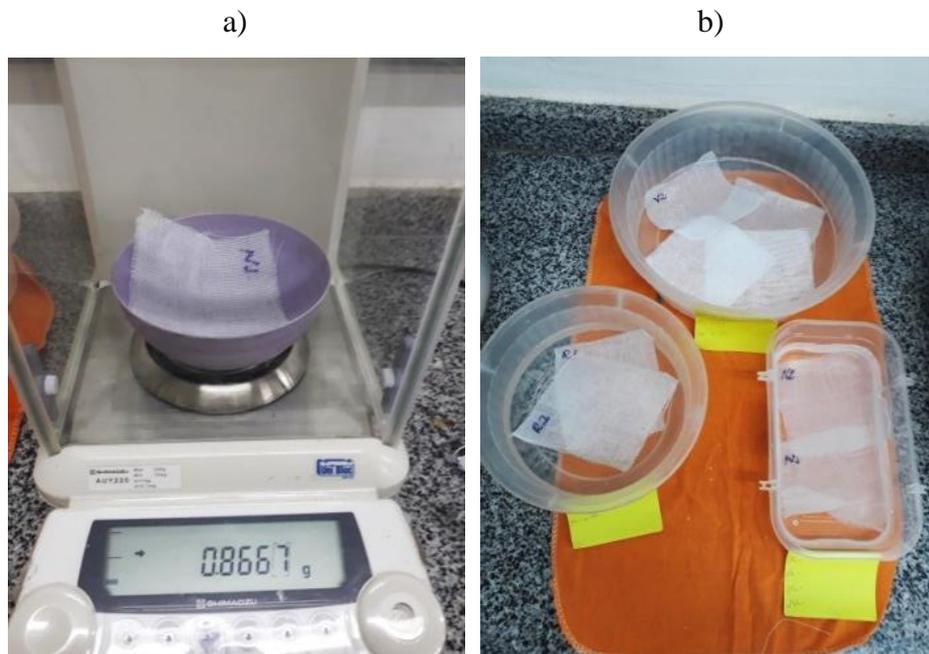


Figura 29: Pesagem inicial da amostra (a); Imersão da amostra em água destilada (b).

$$\text{Abs} = \frac{(M_i - M_f)}{M_f} \times 100 \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

- $M_i$  – peso inicial, em gramas (g);
- $M_f$  – peso após imersão, em gramas (g).

#### 3.2.4.2 Índice de cristalinidade

A celulose é um constituinte indispensável para a resistência da fibra, razão pela qual é importante conhecer sua cristalinidade e assim avaliar seu teor. Para tanto, realizou-se análise de difração de raios-X (DRX), a fim de determinar o índice de cristalinidade da fibra de algodão. Antecedendo o ensaio, fios foram retirados do tecido de algodão, e com uma tesoura foram cortados com aproximadamente 1 mm de comprimento. Em seguida, a amostra foi colocada no porta amostra para executar a análise. As condições utilizadas durante o ensaio foram às mesmas apresentadas anteriormente no item 3.2.2.2.4.

O índice de cristalinidade ( $I_C$ ), foi determinado pelo método empírico desenvolvido por Segal *et al.* (1959), através da equação 4:

$$I_C = \left( 1 - \frac{I_{(am)}}{I_{(002)}} \right) \cdot 100 \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

- $I_C$  é o índice de cristalinidade (%);
- $I_{(am)}$  é a intensidade de difração amorfa ( $2\theta = 18^\circ$  para celulose I e  $2\theta = 16^\circ$  para celulose II);
- $I_{(002)}$  é a intensidade máxima de difração ( $2\theta = 22,7^\circ$  para celulose I e  $2\theta = 21,7^\circ$  para celulose II).

#### 3.2.4.3 Análise termogravimétrica

A análise térmica na fibra foi realizada a fim de verificar o comportamento térmico com relação à variação de temperatura. Para isso, o reforço têxtil foi submetido à análise termogravimétrica (TG), utilizando um equipamento modelo SDT Q600 da Ta Instrument, no Laboratório de Ensaio Físico-Químicos. Primeiramente a amostra foi preparada, conforme o

item anterior (3.2.4.2). Em seguida, colocou-se aproximadamente 10 mg da fibra em cadinho de alumina e procedeu-se o ensaio. O equipamento operou com taxa de aquecimento de 10 °C/min, da temperatura ambiente até 700°C, em atmosfera de nitrogênio e fluxo 30 ml/min.

#### **3.2.4.4 Microscopia eletrônica de varredura**

A análise de microscopia eletrônica de varredura foi uma técnica utilizada com o objetivo de conhecer a morfologia das fibras de algodão, determinar as características dos fios e das fibras que os constituem. Utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura de transmissão da FEI Company, modelo Quanta 250 (Figura 30 (a)), no Laboratório de Técnicas Mineralógicas (UFAM). Antecedendo à análise, retiraram-se fios do tecido de algodão, os quais foram cortados com uma lâmina afiada em aproximadamente 2 mm. Em seguida, os fios foram fixados em um porta amostra denominado de “stub” (Figura 30 (b)) e, por fim levados para o equipamento para análise.

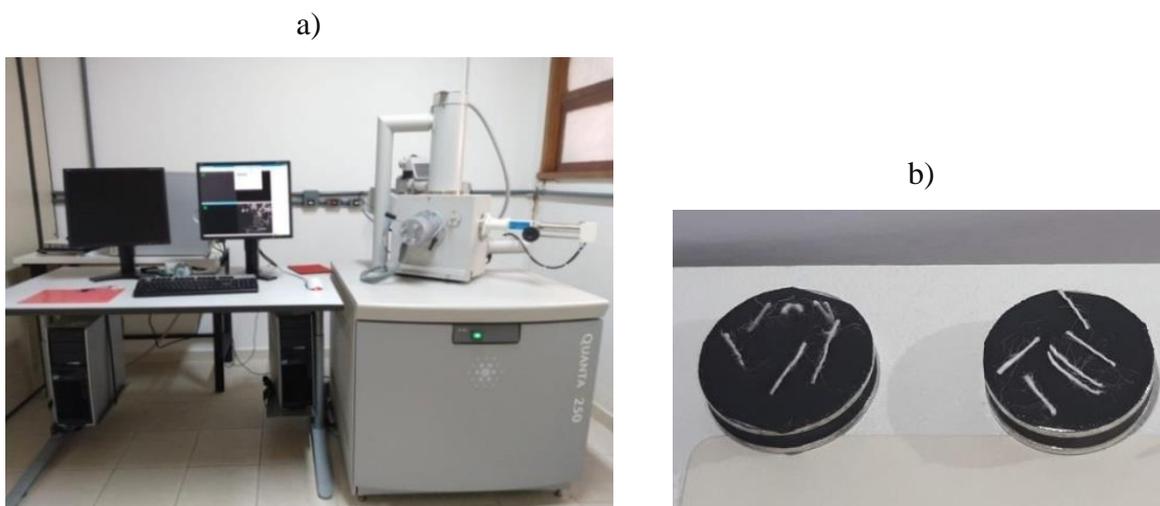


Figura 30: Equipamento para MEV (a); amostras no *stub* (b).

#### **3.2.5 Produção e caracterização dos compósitos têxteis**

Os compósitos foram moldados com teores de 2, 3, 4 e 6%. Na Tabela 5 apresentam-se as abreviações utilizadas para representar os compósitos produzidos.

Tabela 5 – Traço e nomenclatura dos compósitos.

MATRIZES					COMPÓSITOS	
Nome	Traço	CP (%)	MK (%)	SP (%)	Nome	V <sub>f</sub> (%)
M0	1:1:0,4	100	-	0,2	M0C2	2
					M0C3	3
					M0C4	4
M1	1:1:0,4	50	50	0,8	M1C2	2
					M1C3	3
					M1C4	4
					M1C6	6

Na Figura 31 (a) é apresentado o esquema da moldagem dos compósitos com o teor de 2, 3 e 4%. O compósito com fração volumétrica de 6% foi produzido com uma dupla camada de reforço, possuindo 7 camadas de argamassa e 6 camadas de tecido, conforme o esquema apresentado na Figura 31 (b).

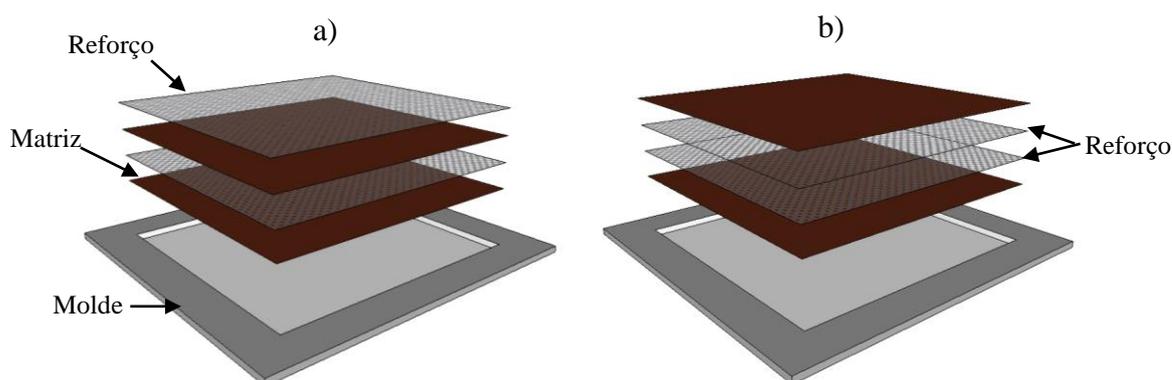


Figura 31: Esquema de moldagem dos compósitos: com 2, 3 e 4% de fibra (a) e com 6% de fibra (b).

A produção dos laminados iniciou-se com a pesagem dos materiais (cimento, metacaulinita, areia, superplastificante e água). Posteriormente, a argamassa foi preparada, de acordo com o item 3.2.3.1. A moldagem se iniciou com a colocação da primeira camada da matriz na fôrma, com dimensões de 400 x 400 x 10 mm (comprimento x largura x espessura) (Figura 32 (a)). Em seguida, colocou-se uma camada de tecido de algodão (Figura 32 (b)). Este processo se repetiu até a distribuição de todas as camadas de algodão. Por fim, colocou-se a última camada de argamassa. Após a moldagem, as placas ficaram em descanso por 24 horas e depois foram desenformadas (Figura 32 (c)).

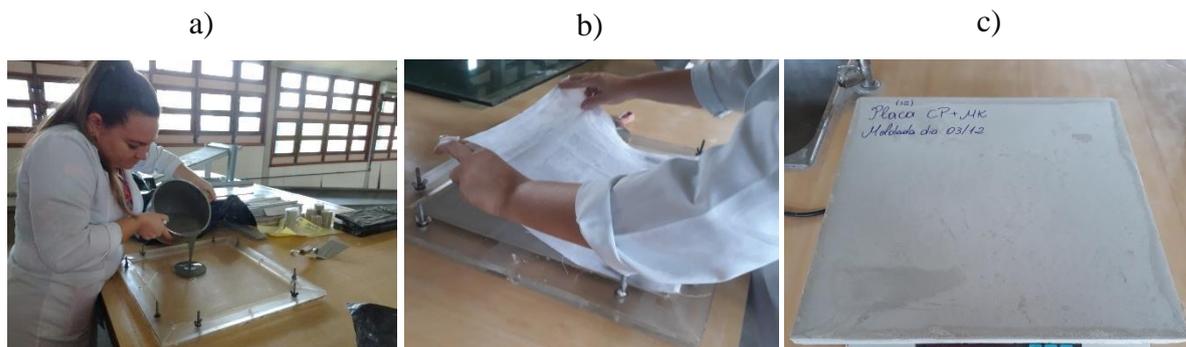


Figura 32: Primeira camada de argamassa (a); colocação do reforço (b); placa após desmoldagem (c).

As placas foram desmoldadas após um período de 24 horas. Em seguida, foram envolvidas por filme plástico, e armazenadas, a fim de evitar perdas de água excessivas, até 48 horas antes da data dos ensaios mecânicos. Antes dos ensaios, as placas foram submetidas ao corte com o auxílio de uma serra portátil, onde foram produzidas amostras para os ensaios físicos e mecânicos (Figura 33 (a)). Por fim, as amostras foram pintadas com tinta acrílica branca (Figura 33 (b)).



Figura 33: Corte das placas (a) e amostras após pintura com tinta branca (b).

### **3.2.5.1 Ensaios mecânicos**

#### **3.2.5.1.1 Flexão em quatro pontos**

As placas produzidas com dimensões de (400 x 400 x 10) mm foram cortadas em peças com dimensões de 60 x 200 x 10 mm (largura x comprimento x espessura) para serem utilizadas no ensaio de flexão. Foram ensaiados de 4 a 6 corpos de prova aos 28 dias de idade, para cada compósito desenvolvido. Os testes de flexão foram realizados seguindo o esquema

apresentado na Figura 34 (a). Foi utilizado a máquina Oswaldo Filizola, modelo AME, com célula de carga de 5 kN, a uma taxa de deslocamento de 0,5 mm/min, no Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LAMAC). Na Figura 34 (b) mostra-se a amostra submetida à flexão.

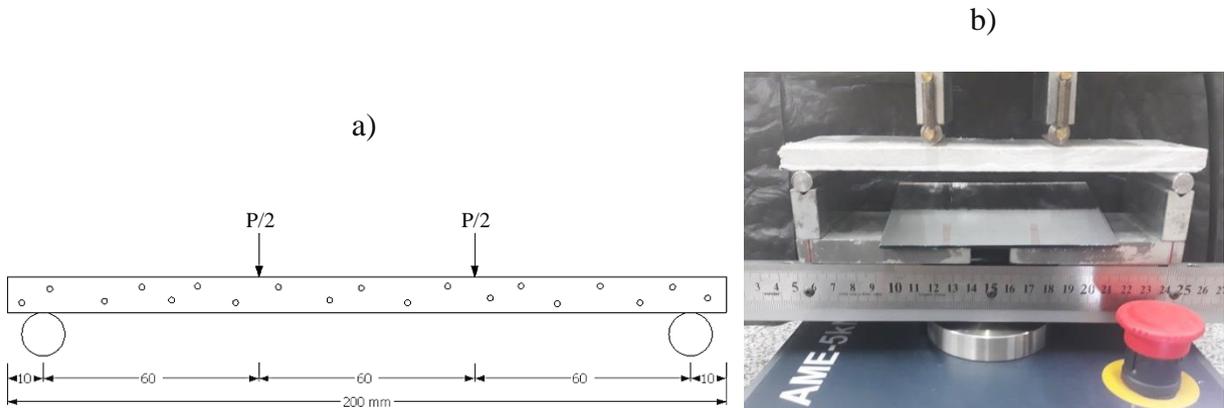


Figura 34: Esquema do ensaio de flexão (a) e amostra sendo submetida à flexão (b).

Os resultados foram expressos em tensão de tração na flexão, de acordo com a equação 5, para o cálculo dessa tensão.

$$\sigma = \frac{6M}{bd^2} \quad \text{Eq. (5)}$$

A tenacidade do material foi calculada pelo método de RILEM (1984). Utilizando-se a área sob a curva do gráfico força x deflexão, até a carga de ruptura e dividindo-se o valor encontrado pela área da seção transversal, conforme a equação 6.

$$T = \frac{A}{bd} \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:  $\sigma$  = tensão de tração na flexão;  $M$  = momento;  $T$  = energia absorvida;  $A$  = área do gráfico força x deflexão;  $b$  = largura da amostra;  $d$  = espessura da amostra.

A tenacidade foi avaliada quanto a capacidade de absorção de energia, correspondente ao deslocamento de primeira fissura ( $T_{1^a \text{ fissura}}$ ), aos deslocamentos de 1 mm ( $T_{1,0}$ ), 2 mm ( $T_{2,0}$ ), 4 mm ( $T_{4,0}$ ) e ao deslocamento referente a ruptura do compósito ( $T_u$ ).

### **3.2.5.1.2 Tração direta**

O ensaio de tração consiste na aplicação de carga de tração em um corpo de prova até a ruptura. Este método foi realizado em amostras dos laminados cimentícios, com dimensões de 40 x 200 x 10 mm (largura x comprimento x espessura), ensaiados aos 28 dias de idade (Figura 35). Os corpos de prova foram retirados da condição de cura 48h antes da execução do ensaio para serem preparadas. Placas de aço com dimensões de 40 x 40 mm foram fixadas nas extremidades das amostras com adesivo epóxi (Sikadur 32), deixando uma distância entre as chapas de 100 mm. Tal como nos teste de flexão, utilizou-se o equipamento Oswaldo Filizola, a uma taxa de deslocamento de 0,5 mm/min. Foram ensaiados de 3 a 5 corpos de prova para cada compósito desenvolvido.

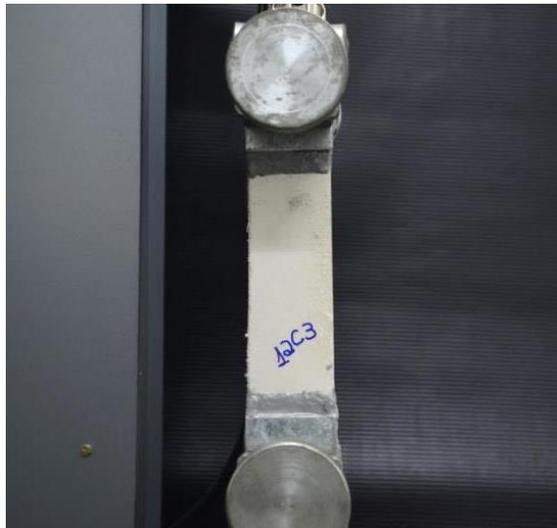


Figura 35: Esquema da amostra submetida à tração.

### ***3.2.5.2 Ensaios físicos nos compósitos têxteis***

Os ensaios físicos de absorção de água e densidade aparente foram realizados nos compósitos têxteis, de acordo as prescrições da ABNT NBR 15498 (2016). Quatro espécimes de 25 cm<sup>2</sup> de cada compósito foram utilizados para execução dos ensaios.

Os ensaios foram realizados simultaneamente. Inicialmente, pesaram-se as amostras em balança de precisão de 0,01 g da marca SOLOTEST, localizada no Laboratório de Pavimentação, para determinar a massa inicial ( $m_i$ ) (Figura 36 (a)). Posteriormente, os corpos de prova foram saturados em água durante 24 h. Após este período, as amostras foram retiradas da água e secas superficialmente com pano úmido. Em seguida, determinou-se a

massa saturada ( $m_u$ ) pela pesagem direta da amostra saturada. Depois disso, aferiu-se a massa imersa ( $m_s$ ) (Figura 36 (b)). Por fim, as amostras foram secas em estufa a uma temperatura de 100 °C durante 24h. A massa final ( $m_f$ ) foi determinada entre duas medidas de massas obtidas no intervalo de 1h.

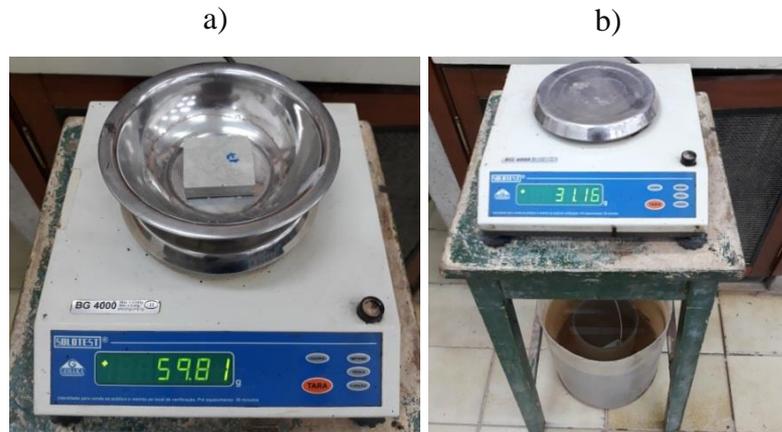


Figura 36: Massa inicial da amostra (a); Pesagem da amostra imersa (b).

A absorção de água foi definida através da equação:

$$\text{abs} = \frac{(m_i - m_f)}{(m_f)} \cdot 100 \quad \text{Eq. (7)}$$

E a densidade aparente foi determinada por meio da fórmula:

$$\rho = \frac{m_f}{V} \quad \text{Eq. (8)}$$

onde:

- $\rho$  = densidade aparente, expressa em gramas por centímetros cúbicos;
- $m_i$  = a massa inicial da amostra, expressa em gramas;
- $m_f$  = massa do corpo de prova após secagem, expressa em gramas;
- $V$  = volume da amostra, expressa em centímetros cúbicos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização dos Materiais da Matriz Cimentícia

A distribuição granulométrica dos materiais constituintes da matriz é apresentada na Figura 37. Em relação ao agregado miúdo, apresentou dimensão máxima característica de 2,40 mm. Percebe-se que as partículas da metacaulinita são menores que os grãos do cimento, ou seja, a argila calcinada é mais fina. Segundo Marques (2017), para melhorar os efeitos físicos e, conseqüentemente proporcionar maior reatividade pozolânica, a metacaulinita deve apresentar partículas inferiores das do cimento, assim a argila calcinada atuará como *filler* aumentando a densificação da matriz, preenchendo os vazios (SAHMARAN *et al.*, 2006; MELO FILHO, 2012).

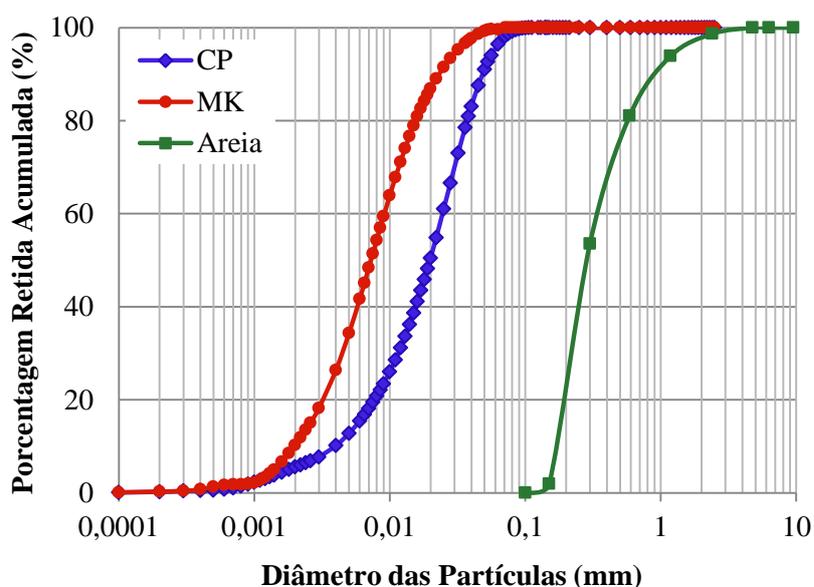


Figura 37: Curva granulométrica da areia, do cimento e da metacaulinita.

Na Tabela 6 apresenta-se os diâmetros referentes à análise de 10% da quantidade total passante ( $D_{10}$ ), seguido pelos quantitativos referente a 50% ( $D_{50}$ ) e a 90% ( $D_{90}$ ) do material, e a proporção média de finura ( $D_{média}$ ).

Tabela 6 – Diâmetros referentes a 10%, 50%, 90% do material passante e diâmetro médio.

Amostras	$D_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{90}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{média}$ ( $\mu\text{m}$ )
CP	3,9	19,8	48,4	23
MK	1,9	7,3	23,1	10,4

Diante das curvas granulométricas e dos valores da Tabela 7, é possível observar que a metacaulinita apresentou valores de  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{90}$  cerca de 55 % inferior as partículas do cimento.

Tabela 7 – Características físicas da areia.

Ensaio	Unidade	Resultado	Limites Máximos
Módulo de finura	-	1,71	-
Teor de argila em torrões	%	0,115	3,0
Material pulverulento	%	0,195	5,0
Impurezas orgânicas	-	Mais clara	-
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	2,63	-

De acordo com o ensaio de impureza orgânica na amostra de areia é aferido que a mesma encontra-se dentro do limite estabelecido, cuja a areia obteve uma cor mais clara que a mistura padrão estabelecida pela NM 49 (2001).

A composição química é especificada na Tabela 8 e sintetizada nos difratogramas apresentados nas Figuras 38 e 39.

Tabela 8 – Fluorescência de raios-X do cimento, caulim e metacaulinita.

Elementos	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ti	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	CaO
CP (%)	5,11	18,44	0,58	0,46	0,25	3,47	2,06	3,71	64,99
Caulim (%)	43,04	55,15	0,42	0,26	0,37	0,58	-	-	0,09
MK (%)	41,19	55,86	0,78	0,24	0,49	0,97	-	-	0,19

Observa-se que o caulim e metacaulinita são constituídos basicamente por óxido de alumínio ou alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e dióxido de silício ou quartzo (SiO<sub>2</sub>), somados totalizam cerca de 97% da composição da metacaulinita e 98% da composição do caulim. Esses componentes são responsáveis pelo desenvolvimento da resistência da matriz (PORTELA, 2016). Nota-se que não houve alteração significativa na composição química devido ao processo de calcinação do caulim, e que o teor de SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é superior a 70%, atendendo às prescrições da ASTM C618 e da NBR 12653 (ASTM, 2008; NBR 12653, 2015).

O cimento *Portland* apresentou como elemento predominante o óxido de cálcio (CaO), aproximadamente 65% de sua composição. De acordo com a norma NBR 16697 (2018), o cimento *Portland* composto deve apresentar o trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) igual ou menor que 4,5%. No difratograma do cimento observa-se que o elemento cristalino

predominante foi a alita, em seguida a larnita, que são elementos típicos do cimento *Portland* (ROSSA Jr. & PORTELLA, 2012).

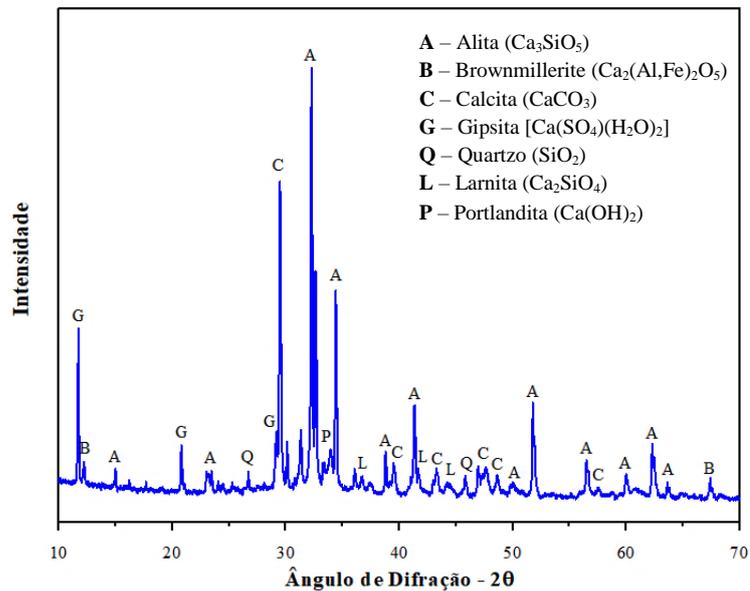


Figura 38: Difratoograma do cimento CP II E-32.

A difração de raios-X do caulim apresentou picos característicos do argilomineral, possuindo como constituinte principal a caulinita e como constituinte secundário, o quartzo (BRITO *et al.*, 2018). A metacaulinita teve total rompimento da estrutura cristalina da caulinita, devido à desidroxilação, ficando somente os picos relacionados ao quartzo (BARATA & DAL MOLIN, 2002; PAZ *et al.*, 2010; LIMA *et al.*, 2016). A calcinação proporcionou um maior amorfismo a metacaulinita, o que pode condicionar em uma maior reatividade.

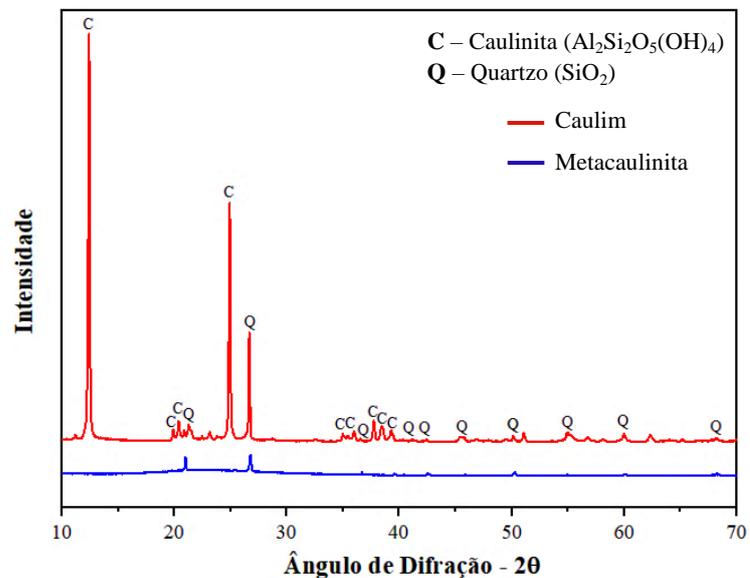


Figura 39: Difratoograma do caulim e da metacaulinita.

## 4.2 Caracterização da Matriz Cimentícia

### 4.2.1 Matriz em estado fresco

O resultado de consistência da matriz com substituição é apresentado na Figura 40.

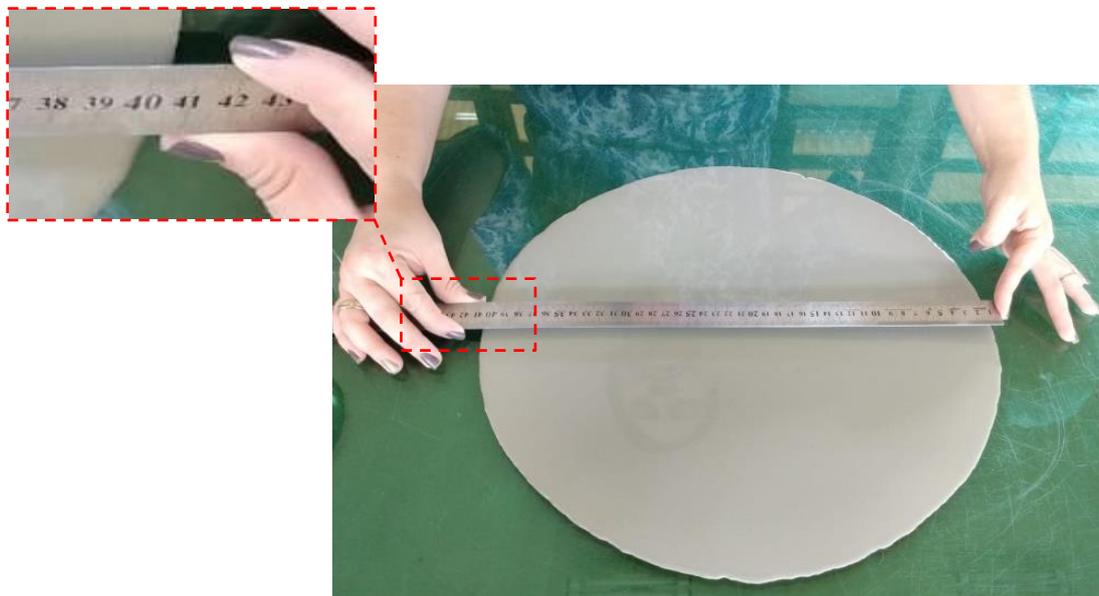


Figura 40: Medida do diâmetro do espalhamento.

Os espalhamentos da matriz com teor de 0,8 e 1% de aditivo foram semelhantes. No entanto, a dosagem que utilizava proporção de 1% de superplastificante apresentou segregação do material. Portanto, optou-se por utilizar o teor de 0,8%, o qual atingiu um espalhamento de 408 mm, bordas uniformes, sem exsudação e segregação. Na Figura 41 apresenta-se o gráfico do ponto de saturação do superplastificante. O teor ótimo de superplastificante foi definido com base nos resultados de consistência, sendo este de 0,8%.

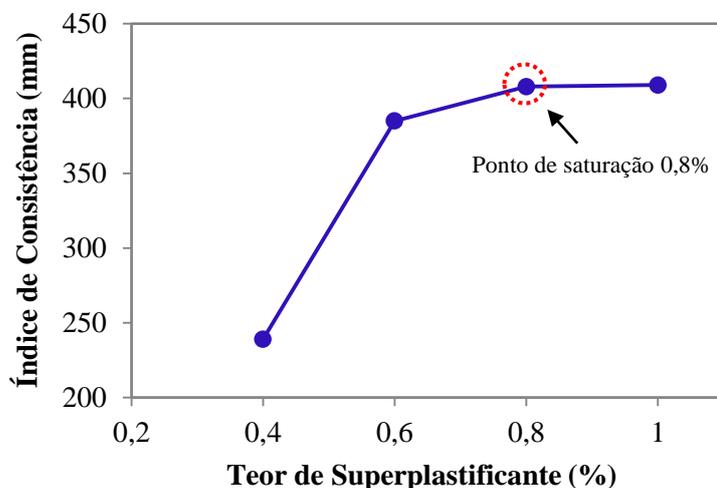


Figura 41: Gráfico do ponto de saturação do superplastificante para matriz M1.

## 4.2.2 Matriz em estado endurecido

### 4.2.2.1 Análise Térmica da Pasta

A identificação das fases de decomposição das pastas cimentícias, foi determinada utilizando as temperaturas de pico das curvas de termogravimetria derivada (DTG). Os picos típicos destas curvas são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Faixa de temperatura em uma matriz de cimento.

Compostos	Abreviação	Temperatura de Pico (°C)
Etringita	fase AFt	76-84
Silicato de cálcio hidratado	C-S-H	104-140
Hidrato de silicato de alumínio de cálcio	CASH	157-163
Hidrato de aluminato de cálcio	CAH	230-240
Portlandita	CH ou Ca(OH) <sub>2</sub>	425-465
Calcita	CC	620-645

Fonte: Taylor, 1997; Chaipanich & Nochaiya, 2010.

Norteando-se por essas fases de decomposição, a interpretação da TG/DTG foi realizada, onde foram identificadas seis transições de perda de massa. Que foram divididas em 3 transições principais, conforme apresentada na Figura 42.

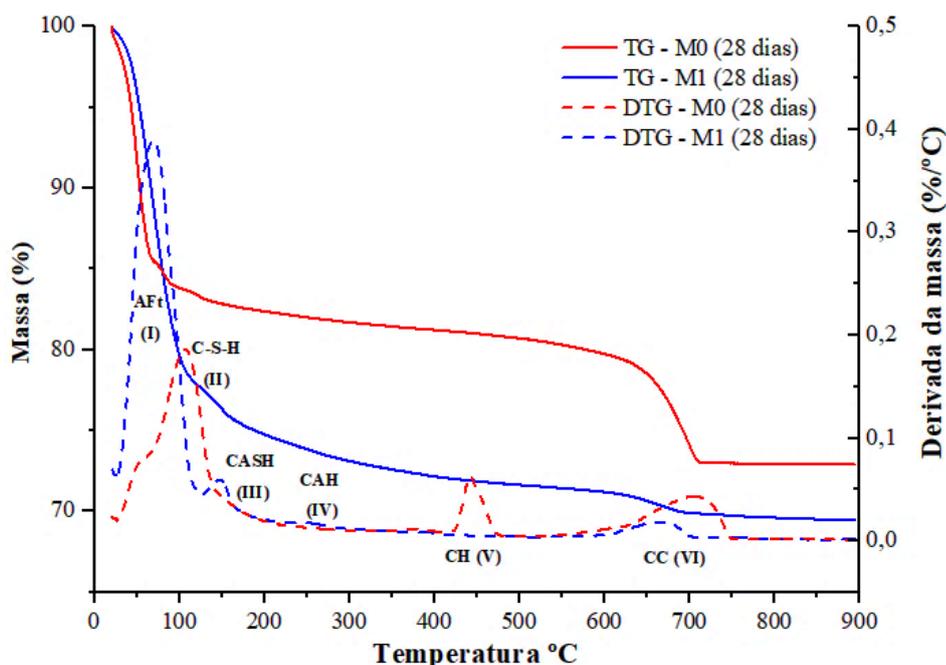


Figura 42: Curva de TG e DTG das matrizes M0 e M1 aos 28 dias.

A primeira ocorreu entre 28 °C e 300 °C, correspondente à perda de massa em relação à água adsorvida e quimicamente combinada, possuindo as fases etringita, silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (AFt, C-S-H, CASH, CAH) (ROCHA *et al.*, 2013; MARQUES, 2017). Neves & Melo Filho (2018) encontraram uma transição semelhante, que ocorreu de 25° a 300 °C.

A segunda transição ocorre entre 400 °C a 477 °C, com pico máximo a 442 °C, característico da desidroxilação do hidróxido (CH), apresentado na pasta referência (M0). Na curva de DTG da matriz M1 não apresentou desidroxilação do (Ca(OH)<sub>2</sub>). Este comportamento indica que a substituição parcial do cimento *Portland* por 50% de metacaulinita garantiu o consumo total da Portlandita, permitindo a obtenção de uma matriz isenta de hidróxido de cálcio. A terceira transição ocorreu entre 596 °C a 748 °C, a perda de massa refere-se à decomposição do carbonato de cálcio (CC) (DWECK *et al.*, 2013; MELO FILHO *et al.*, 2013; FIDELIS, 2014; NEVES & MELO FILHO, 2018).

Na Tabela 10 são apresentados os consumos em porcentagens referente à água quimicamente combinada com AFt, C-S-H, CASH e CAH, os teores de hidróxido de cálcio (CH) e do carbonato de cálcio (CC), referente à pasta de referência (M0) e com a substituição pozolânica (M1). Além disso, são apresentados os resultados de algumas pesquisas que também utilizaram metacaulinita como substituição parcial do cimento *Portland* em 50%.

Tabela 10 – Teor de água quimicamente combinada, CH e CC.

Transições aos 28 dias	Pastas	
	M0	M1
Água quimicamente combinada com AFt, C-S-H, CASH, CAH (%)	16,41	26,34
CH (%)	1,41	0
CC (%)	7,15	1,27

Em relação à água quimicamente combinada com etringita, C-S-H, CASH e CAH, a matriz M1 apresentou teor maior que a pasta de referência (M0), cerca de 60%. Esse fator, pode-se dizer que é devido à formação de compostos hidratados devido à atividade pozolânica, onde parte da Portlandita produzida reagiu com a metacaulinita e a água formando C-S-H, CASH e CAH (KRAJCI *et al.*, 2015; HOPPE FILHO *et al.*, 2017). Verifica-se, o consumo total do hidróxido de cálcio com o teor de 50% de adição mineral em

relação à pasta sem adição. A isenção do CH presente na matriz auxiliará na integridade do tecido de algodão, evitando a mineralização da fibra, por meio dos produtos de hidratação do cimento. Quanto à calcita (CC), verificou-se uma redução de 82,24% para a pasta modificada por pozolana em relação à pasta a base de cimento, este fator é decorrência da decarbonatação da calcita ocorrida durante o aquecimento da amostra.

#### 4.2.2.2 Compressão axial

Na Figura 43, são apresentados os dados obtidos dos ensaios de resistência à compressão, com o respectivo valor de desvio padrão, para tempo de cura de 28 dias, realizados na matriz referência (M0) e com substituição por metacaulinita (M1).

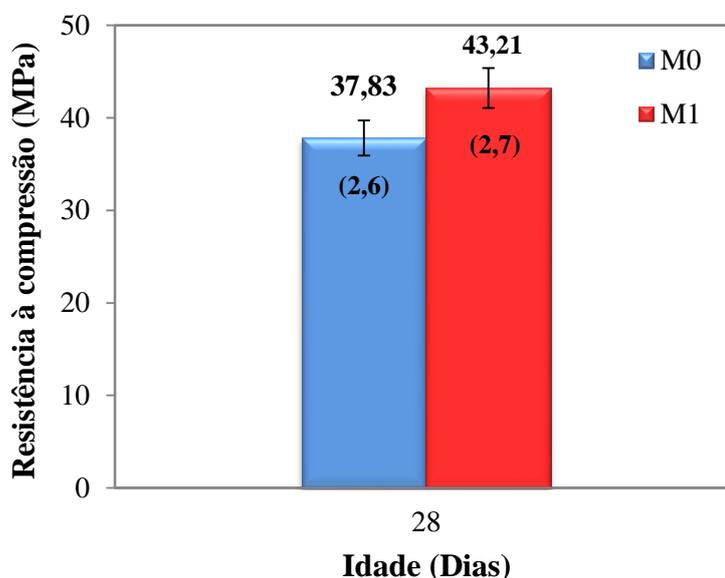


Figura 43: Valores médios de resistência à compressão.

Observa-se que o uso da metacaulinita provocou o incremento no valor médio da resistência em 14,22%, se comparada com a argamassa sem substituição. Este acréscimo de resistência é resultado da formação de mais produtos de hidratação devido às reações pozolânicas. Na Figura 44 é apresentado o modo de fratura dos corpos de prova.



Figura 44: Modo de fratura dos corpos de prova submetidos à compressão.

### 4.3 Caracterização do Tecido Têxtil de Algodão

#### 4.3.1 Absorção de água

Na Figura 45 é apresentada a curva de ganho de massa do tecido de algodão, esta é resultado da média das amostras ensaiadas. Observa-se que nas primeiras 3 horas o tecido absorveu 125% de água. Às 72 horas de imersão, nota-se que a absorção de água praticamente dobrou, chegando a mais de 200%.

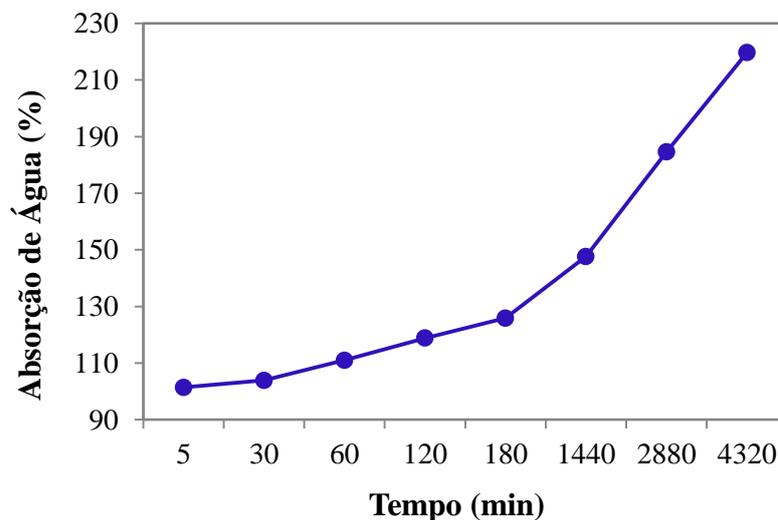


Figura 45: Absorção de água do tecido de algodão.

A alta capacidade de absorção do tecido têxtil de algodão é uma característica ocasionada pelo processo de mercerização. Esse tratamento é realizado sob tensão e a frio, com uma solução concentrada de Hidróxido de Sódio (NaOH), gerando variações das

estruturas interna das fibras, onde as estruturas cristalinas se modificam devido ao intumescimento e encolhimento no comprimento, proporcionando melhor afinidade do corante as fibras. Resultando assim, em um tecido com mais brilho, maciez e hidrofílico (MORAIS, 2010). Tal que o algodão cru possui uma série de depósitos de graxas e outras substâncias, tornando a absorção de água lenta.

### 4.3.2 Índice de cristalinidade

O índice de cristalinidade da fibra de algodão foi determinado pela relação entre a intensidade máxima e mínima, através da equação 04. Na Figura 46 apresenta-se o difratograma da fibra.

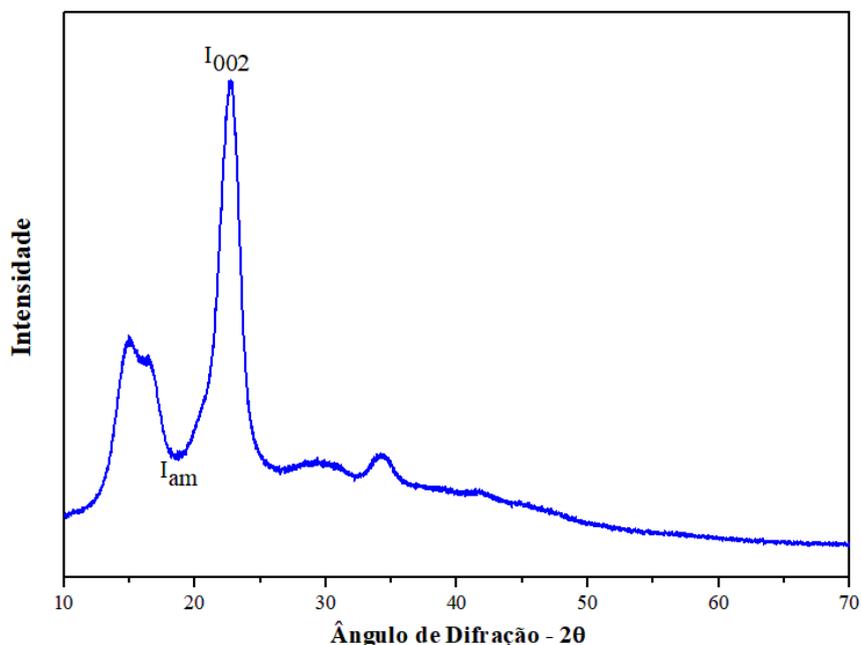


Figura 46: Difratograma do tecido de algodão.

O índice de cristalinidade obtido para a fibra de algodão foi de 75%, como pode ser observado na Tabela 11. De acordo com Werber (2018), quanto maior este índice, melhor será o desempenho mecânico das fibras. Sonesso (2011); Grishanov (2011) descrevem as fibras de algodão como parcialmente cristalina e parcialmente amorfa, apresentando um grau de cristalinidade entre 70 e 80%. Portanto, observa-se que o índice de cristalinidade encontra-se próximo aos descritos pela literatura.

Tabela 11 – Índice de cristalinidade pelo método de Segal.

Fibra de Algodão	I <sub>am</sub>	I <sub>002</sub>	I <sub>C</sub> (%)
	6023	24091	75

### 4.3.3 Análise termogravimétrica

A estabilidade térmica da fibra de algodão pode ser verificada através das curvas TG/DTG como apresentada na Figura 47.

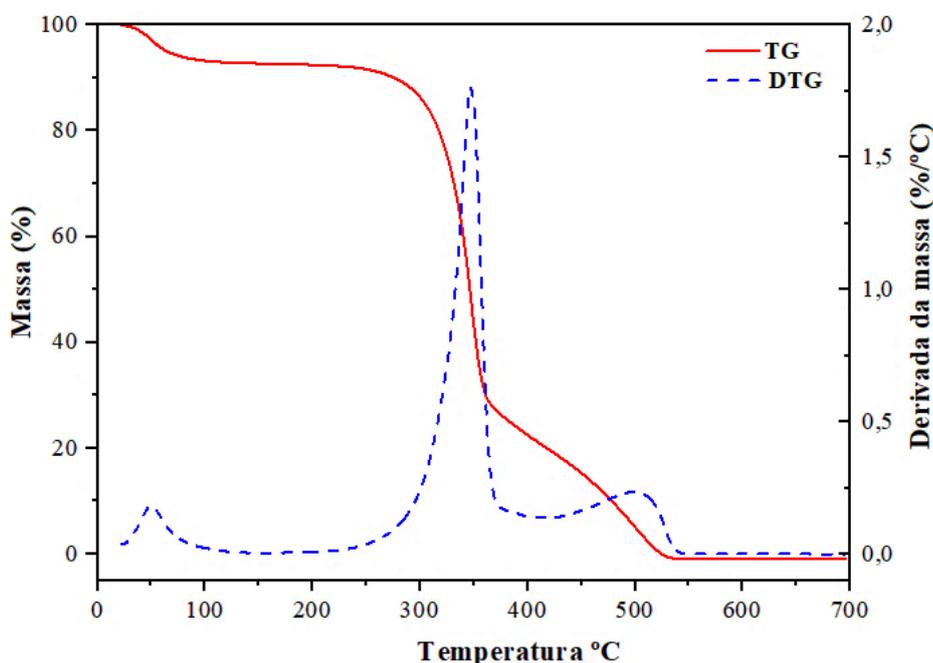


Figura 47: Curva de TG e DTG da fibra de algodão.

A fibra de algodão apresentou três estágios diferentes. Inicialmente, acontece uma diminuição de massa referente à perda de umidade (DOBRICAU *et al.*, 2009), entre 22 °C a 100 °C. Posteriormente, começa a segunda perda de massa, relacionado à decomposição térmica da celulose (BAJWA *et al.*, 2011), processo este que ocorre entre 220 °C e 375 °C, refletindo em um pico estreito e definido na curva DTG, com máxima degradação em 353 °C. O terceiro estágio foi manifestado acima de 400 °C, o qual está relacionado à degradação de resíduos carbonáceos (BRANCATELLI *et al.*, 2011; TEIXEIRA *et al.*, 2010). De acordo com Esmeraldo (2006), os resíduos carbonáceos, em atmosfera inerte, tratam-se dos produtos finais de degradação da celulose (cinza), que são justificados pela necessidade intrínseca de nutrientes que as fibras vegetais precisem para o seu crescimento e desenvolvimento. A decomposição térmica total da fibra ocorreu a 600 °C.

#### 4.3.4 Análise morfológica

Na micrografia pode-se observar que os fios do tecido são formados por uma rotação grosseira dos filamentos de fibras de algodão (Figura 48 (a)). Analisando a seção transversal das fibras (Figura 48 (b)), nota-se a presença de fibras maduras e imaturas. Nos pontos indicados pelo número 2, nota-se um achatamento da fibra, este processo é resultado de uma fibra imatura, nesta há pouco depósito de celulose, resultando no achatamento do lúmen e, conseqüentemente causa a redução do diâmetro, apresentando a forma de uma fita. Inversamente, quando a fibra está madura há uma maior quantidade de celulose interna, da ordem de 5  $\mu\text{m}$  de espessura, proporcionando as fibras uma forma elíptica a circular (BACHELIER & GOURLOT, 2018), sendo indicada na figura pelo número 1.

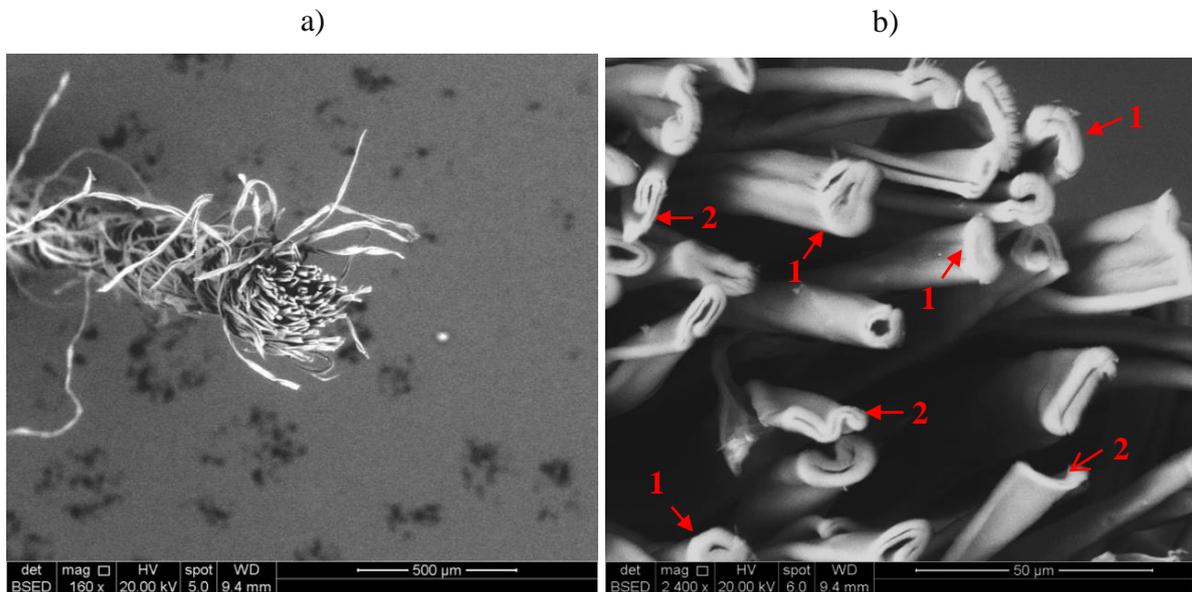


Figura 48: Micrografia do fio de algodão (a); seção transversal da fibra (b).

Na Figura 49 (a) apresenta-se a seção longitudinal do fio de algodão, através da análise microscópica pode-se distinguir o esquema de fiação utilizado para confecção do cordão utilizado nesta pesquisa, trata-se de uma fiação a rotor, processo que possui pouca torção interior e muita no exterior (BANGE *et al.*, 2009).

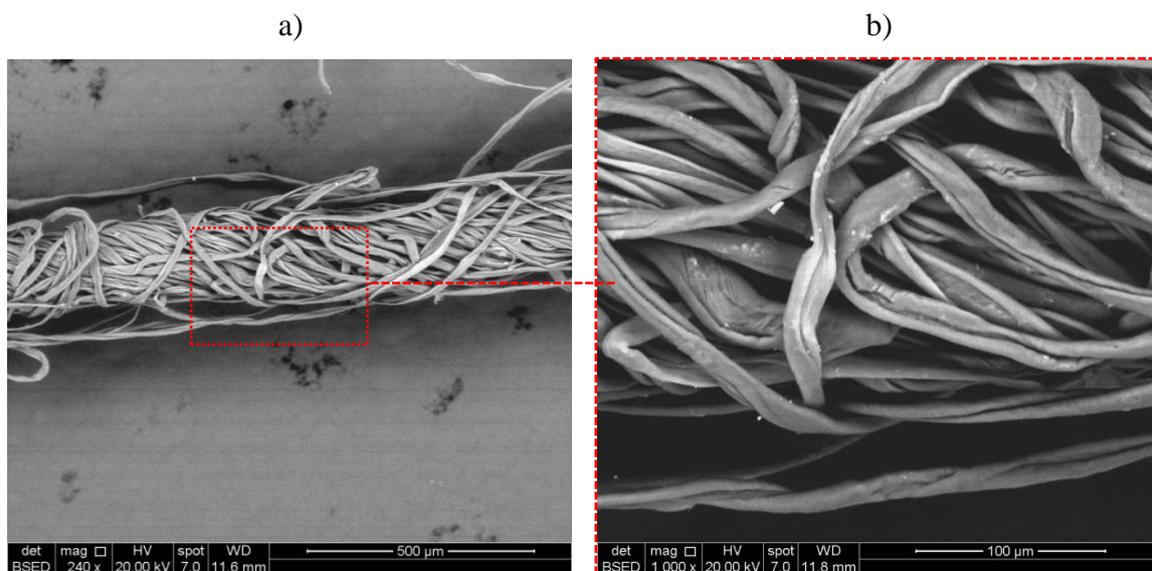


Figura 49: Micrografia da seção longitudinal do fio de algodão (a); ampliação da seção longitudinal do fio (b).

Na Figura 49 (b) percebe-se que as fibras apresentam um formato de tubo achatado com certo número de torções dos filamentos a intervalos irregulares, este aspecto é característico das fibras de algodão. Essas reviravoltas são chamadas de convoluções, existem cerca de 60 circunvoluções por centímetro. Esse aspecto concede ao algodão uma superfície de fibra irregular, o que aumenta a fricção entre a fibra e permite que os fios finos sejam fiados (DOCHIA *et al.*, 2012).

#### 4.4 Caracterização dos Compósitos Têxteis

As curvas apresentadas nesta seção correspondem àquelas consideradas de comportamento típico. Os mecanismos de fissuração dos compósitos quando submetidos aos ensaios de tração direta e flexão em quatro pontos são discutidos.

##### 4.4.1 Flexão em quatro pontos

As argamassas sem fibra (M0 e M1) são caracterizadas pelo comportamento frágil, apresentando uma única fissura, pois ocorre o rompimento deste material nesse momento, como observa-se na Figura 50. No entanto, é incontestável a contribuição da matriz na região elástica até o aparecimento da primeira fissura, após isto, ocorrem às transferências de tensões da matriz para o reforço, dando ao compósito a capacidade de suportar cargas e se deformar antes da ruptura (LIMA *et al.*, 2019).

Ao analisar a substituição parcial de cimento por metacaulinita em 50%, tem-se que os valores médios de tensão máxima aos 28 dias proporcionou um leve aumento na resistência da matriz M1. Sendo este acréscimo de tensão de 6,11%.

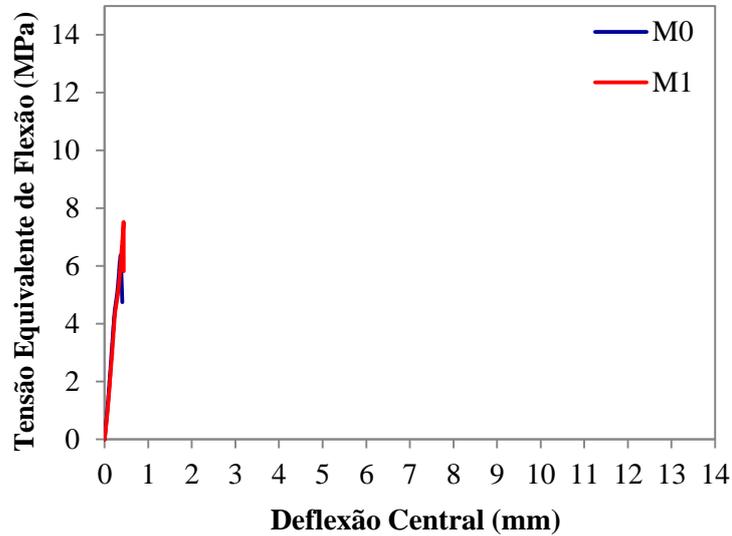


Figura 50: Curva tensão x deflexão central das matrizes M0 e M1.

A utilização do reforço têxtil provocou aumento nos valores de tensão máxima, modificando o comportamento frágil da matriz cimentícia, tanto nos compósitos produzidos a partir da matriz M0, quanto dos produzidos a partir da matriz M1. Na Figura 51 apresentam-se as curvas tensão x deflexão dos compósitos sem adição de metacaulinita (M0).

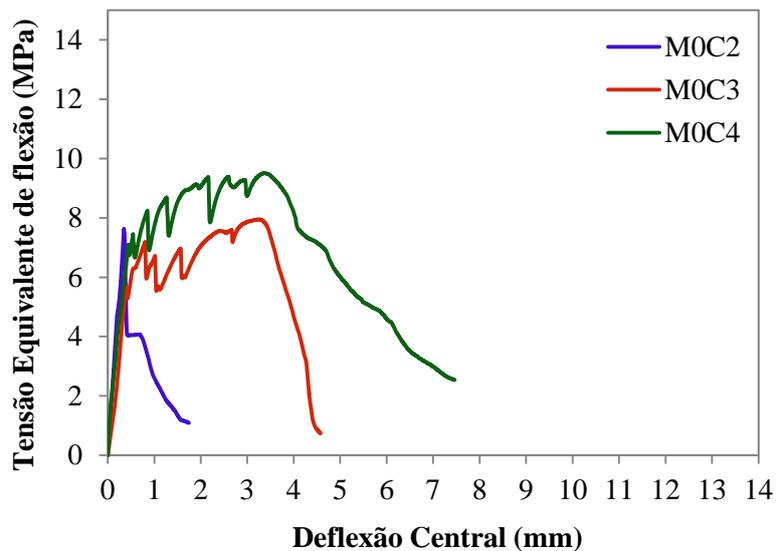


Figura 51: Curva tensão x deflexão dos compósitos têxteis a partir da matriz M0.

A partir das curvas, nota-se que o compósito reforçado com 4 camadas de têxtil apresentou uma curva típica do comportamento denominado “amolecimento de tensão”, em inglês, conhecido como *strain softening*, caracterizado pela formação de uma única fissura, apresentando perda de resistência até a ruptura na pós-fissuração. A deformação máxima nesses compósitos é usualmente atingida quando as fibras são arrancadas da matriz (KABELE & KANAKUBO, 2007; LIMA *et al.*, 2013).

Em relação ao comportamento dos compósitos reforçados com 3 e 4% de fibra, observou-se que estes suportaram maior quantidade de carga e tiveram maior deformação. A tensão continuou subindo mesmo após o aparecimento da primeira fissura, este aumento chegou a 23,64%, apresentando um incremento de tensão máxima de 35,32% em relação à matriz (M0). Além disso, ambos os compósitos apresentaram comportamento com múltiplas fissuras.

Os compósitos produzidos a partir da matriz M1 reforçados com o tecido têxtil apresentaram um comportamento denominado como endurecimento na flexão (*deflection hardening*), este comportamento é caracterizado pelo aumento da tensão após o surgimento da primeira fissura, apresentando múltipla fissuração no material, com maior resistência e ductilidade (SILVA *et al.*, 2010; WILLE *et al.*, 2014). Como é possível observar na Figura 52, os compósitos suportaram maiores cargas e tiveram maior deformação, se comparados com os compósitos produzidos a partir da matriz M0. A rigidez dos compósitos também aumentou conforme a crescente adição das fibras. À medida que aumentou o teor de fibras, houve elevação na quantidade de formação de fissuras.

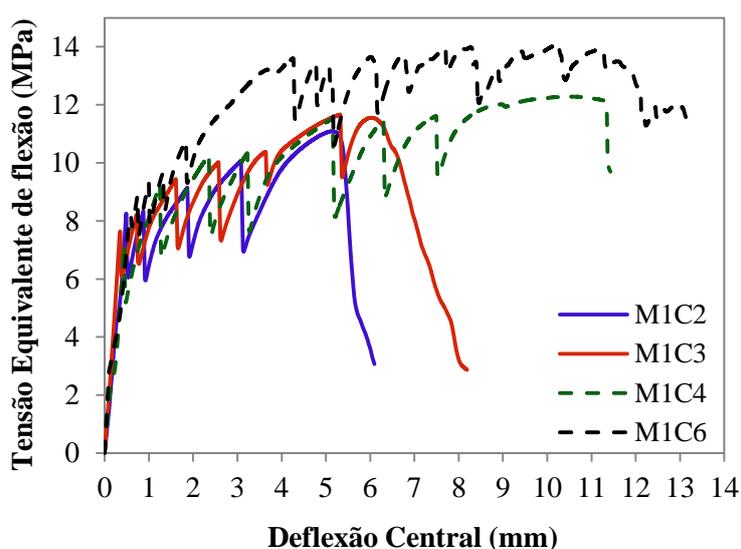


Figura 52: Curva tensão x deflexão dos compósitos têxteis produzidos a partir de M1.

Com base nos diagramas de tensão equivalente x deflexão central foram avaliados dois valores de resistência dos compósitos têxteis, o primeiro denominado de tensão de primeira fissura ( $\sigma_{1f}$ ). Após o surgimento da primeira fissura o comportamento do compósito têxtil foi caracterizado por múltiplas fissuras até atingir a máxima tensão pós-fissuração, denominado como tensão última ( $\sigma_u$ ). Na Tabela 6.1 são apresentados os valores médios das propriedades mecânicas dos compósitos.

Observa-se que após a tensão de primeira fissura dos compósitos reforçados houve um acréscimo médio até atingir a tensão última. Este aumento chegou a 70%, à medida que ocorrem as fissurações no compósito, ocorre este acréscimo, caracterizado pelo reforço têxtil.

Tabela 12 – Valores médios das propriedades mecânicas submetidas à flexão.

<b>Matriz</b>	<b>Fibra</b>	<b><math>\sigma_{1f}</math> (MPa)</b>	<b><math>d_{1f}</math> (mm)</b>	<b><math>\sigma_u</math> (MPa)</b>
M0	Sem fibra	-	-	6,88 (0,78)
	2%	-	-	7,82 (1,20)
	3%	6,86 (0,94)	0,46 (0,04)	8,0 (0,55)
	4%	7,53 (0,88)	0,53 (0,07)	9,31 (1,11)
M1	Sem fibra	-	-	7,30 (0,57)
	2%	8,68 (1,10)	0,50 (0,05)	11,09 (0,78)
	3%	7,71 (0,72)	0,35 (0,02)	11,55 (0,52)
	4%	8,45 (1,23)	0,43 (0,01)	11,66 (0,47)
	6%	9,09 (0,81)	0,43 (0,10)	15,44 (1,25)

Comparando os valores de  $\sigma_{1f}$  com as pesquisas de outros autores, aos 28 dias de idade, tem-se 6,60 MPa para Melo Filho (2012), o pesquisador utilizou um teor de 6% em seu compósito reforçado com fibras de sisal. Oliveira (2013) produziu compósitos com reforço de malva e juta, com fração volumétrica de 8%, os quais apresentaram tensão de primeira fissura de 7,96 MPa e 4,11 MPa, respectivamente.

Em relação à tensão máxima ( $\sigma_u$ ), Arruda Filho (2015) produziu laminados cimentícios reforçados tecido estrutural de sisal, nos teores de 3, 4, 6, 9 e 10%. Quando

submetidos a flexão a quatro pontos esses atingiram tensão máxima de 9,96 MPa; 8,26 MPa; 14,38 MPa; 25,91 MPa e 18,28 MPa, respectivamente. Observando a Tabela 12, nota-se que os valores médios encontrados nesta pesquisa, foram semelhantes e superiores aos trabalhos citados anteriormente com o mesmo teor de fibra.

Nota-se que a utilização do reforço têxtil provocou aumento nos valores de tensão máxima, modificando o comportamento frágil da matriz cimentícia. Para as amostras reforçadas, o incremento da tensão máxima corresponde a 111,51%, se compararmos a matriz sem fibra (M1) com o compósito M1C6 e de 124,41%, em relação à matriz a base de cimento sem fibra (M0).

Quanto à influência do têxtil nos compósitos produzidos a partir da matriz M0, os laminados 2% de fibra apresentaram um acréscimo de tensão média máxima de 13,66%. Os espécimes com teor de 3% apresentaram tensão máxima com um aumento de 16,28%, e no compósito com 4% de tecido este incremento foi de 35,32%.

Analisando a substituição parcial do cimento por metacaulinita em 50%, nota-se um incremento nos valores médios de tensão última, quando comparados com o mesmo teor de adição de fibra dos compósitos sem metacaulinita. A sua utilização apresentou um acréscimo na resistência de todos os compósitos. Nos laminados 2% de tecido este aumento de tensão última é de 41,82%. O incremento nos espécimes de M1C3 foi de 44,38% e nas amostras de M1C4 este acréscimo é de 25,24%. Devido o aumento de tensões dos compósitos produzidos a partir da matriz M0 não ser tão significativo, optou-se por comparar os compósitos M0C4 e M1C6, tendo assim, um aumento de 65,84% na resistência máxima.

A tenacidade está relacionada à capacidade de absorção de energia dos compósitos, principalmente na região pós-fissuração onde a atuação das fibras é predominante. Os resultados encontram-se na Tabela 13, os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Tabela 13 – Resultados da tenacidade à flexão de quatro pontos.

Amostras	Tenacidade (kJ/m <sup>2</sup> )				
	T <sub>1<sup>a</sup> fissura</sub>	T <sub>1,0</sub>	T <sub>2,0</sub>	T <sub>4,0</sub>	T <sub>u</sub>
M0	0,087 (0,02)	-	-	-	-
M0C2	0,12 (0,03)	-	-	-	-
M0C3	0,11 (0,02)	0,31 (0,02)	0,69 (0,11)	1,08 (0,63)	1,27 (0,41)
M0C4	0,070 (0,04)	0,34 (0,02)	0,81 (0,08)	1,68 (0,29)	2,76 (1,37)
M1	0,090 (0,007)	-	-	-	-
M1C2	0,124 (0,02)	0,320 (0,02)	0,795 (0,05)	1,689 (0,23)	3,48 (0,28)
M1C3	0,096 (0,004)	0,339 (0,02)	0,822 (0,04)	1,899 (0,09)	4,723 (0,70)
M1C4	0,094 (0,02)	0,301 (0,03)	0,749 (0,04)	1,727 (0,08)	5,412 (0,49)
M1C6	0,124 (0,02)	0,422 (0,03)	1,032 (0,10)	2,524 (0,22)	7,279 (2,34)

Na Figura 53 estão sintetizados os resultados da tenacidade. Através da análise desses dados inferiu-se que ao deslocamento de primeira fissura, não houve aumento significativo de tenacidade, assim como no deslocamento de 1 mm, no qual os valores foram aproximados. Quanto ao deslocamento correspondente à ruptura do compósito e comparando-se os compósitos com o teor de 4 e 6%, a tenacidade para o compósito M1C6 foi 34,49% superior que o M1C4.

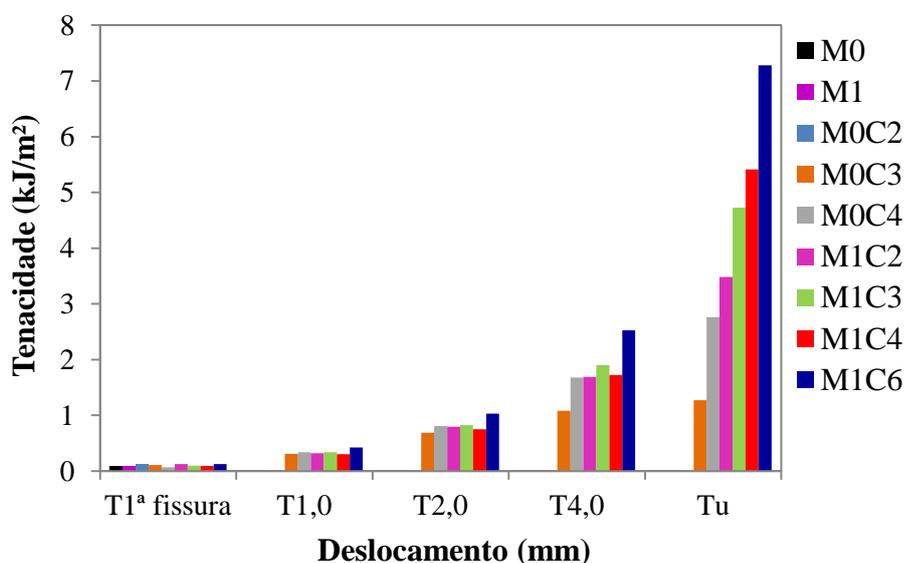


Figura 53: Tenacidades à flexão para os compósitos.

Diversos autores avaliaram a absorção de energia de compósitos cimentícios submetidos à flexão de quatro pontos. Oliveira (2013) produziu laminados cimentícios reforçado com 8% de fibra de malva, o qual apresentou valores de tenacidade referente à ruptura de 6,57 kJ/m<sup>2</sup>. Cavalcante (2017) desenvolveu placas cimentícias reforçadas com duas camadas de tecido de juta e malva, no qual o compósito absorveu 2,19 kJ/m<sup>2</sup> de energia.

Nas Figuras 54 e 55 apresentam-se o modo de fratura dos compósitos têxteis, sem e com metacaulinita, respectivamente. As fissuras foram identificadas e ressaltadas para melhor visualização. O modo de ruptura das amostras aconteceu pela abertura e alargamento de uma única fissura, com exceção das amostras do compósito M1C6, as quais não foram submetidas à carga máxima de flexão, devido à programação do equipamento, não levando os corpos de prova a saturação máxima de fissuras. As fissuras indicadas pelas setas são aquelas que levaram o colapso do compósito. Nota-se que o compósito reforçado com teor de 2% (M0C2) apresentou uma única fissura, como mencionado anteriormente pelo seu comportamento *strain softening*.

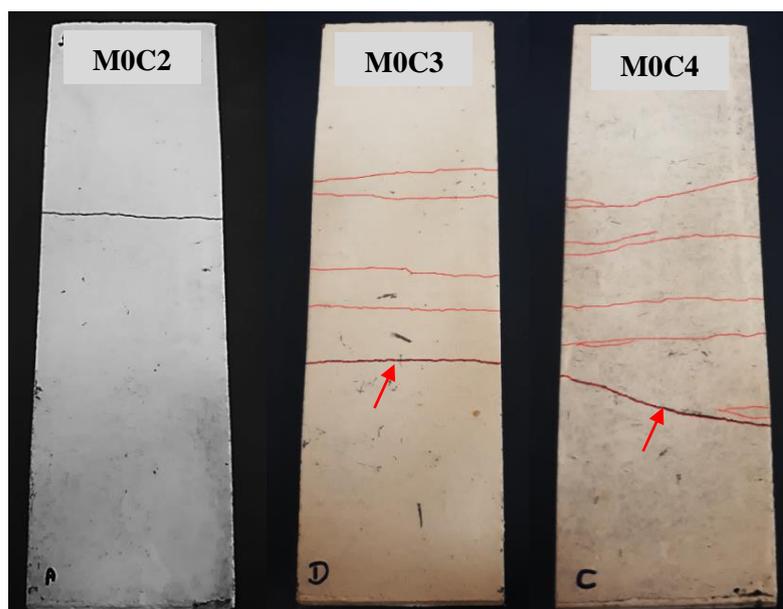


Figura 54: Modo de ruptura dos compósitos M0.

Os compósitos produzidos a partir da matriz M1 apresentaram uma quantidade superior de fissuras no terço médio das amostras, como apresentado na Figura 55.

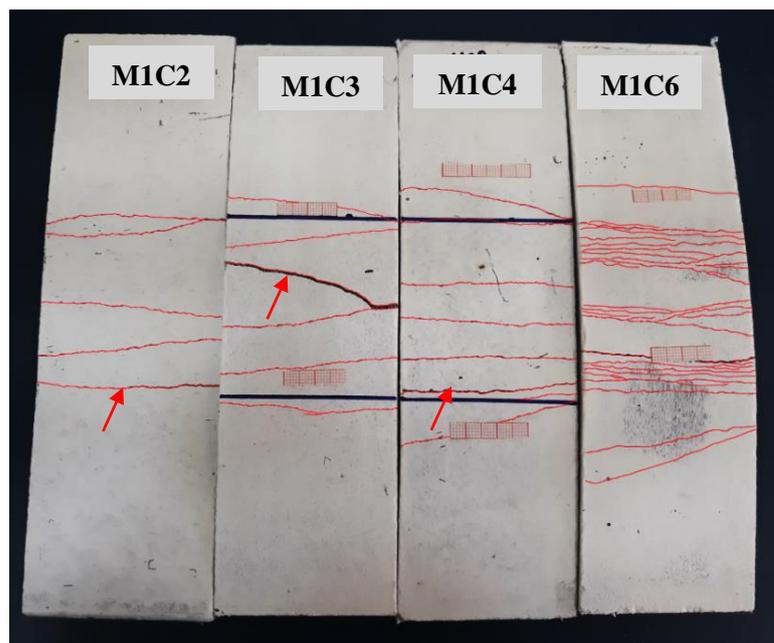


Figura 55: Modo de fratura dos compósitos M1.

A Tabela 14 mostra a média das fissuras formadas ao longo do eixo longitudinal central da parte inferior das amostras e o espaçamento médio, visto que é um parâmetro importante para avaliação do desempenho dos compósitos. Verifica-se que quanto maior a quantidade de camadas de reforço maior é o número de fissuras e menor o espaçamento entre as mesmas.

Tabela 14 – Número e espaçamento médio das fissuras.

Compósitos	Nº médio de fissuras	Espaçamento médio das fissuras (mm)
M0C2	1	-
M0C3	4	24,70 ± 1,17
M0C4	9	12,80 ± 1,77
M1C2	5	15,67 ± 0,47
M1C3	6	14,67 ± 2,21
M1C4	9	12,03 ± 1,10
M1C6	23	7,30 ± 0,70

De maneira geral, todos os compósitos apresentaram um comportamento dúctil com aumento da tensão após o surgimento da primeira fissura. Este comportamento foi similar ao observado nas pesquisas de Melo Filho (2012), Oliveira (2013) e Arruda Filho (2015) no ensaio de flexão em 4 pontos.

#### 4.4.2 Tração direta

Como analisado anteriormente, a utilização de metacaulinita proporcionou um incremento na tensão máxima da matriz M1. Comparando a média das amostras sem fibra submetidas à tração direta, houve uma elevação de 11,54% na tensão última. Como pode ser observado na Figura 56.

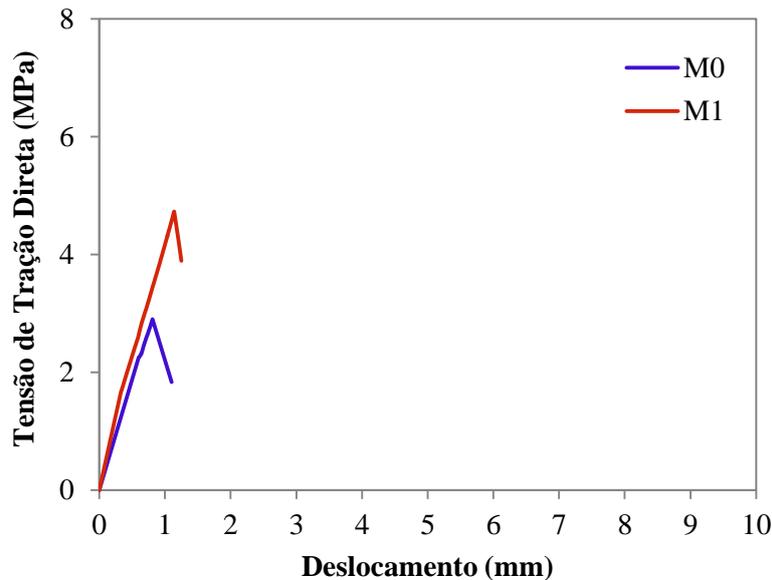


Figura 56: Curva tensão de tração direta x deslocamento das matrizes M0 e M1.

As curvas típicas de tensão de tração versus deslocamento obtidas nos ensaios de tração direta nos compósitos são apresentadas na Figura 57. Para esta análise utilizou-se apenas os espécimes produzidos a partir da matriz M1. Assim como nos resultados a flexão, observa-se nos resultados de tração que, à medida que a fração volumétrica da fibra (número de camadas) aumenta, a rigidez pós-fissuração também aumenta.

A curva do compósito reforçado 2% de fibra apresentou uma redução na tensão de tração no instante subsequente à primeira fissura, ou seja, não exibiu o comportamento de múltipla fissuração, não havendo aumento de tensão após o surgimento da primeira fissura, como aconteceu quando submetido ao ensaio de flexão a quatro pontos.

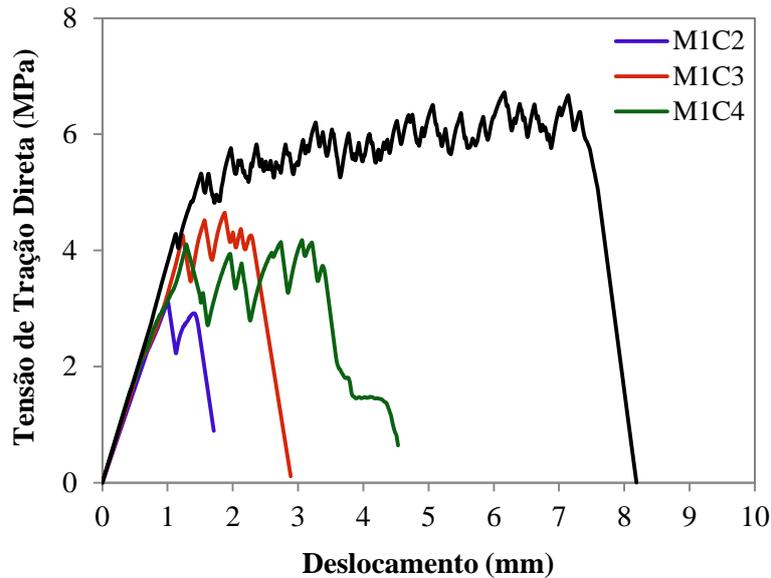


Figura 57: Curva tensão de tração direta x deslocamento dos compósitos.

Diferentemente, os compósitos M1C3, M1C4 e M1C6, apresentaram múltiplas fissuras e aumento de tensão, pós primeira fissura. Conforme o teor de fibra foi aumentando houve um incremento da resistência à tração, deformação e tenacidade, proporcionando a múltipla fissuração. Em relação à tensão máxima, os compósitos com teor de 3 e 4% não apresentaram uma diferença significativa. O compósito com fração volumétrica de 6% teve um aumento de tensão 71,85% referente à matriz M0 e 53,81% se comparada com a matriz M1.

A diferença entre a tensão de primeira fissura não foi estatisticamente significativa, cerca de 5%. Comparando os valores tensão com pesquisas de outros autores, aos 28 dias de idade, tem-se a pesquisa de Fidelis *et al.* (2014) que utilizaram tecido de juta como reforço de matriz cimentícia. Com o teor de 6% os autores obtiveram 2,39 MPa para a tensão de primeira fissura e 4,38 MPa para tensão máxima. Na mesma pesquisa, os autores estudaram o teor de 10%, onde o valor de  $\sigma_{1f}$  foi de 2,31 MPa e de  $\sigma_u$  de 4,73 MPa. Oliveira (2016) utilizou tecido híbrido de juta e malva tratado com verniz como reforço de laminados cimentícios, no qual o autor obteve tensão pós-fissuração de 3,75 MPa. Observando os resultados da Tabela 15, nota-se que o tecido de algodão, proporcionou um aumento tensão, tanto de primeira fissura, quanto de tensão máxima, quando comparados com as das pesquisas mencionadas.

Tabela 15 – Valores médios das propriedades mecânicas à tração direta.

<b>Compósitos</b>	<b><math>\sigma_{1f}</math> (MPa)</b>	<b><math>d_{1f}</math> (mm)</b>	<b><math>\sigma_u</math> (MPa)</b>
M0	-	-	3,41 (0,70)
M1	-	-	3,81 (0,56)
M1C2	-	-	4,48 (1,11)
M1C3	3,58 (0,49)	1,18 (0,30)	4,52 (0,16)
M1C4	3,76 (0,34)	1,46 (0,18)	4,54 (0,37)
M1C6	3,72 (1,02)	0,94 (0,53)	5,86 (0,78)

A tenacidade das amostras submetidas à tração direta foi calculada, em função do deslocamento de primeira fissura ( $T_{1^a \text{ fissura}}$ ), aos deslocamentos de 2 mm ( $T_{2,0}$ ), 2,5 mm ( $T_{2,5}$ ) e ao deslocamento referente a ruptura do compósito ( $T_u$ ). Os resultados encontram-se na Tabela 16, os quais foram expressos em Joule (J) e entre os parênteses encontram-se o desvio padrão. Em relação ao deslocamento de primeira fissura, nota-se um pequeno acréscimo na absorção de energia, em comparação as matrizes sem fibra. No entanto, analisando os compósitos reforçados, observa-se uma perda gradativa de tenacidade, à medida que se aumenta o teor de fibras. Os compósitos com teor de 3 e 4% apresentaram valores aproximados em todos os deslocamentos, havendo uma pequena variação de 5,54% referente a ruptura final do compósito.

Tabela 16 – Resultados da tenacidade à tração direta.

<b>Amostras</b>	<b>Tenacidade (J)</b>			
	$T_{1^a \text{ fissura}}$	$T_{2,0}$	$T_{2,5}$	$T_u$
M0	0,80 (0,29)	-	-	-
M1	0,835 (0,25)	-	-	-
M1C2	1,144 (0,43)	-	-	-
M1C3	1,080 (0,17)	1,946 (0,05)	2,948 (0,12)	3,448 (0,18)
M1C4	1,021 (0,07)	1,901 (0,22)	2,661 (0,29)	3,639 (0,48)
M1C6	0,902 (0,23)	2,375 (0,45)	3,235 (0,55)	13,878 (0,24)

O compósito com teor de 6% de fibras proporcionou ao compósito maior capacidade de alongamento e múltipla fissuração, apresentando uma tenacidade média de 13,878 J. Quando comparada com o teor de 3% o aumento foi equivalente a 302,42%.

Fidelis (2014), avaliou a tenacidade a tração de compósitos reforçados com 6 e 10% de tecido de juta. Os valores de tenacidade em relação ao deslocamento de primeira fissura não apresentaram aumentos significativos. Para o deslocamento de ruptura o teor de 6% proporcionou uma tenacidade 12,670 J e para o volume de 10% este valor foi de 14,354 J.

Oliveira *et al.* (2018), produziu compósitos cimentícios reforçados com duas camadas de tecido de sisal, os quais foram saturados em água e em nano sílica. A tenacidade foi calculada para deformações com intervalo de 0,5 a 4%. A absorção de energia máxima calculada a deformação de 4% foi de 3,291 J, para o compósito com fibra saturada em água. O compósito com reforço saturado em nano sílica apresentou uma redução na tenacidade, o valor foi de 3,258 J.

Na Figura 58 apresenta-se o modo de fratura dos compósitos têxteis submetidos à tração. As fissuras foram identificadas e ressaltadas para melhor visualização. O modo de ruptura das amostras aconteceu pela abertura e alargamento de uma única fissura, até a ruptura do compósito, tal como no ensaio de flexão. As fissuras que levaram as amostras ao colapso estão indicadas pela seta. Nota-se o crescente aumento no número de fissuras, dando destaque para o compósito M1C6 que foi completamente saturado pelas fissuras.

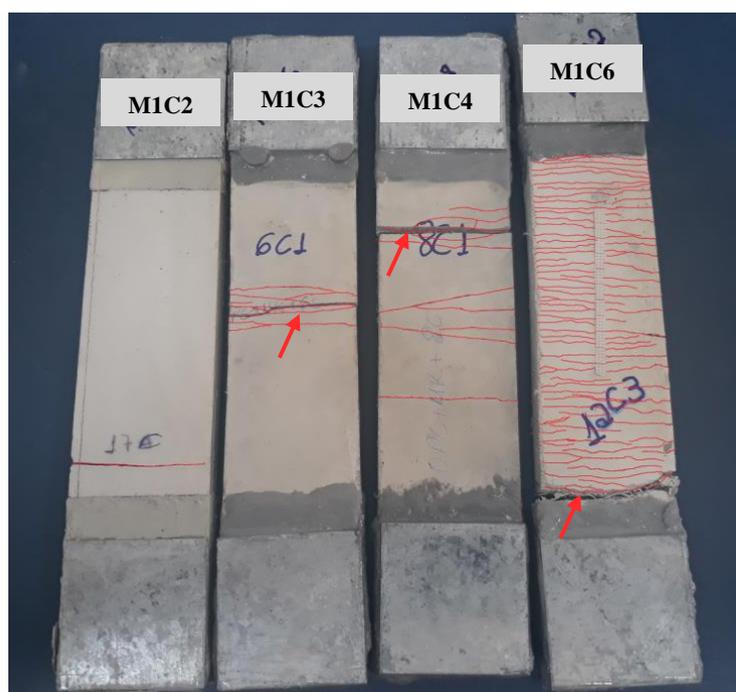


Figura 58: Modo de fratura dos espécimes submetidos à tração direta.

Na Tabela 17 são apresentadas as médias relacionadas ao número de fissuras e o espaçamento entre elas. Os compósitos com teor de 3 e 4% apresentaram um comportamento semelhante, como observado anteriormente. Os espécimes reforçados 2% de fibra apresentaram entre 1 a 2 fissuras. O laminado com 6% apresentou uma média de 57 fissuras.

Tabela 17 – Número e espaçamento médio das fissuras à tração.

Compósitos	Nº médio de fissuras	Espaçamento médio das fissuras (mm)
M1C2	2	5,0 ± 2,1
M1C3	6	3,7 ± 1,75
M1C4	9	2,93 ± 0,8
M1C6	57	1,46 ± 0,03

#### 4.4.3 Ensaio de Absorção de Água e Densidade Aparente

Os valores médios de absorção de água e massa específica aparente dos compósitos são apresentados na Tabela 18, juntamente com seus respectivos valores de desvio padrão.

Tabela 18 – Valores médios da absorção e densidade dos compósitos cimentícios.

Análise	AMOSTRAS								
	M0	M0C2	M0C3	M0C4	M1	M1C2	M1C3	M1C4	M1C6
<b>ABS</b> (%)	11,01 (0,40)	10,21 (0,45)	10,97 (0,39)	11,54 (0,37)	11,05 (0,32)	10,06 (0,36)	10,15 (0,10)	11,10 (0,15)	11,19 (0,24)
<b>DP</b> (%)	1,99 (0,04)	1,92 (0,01)	1,88 (0,01)	1,78 (0,01)	1,89 (0,10)	1,84 (0,06)	1,76 (0,03)	1,72 (0,03)	1,65 (0,02)

\*ABS – absorção de água; DP – densidade aparente.

Os compósitos com substituição de cimento por metacaulinita (M1) quando comparados com os painéis sem substituição, apresentaram valores inferiores de densidade (levando em consideração os teores de fibra). Esta característica é justificada pelo fato da metacaulinita apresentar uma densidade inferior a do cimento, contribuindo assim, para a diminuição de densidade do compósito. Aos 28 dias de idade a adição de metacaulinita reduziu cerca de 5% da densidade.

É possível observar também a influência do tecido têxtil na redução da densidade aparente, quanto maior a quantidade de fibra adicionada menor a densidade. A adição das

fibras influenciou na diminuição de 10,55% na densidade dos compósitos produzidos a partir de M0.

Os valores médios de absorção de água diminuíram nos compósitos com 2 e 3% de fibras se comparados com as referências sem fibras. A menor absorção nestes laminados pode ser a menor formação de microvazios na interface fibra-matriz, os quais podem armazenar moléculas de água. Isso significa que quanto maior a adesão fibra-matriz, menor a quantidade de microvazios presente na interface, e também a quantidade de sítios onde as moléculas de água podem se alojar.

Os laminados com teor de 4 e 6% em contrapartida, absorveram cerca de 9,60% a mais de água, em relação aos compósitos reforçados com 2 e 3% de fibras. Este aumento pode estar relacionado à adesão interfacial de todas as camadas têxteis com a matriz cimentícia, formando microvazios ou bolhas de ar, acondicionando moléculas de água. De acordo com Spinacé *et al.* (2009) este fato pode ser considerado uma premissa indireta da adesão interfacial.

## 5 CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas, os resultados obtidos foram apresentados e discutidos nos capítulos anteriores desta pesquisa. No entanto, algumas conclusões podem ser formuladas, dentre elas, destacam-se àquelas fundamentais:

- O método utilizado para produção da metacaulinita mostrou-se eficiente. Os parâmetros de calcinação adotados foram suficientes para romper a estrutura cristalina da caulinita, como pode-se constatar na análise de difração de raios-X. Assim como seu uso, proporcionou um incremento na resistência mecânica em todos os casos. A compressão o aumento foi cerca de 14%. Quando submetido a esforços de flexão esta elevação foi de 6,11% e a cargas de tração de 11,54%. Além disso, através da análise termogravimétrica TG/DTG, foi possível comprovar que a utilização da metacaulinita em substituição ao cimento, em teor de 50% em massa, conseguiu produzir uma matriz isenta de hidróxido de cálcio (CH) aos 28 dias. Proporcionando melhores condições para utilização em compósitos com fibras vegetais, pois a metacaulinita atua como um tratamento na matriz. Assim, pode-se considerar a metacaulinita de alta reatividade.
- A trabalhabilidade da matriz foi obtida com a adição de 0,8% de aditivo superplastificante, obtendo um valor de espalhamento de 408 mm em estado fresco, tornando-se ideal para aplicação em compósitos reforçados com tecidos de pequenas aberturas, conforme resultados observados na literatura.
- A caracterização física, térmica e microscópica da fibra de algodão, apresentaram comportamentos típicos aos descritos pela literatura. A característica hidrofílica do tecido de algodão foi analisada, através do ensaio de absorção de água, como verificou-se o tecido teve um ganho de massa em mais de 200%, resultado do processo de mercerização realizado pela indústria têxtil. Na microscopia eletrônica de varredura, pode-se perceber que os fios são formados por uma mistura de fibras maduras e imaturas. As variações das fibras ocorrem devido a condições climáticas, ataques de insetos, colheita antecipada ou tardia. Portanto, para produzir tecidos têxteis mantendo a qualidade as indústrias, realizam uma

boa mistura das fibras durante a produção dos fios, cerca de 70% de fibras maduras e 30% de fibras imaturas.

- A utilização do tecido de algodão proporcionou para a maioria das condições experimentais, o comportamento *strain hardening*. À medida que o teor de fibras foi aumentando, observou-se o aumento gradativo no número de fissuras e a diminuição no espaçamento entre elas. Além disso, houve acréscimo na resistência de ruptura e no aumento da deformação, conseqüentemente, gerou maior capacidade de absorção de energia para o compósito.
- A caracterização mecânica dos compósitos reforçados com 2, 3, 4 e 6% de tecido foi realizada sob flexão a quatro pontos e tração direta. O compósito com teor de 6% apresentou melhor comportamento mecânico em ambos os casos, pois teve maior incremento na resistência e formação de múltiplas fissuras (quantidade e espaçamento). Quando submetido à flexão esses compósitos, tiveram um aumento de primeira fissura até a tensão última de 70%, e um incremento de tensão máxima de 111,51% quando comparado com a referência sem fibra (M1), apresentando em média 23 fissuras no terço médio, com espaçamento de 2,88 mm e tenacidade de 7,279 kJ/m<sup>2</sup>. Aos esforços de tração este compósito suportou 5,86 MPa, um incremento de cerca de 54% em relação a matriz, nos quais, as amostras formaram em média 57 fissuras com espaçamento de 1,46 mm. Em relação à tenacidade total, o compósito absorveu 13,878 J de energia, isso significa um aumento superior 1000% quando comparado com a matriz referência, conseqüência da alta fissuração e deformação do compósito têxtil.
- Portanto, o tecido têxtil de algodão se mostrou eficiente como reforço de compósitos cimentícios, com valores de resistência comparáveis a outros compósitos com tecidos distintos, proporcionando aos compósitos, comportamento *strain hardening*, tanto quando submetidos à flexão, quanto a tração.
- Em relação ao comportamento físico dos compósitos, observou-se que a densidade aparente diminuiu à medida que aumentou a fração volumétrica de fibra. Além disso, a adição de metacaulinita também colaborou para esta diminuição, em torno de 5%, uma vez que apresenta massa específica inferior a

do cimento. Quanto aos valores de absorção de água ocorreram variações, quando adicionados 2 e 3% de fibra, houve diminuição da absorção de água em 8,9%, para os compósitos de M1. No entanto, o contrário acontece com os laminados reforçados com o teor de 4 e 6%, que absorveram cerca de 9,60% a mais de água, podendo ser resultado da presença de sítios ou vazios, onde as moléculas de água podem se alojar. Esse fator, possivelmente foi decorrente do aumento do número de camadas de tecido, interferindo na adesão interfacial fibra-matriz.

## 6 SUGESTÕES FUTURAS

Certamente, existe a possibilidade de continuidade de trabalhos utilizando tecido têxtil de algodão como reforço de compósitos. Apesar dos bons resultados encontrados, outros estudos devem ser realizados, segue abaixo algumas sugestões para pesquisas futuras:

- Realizar estudos com diferentes tratamentos no tecido têxtil de algodão, a fim de combater o caráter hidrofílico do tecido de algodão, e melhorar a adesão fibra-matriz.
- Apesar da boa resistência obtida com o teor de 6% de fibras, sugere-se estudar frações volumétricas maiores, para produzir compósitos têxteis com maior número de camadas. Assim, espera-se aumentar a tensão de primeira e última fissura, e provocar a expansão da região de formação de múltiplas fissuras.
- Outro fator que pode ser aprimorado é escolha do tecido, sugere-se buscar tecido têxtil com maiores aberturas ou produzir um novo tecido com diferente geometria, mais adequada para aplicação na matriz cimentícia, uma vez que a geometria afeta diretamente a interface fibra-matriz.
- Para que a utilização do material compósito seja viável, o método de produção precisa ser aprimorado. Visando manter a qualidade e a padronização das características do compósito têxtil.
- O estudo da durabilidade é um fator crucial para empregar um material compósito na construção civil. Para tanto, sugere-se estudar a durabilidade química, adotando o método de envelhecimento acelerado, através de ciclos de molhagem e secagem, e através do envelhecimento natural, onde o compósito é submetido às intempéries naturais, para a matriz com substituição parcial do cimento por metacaulinita.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 27**: Redução de amostras de campo para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 49**: Agregado fino – Determinação de impurezas. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7218**: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13276**: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14656**: Cimento Portland e matérias-primas – Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15498**: Placa de fibrocimento sem amianto – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16697**: Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ABRAPA. **Associação Brasileira Dos Produtores De Algodão**. Algodão no mundo. Disponível em: <<https://www.abrapa.com.br/Paginas/dados/algodao-no-mundo.aspx>>. Acesso em 02 maio de 2019.

ALMEIDA, F. A. C.; ARAÚJO, M. E. R.; SILVA, O. R. R. F.; SANTOS, J. F.; GOMES, J. P. Desenvolvimento e avaliação de descaroçador para o beneficiamento do algodão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 6, p. 607-614, 2011.

ALMEIDA, A. E. F. S.; TONOLI, G. H. D.; SANTOS, S. F.; SAVASTANO JR., H. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. **Cement & Concrete Composites**, v.42, p. 49-58, 2013.

ALOMAYRI, T.; SHAIKH, F. U. A.; LOW, I. M. Synthesis and mechanical properties of cotton fabric reinforced geopolymer composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 60, p. 36-42, 2014.

ALOMAYRI, T.; SHAIKH, F. U. A.; LOW, I. M. Characterisation of cotton fibre-reinforced geopolymer composites. **Composites: Part B**, v. 50, p. 1-6, 2013.

ALY, M.; HASHMI, M. S. J.; OLABI, A. G.; MESSEIRY, M.; HUSSAIN, A. I.; ABANIR, E. F. Effect of nano-clay and waste glass powder on the properties of flax fibre reinforced mortar. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 6, n. 10, p.19-28, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 150-07**. Standard Specification for Portland Cement, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C618**: Standard Specification for Coal Fly Ash and or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. USA, 2008.

ANDRIOLO, F. R. **Construções de Concreto: Manual de Práticas para Controle e Execução**. São Paulo: PINI, 1984.

ANTONI, M.; ROSSEN, J.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 12, p. 1579-1589, 2012.

ARAÚJO, J. R. **Compósito de Polietileno de Alta densidade Reforçado com Fibra de Curauá Obtidos por Extrusão e Injeção**. 153 p. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Campinas – UNICAMP. São Paulo, 2009.

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; GARCÍA-HORTAL, J.A.; BARRA, M. Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers. **Cellulose**, v. 18, p. 281-289, 2011.

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLÊDO FILHO, R.D. Cellulosic fiber reinforced cement- based composites: A review of recent research. **Construction and Building Materials**, v. 79, p. 115-128, 2015.

ARRUDA FILHO, A. B. **Placas Cimentícias Reforçadas com Tecidos Estruturais de Sisal**. 109 p., 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2015.

ARSÈNE, M. A.; BILBA, K.; SAVASTANO JÚNIOR, H.; GHAVAMI, K. Treatments of non-wood plant fibres used as reinforcement in composite materials. **Materials Research**, v. 16, p. 1-21, 2013.

BACHELIER, B.; GOURLLOT, J. P. **Manual de Qualidade da Fibra – Parte 2: A Fibra de Algodão**. AMPA - IMAmt – Instituto Mato-grossense do Algodão, 2018.

BAERT, G.; HOSTE, S.; DE SCHUTTER, G.; DE BELIE, N. Reactivity of fly ash in cement paste studied by means of thermogravimetry and isothermal calorimetry. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 94, p. 485-492, 2008.

BAJWA, S. G.; BAJWA, D. S.; HOLT, G.; COFFELT, T.; NAKAYAMA, F. Properties of thermoplastic composites with cotton and guayule biomass residues as fiber fillers. **Industrial Crops and Products**, v. 33, p. 747–755, 2011.

BALAGURU, P. N.; SHAH, S. P. **Fiber reinforced cement composites**, McGraw Hill, New York, 1992.

BANGE, M.; CONSTABLE, G.; GORDON, S.; LONG, R.; NAYLOR, G.; VAN DER SLUIJS, R. Fibrepak: from seeds to good shirts. **CSIRO & Cotton Catchment Communities Cooperative Research**. Narrabri, 2390, NSW, Australia. 108p. 2009.

BARATA, M. S.; DEL MOLIN, D. C. C. Avaliação preliminar do resíduo caulínico das indústrias de beneficiamento de caulim como matéria-prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa. **Ambiente Construído**, v. 2, n. 1, p. 69-78, 2002.

BARHUM, R., MECHTCHERINE, V. Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour of textile-reinforced concrete under tensile loading. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 92, p. 56–71, 2012.

BRANCATELLI, G.; COLLEONE, C.; MASSAFRA, M. R.; ROSACE, G. Effect of hybrid phosphorus-doped silica thin films produced by sol-gel method on the thermal behavior of cotton fabrics. *Polymer Degradation and Stability*, v. 96, n. 4, p. 483-490, 2011.

BRANCO, C. T. N. M. *et al.* Material compósito de matriz poliéster reforçado por fibras de algodão contínuas e alinhadas. 22º CBECiMat – **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, p. 3394-3400, 2016.

BERNAT-MASO, E. Comportamiento estructural de muros de obra de fábrica reforzados com TRM. En: **Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos em la obra civil y la edificación**. Cap. 6, p. 137-164, 2013

BERTOLINO, L. C.; TOREM, M. L.; SCORZELLI, R. B.; ROSSI, E. A. M. Caracterização Mineralógica e Beneficiamento do Caulim de Prado (BA). **HOLOS**, v. 5, n. 28, p. 83-92, 2012.

BRITO, C. E. C.; VALENZULA DIAZ, F. R.; NEVES, R. F.; HILDEBRANDO, E. A. Avaliação da metacaulinita obtida de rejeito de caulim amazônico visando sua aplicação na síntese de argilominerais micáceos. 23º CBECiMat - **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Foz do Iguaçu, PR, 2018.

BORSOI, C.; SCIENZA, L. C.; ZATTERA, A. J.; ANGRIZANI, C. C. Obtenção e caracterização de compósitos utilizando poliestireno como matriz e resíduos de fibras de algodão da indústria têxtil como reforço. **Polímeros**, v. 21, n. 4, p. 271-279, 2011.

BUTLER, M.; LIEBOLDT, M.; MECHTCHERINE, V. Application of Textile-Reinforced Concrete (TRC) for structural strengthening and in prefabrication. **Advances in Cement-Based Materials** - van Zijl & Boshoff (eds), London, p. 127-136, 2010.

CABRERA, J. G.; LYNSDALE, C. J. The effect of superplasticisers on the hydration of normal Portland cement. **L'Industria Italiana del Cemento**, v. 7-8, p. 532-541, 1996.

CADISPOTI, R.; OLIVEIRA, D. V.; OLIVITO, R. S.; LOURENÇO, P. B.; FANGUEIRO, R. Mechanical performance of natural fiber-reinforced composites for the strengthening of masonry. **Composites Part B: Engineering**, v. 77, p. 74-83, 2015.

CARDOSO, S. G. **Estudo das propriedades mecânicas e dos mecanismos de fratura de fibras sintéticas do tipo náilon e poliéster em tecidos de engenharia**. 2009. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

CARMONA, V. N.; TRINDADE, J. A.; ROSA, D. S. **Avaliação do Tratamento Alcalino em Fibras de Algodão**. Anais do 13º Congresso Brasileiro de Polímeros. Natal – RN, 2015.

CARVALHO, M. J. C.; GOMES, I. S.; ROCHA, T. O. S.; SILVA, D. S.; VILHENA, E. S.; NASCIMENTO, A. S.; FUJIYAMA, R. T. Bending characteristics of cementitious matrix composite reinforced with natural fibers of piaçava (*Attalea funifera*). **Brazilian Applied Science Review**, v. 3, n. 1, p. 791-803, 2019.

CAVALCANTE, D. G. **Estudo das características física, mecânica e química de compósitos cimentícios reforçados com tecido de juta e malva tratado e adição de materiais pozolânicos**. p. 123, 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas - (UFAM). Manaus, 2017.

CAVALCANTE, D. G.; MARQUES, M. G. S.; MELO FILHO, J. A.; VASCONCELOS, R. P. Influence of the levels of replacement of portland cement by metakaolin and silica extracted from rice husk ash in the physical and mechanical characteristics of cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 94, p. 296-306, 2018.

CHAND, N.; FAHIM, M. **Tribology of natural fiber polymer composites**. Woodhead Publishing in Materials, 2008.

- CHAIPANICH, A.; NOCHAIYAT. Thermal analysis and microstructure of Portland cement-fly ash-silica fume paste. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 99, n.2, 487-493, 2010.
- CHAUDHARY, V. COHIL, P. Investigations on drilling bidirectional cotton polyester composite. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 21, p. 960-968, 2016.
- CLARAMUNT, J.; ARDANUY, M.; GARCÍA-HORTAL, J. A.; TOLEDO FILHO, R. D. The Hornification of Vegetable Fibers to Improve the Durability of Cement Mortar Composites. **Cement & Concrete Composites**, v. 33, p. 586–595, 2011.
- CERCHIARO, J. R. **Comportamento Mecânico de Compósitos com Poliéster e Tecidos de Sisal por Moldagem Manual**. 87 p., 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2010.
- COLEMAN, N. J.; PAGE, C. L. Aspects of the pore solution chemistry of hydrated cement pastes containing MK: lime hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 1, p. 147-154, 1997.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. **Safra 2016/2017**, v. 4, n. 7. 8º levantamento, 2017.
- CORREIA, V. C.; SANTOS, S. F.; SAVASTANO JR., H.; JOHN, V. M. Utilization of Vegetable fibers for production of reinforced cementitious materials. **RILEM Technical Letters**, v. 2, p. 145-154, 2017.
- COSTA, C.; ALMEIDA DE CARVALHO, P. BORDADO, J. C.; NUNES, A. Estudo de Argamassas de Base Cimentícia por Microscopia Electrónica de Varrimento. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 21, p. 31-35, 2009.
- CUNHA, M. F.; FORTI, B. A.; SILVA, B. I. Tendências da Normalização de Metacaulim para uso em concretos. In: **Reunião Anual do IBRACON 52**. Novas Tecnologias do Concreto para o Crescimento Sustentável. Ceará, 2010.
- DIAMOND, S. The microstructure of cement paste and concrete a visual primer. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, p. 919–933, 2004.

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.

DOBRICAU, L.; SREEKUMAR, P. A.; SAIHAH, R.; LEBLANC, N.; TERRIÉ, C.; GATTIN, R.; SAITER, J. M. Wheat flour thermoplastic matrix reinforced by waste cotton fibre: Agro-greencomposites. **Composites: Part A**, v.40, p. 329-334, 2009.

DOCHIA, M.; SIRGHIE, C.; KOZLOWSKI, R. M.; ROSKWITALSKI, Z. Handbook of Natural Fibres: Types, Properties and Factors Affecting Breeding and Cultivation. V.1 in **Woodhead Publishing Series in Textiles**. p. 11-23. 2012.

DONATELLO, S.; TYRER, M.; CHEESEMAN, C. R. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 121-127, 2010.

DWECK, J.; MELCHERT, M. B. M.; VIANA, M. M.; CARTLEDGE, F. K.; BUCHLER, P. M. Importance of quantitative thermogravimetry on initial cement mass basis to evaluate the hydration of cement pastes and mortars. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 113, p. 1481-1490, 2013.

ECHER, F.; ROSOLEM, C. A.; RAPHAEL, J. P. A. **Manual de Qualidade da Fibra – Parte 4: Produzir uma fibra de qualidade** - (Desenvolvimento da planta e qualidade da fibra). AMPA - IMAmt – Instituto Mato-grossense do Algodão, 2018.

ELBEYLI, I. Y.; MOROYDOR, D.; GULEN, J.; PISKIN, S. Thermal analysis of borogypsum and its effects on the physical properties of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 11, p. 1729-1735, 2003.

ESCRIG, C.; GIL, L.; BERNAT-MASO, E.; PUIGVERT, F. Experimental and analytical study of reinforced concrete beams shear strengthened with different types of textile-reinforced mortar. **Construction and Building Materials**, v. 83, p. 248-260, 2015.

ESMERALDO, M. A. **Preparação De Novos Compósitos Suportados Em Matriz De Fibra Vegetal/Natural**. p.119, 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2006.

FAELLA, C.; MARTINELLI, E.; NIGRO, E.; PACIELLO, S. Shear Capacity of Masonry Walls Externally Strengthened by a Cement-Based Composite Material: An Experimental Campaign. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 84-93, 2010.

FAO. **The Food And Agriculture Organization Of The United Nations**. Futures Fibres: Sisal, 2019. Disponível em: <<http://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/sisal/en/>>. Acesso em 15 de abril de 2019.

FAO. **The Food And Agriculture Organization Of The United Nations**. Futures Fibres: Jute, 2019. Disponível em: <<http://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/jute/en/>>. Acesso em 29 de abril de 2019.

FARIAS FILHO, J.; TOLÊDO FILHO, R. D.; LIMA, P. R. Efeito da argila calcinada sobre a durabilidade de argamassas reforçadas com fibras curtas de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 10, p. 1109-1114, 2010.

FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H.; SAIN, M. Biocomposites Reinforced with Natural Fibers: 2000-2010. **Progress in Polymer Science**, v. 37, p. 1552-1596, 2012.

FAZITA, M. R. N.; NURNADIA, M.; KHALIL, H. P. S. A.; HAAFIZ, M. K. M.; FIZREE, H. M.; SURAYA, N. L. M. Woven natural fiber fabric reinforced biodegradable composite: processing, properties and application. **Green Biocomposites Manufacturing and Properties**. Cap. 09, p. 199-224, 2016.

**FLAX COUNCIL OF CANADA**. Disponível em: <<https://flaxcouncil.ca/resources/about-flax/canada-a-flax-leader/>>. Acesso em 01 maio de 2019.

FELICE, G. *et al.* Mortar-based systems for externally bonded strengthening of masonry. **Materials and Structures**, v. 47, p. 2021-2037, 2014.

FERREIRA, S. R. **Influência do Tratamento de Molhagem e Secagem na Aderência Fibra-Matriz e no Comportamento Mecânico de Compósitos Cimentícios Reforçados Randomicamente Com Fibras de Sisal**. 158 p., 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - (COPPE/UFRJ). Rio de Janeiro, 2012.

FERREIRA, S. R.; SILVA, F. D. A.; LIMA, P. R. L TOLEDO FILHO, R. D. Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber–matrix bond in cement based systems. **Construction and Building Materials**, v. 101, Part 1, p. 730-740, 2015.

FERRETI, M. **Princípios e Aplicações de Espectroscopia de Fluorescência de Raios X (FRX) com Instrumentação Portátil para Estudo de Bens Culturais**. Revista CPC, São Paulo, n. 7, p. 74-98, 2009.

FIDELIS, M. E. A. **Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta.** 266 p., 2014. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - (COPPE/UFRJ). Rio de Janeiro, 2014.

FIDELIS, M. E. A.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. The Influence of Fiber Treatment on the Mechanical Behavior of Jute Textile Reinforced Concrete. **Key Engineering Materials**, v. 600, p. 469-474, 2014.

FIDELIS, M. 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.; TOLEDO FILHO, R. D.; SILVA, F. A.; MECHTVHERINE, V. Mechanical behavior of juta textile reinforced concrete: the effect of polymeric coating. **Fifth International Conference on Natural Polymers, Biopolymers and Biomaterials: Applications from macro to nanoscale**, 2017, Rio de Janeiro.

FINKLER, M.; SCAPINI, P.; FREIRE, E.; ZATTERA, A. J.; ZENI, M. Compósitos de HDPE com resíduos de fibras têxteis. Parte I: Caracterização Mecânica. **Polímeros: Ciência e**

FRIAS, M.; CABRERA, J. Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v.30, p. 561-569, 2000.

FURTADO, D. O. F. **Nanorevestimento de Tecido de Algodão Através de Impregnação de TiO<sub>2</sub> e Filme de DLC Depositado por Plasma.** 94 p., 2015. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2015.

GOPINATH, S.; KUMAR, V. R.; SHETH, H.; MURTHY, A. R.; IYER, N. R. Pre-Fabricated Sandwich Panels using Cold-Formed Steel and Textile Reinforced Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 54-59, 2014.

GUIMARÃES, M.; NOVACK, K. M.; BOTARO, V. R. Caracterização anatômica da fibra de bambu (*Bambusa vulgaris*) visando sua utilização em compósitos poliméricos. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, v. 11, n. 7, p. 442-456, 2010.

GRIM, R. E. **Applied Clay Mineralogy.** New York: MacGraw-Hill, 1962.

GRISHANOV, S. Handbook of Textile and Industrial Dyeing: Principles, Processes and Types of Dyes. v. 1, in: **Woodhead Publishing Series in Textiles.** p. 28-63, 2011.

HAKAMY, A.; SHAIKH, F. U. A.; LOW, I. M. Characteristics of Hemp Fabric Reinforced Nanoclay–Cement Nanocomposites. **Cement and Concrete Composites**, v.50, pp. 27-35, 2014.

HADLEY, D. W.; DOLCH, W. L.; DIAMOND, S. On the occurrence of hollow-shell hydration grains in hydrated cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1–6, 2000.

HEWLETT, P. C; LISKA, M. **LEA'S Chemistry of Cement and Concrete**, Elsevier, 5ª Ed. (2019).

HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; TANAKA, R. S.; MEDEIROS, M. H. F. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte II): Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG). **Revista Matéria**, v.22, n.3, 2017.

**International year of natural fibres**, 2009. Disponível em: <<http://www.naturalfibres2009.org/en/fibres/index.html>>. Acesso em 01 de maio de 2019.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. Cinza e aglomerantes alternativos. Cap. 6, In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. **Tecnologia e materiais alternativos de construção**. Campinas: UNICAMP, p. 145-190, 2003.

JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibers and biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, v. 71, p. 343–364, 2008.

KABELE, P.; KANAKUBO, T. Experimental and Numerical Investigation of Shear Behavior of PVA-ECC in Structural Elements. In: **Proceedings, Fifth International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC 5)**, Reinhardt and Naaman, eds., p. 137-146, 2007.

KABIR, M. M.; LAU, H. W. K. T.; CARDONA, F. Chemical treatments on plant – based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. **Composites**, Part B. v. 43, p. 2883-2892, 2012.

KRAJCI, L.; MOJUMDAR, S. S.; JANOTIKA, I.; PUERTAS, F.; PALACIOS, M.; KULIFFAYOVÁ, M. Performance of composites with metakaolin-bended cements. **J Therm Anal Calorim**, 119, p. 851-863, 2015.

- KJELLEN, K. O.; JUSTNES, H. Revisiting the microstructure of hydrated tricalcium silicate—a comparison to Portland cement. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, p. 947–956, 2004.
- KUA, H. W.; KAMATH, S. An attributional and consequential life cycle assessment of substituting concrete with bricks. **Journal of Cleaner Production**, v. 81, p. 190-200, 2014.
- LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia** - São Paulo, SP: Edgard Blücher, 2006.
- LI, V. C.; MISHRA, D. K.; WU, H-C. Matrix design for pseudo-strainhardening fibre reinforced cementitious composites. **Materials and Structures**, v. 28, p. 586-595, 1995.
- LIMA, J. J. **A indústria têxtil e a qualidade da fibra do algodão**. In: CHANSELME, J. (Ed.). **Manual do Beneficiamento do Algodão**. Cuiabá: ImaMT, 2014. cap. 16, p. 316-337.
- LIMA, J. S. T. *et al.* Estudo da potencialidade do resíduo de exploração e beneficiamento do caulim na produção de metacaulim para uso em concreto substituindo parcialmente o cimento. In: **60º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, 2016.
- LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; LIMA, J. M. F. Mecanismo de fissuração sob tração direta de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal. **ENGEVISTA**, v. 15, n. 1, p. 95-103, 2013.
- LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; NEUMANN, R.; BARROS, J. A. O. Efeito do envelhecimento acelerado sobre as propriedades de microconcreto reforçado com fibras longas de sisal. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 1, p. 7-20, 2019.
- MADEN, B.; RAMSTEDT, E. K. Wood versus Plant Fibers: Similarities and Differences in Composite Applications. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2013.
- MARTINS, M. A.; TEIXEIRA, E. M.; CORRÊA, A. C.; FERREIRA, M.; MATTOSO, L. H. C. Extraction and characterization of cellulose whiskers from commercial cotton fibers. **Journal of Materials Science**, v. 46, n. 24, p. 7858-7864, 2011.
- MARQUES, C. S. **Estudo comparativo do potencial pozolânico de adições argilo-minerais disponíveis no Amazonas e porto velho, utilizando as técnicas de termogravimetria, difração de raios-x e teste de cal saturada**. 139 p., 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2017.

MARQUES, M. G. S. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas e da durabilidade de compósitos cimentícios reforçados com fibra amazônica.** 243 p., 2015. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.

MARQUES, M. S. **Obtenção e Caracterização de um Compósito Polimérico de Matriz de Poliéster e Reforço/Carga de Tecido Plano de Algodão.** 138 p., 2016. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2016.

MÁRTIRES R. A. C. **Sumário Mineral, Caulim.** Série estatísticas e economia mineral, DNPM, 2009.

MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. Cap. 10 In: HEWLETT, P.C. *et al.* **Lea's chemistry of cement and concrete.** 5 Ed., Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, p.471-602, UK, 2008.

MATOS, A. M.; COUTINHO, J. S. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 205-215, 2012.

MAZZA, S. C. **Estudo das Propriedades Mecânicas e da Aderência do Sistema Argamassa de Reparo com Cimento Geopolimérico/Substrato de Concreto com Cimento Portland.** 189 p., 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2010.

MEDINA, E. A. **Pozolanidade do Metacaulim em Sistemas Binários com Cimento Portland e Hidróxido de Cálcio.** 134 p., 2011. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2011.

MELLO, P. C. B.; FONSECA, F. **Arte, Novas Tecnologias e Comunicação: Fenomenologia da Contemporaneidade.** In: BRITES, M. M. *et al.* Fabricação de roupas esportivas com poliamida de alta tecnologia. 1.ed. São Paulo: PMStudium Comunicação e Design, 2010, p. 364-367.

MELO FILHO, J. A. **Durabilidade Química e Térmica e Comportamento Mecânico de Compósitos de Alto Desempenho Reforçados com Fibras de Sisal.** 2012. 161 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - (COPPE/UFRJ). Rio de Janeiro, 2012.

MELO FILHO, J. A.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems. **Cement and Concrete Composites**, v. 40, p. 30-39, 2013.

MERCEDES, L.; GIL, L.; BERNAT-MASO, E. Mechanical performance of vegetal fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 161-173, 2018.

MEYER, L. United States Departmente of Agriculture - USDA. **Cotton and Wool Outlook**, 2017.

MORAIS, C. M. **Estudo da difusão de corantes reativos em tecido de algodão**. 105 p., 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo, 2010.

MOTTA, L. A. C.; GONÇALVES, L. K. S.; SILVA, M. R.; CUNHA, J.; DANTAS, M. E. Painéis sanduíches de poliéster reforçado com fibras de rami para aplicação na Construção Civil. **Revista Matéria**, v. 21, n. 3, p. 796– 806, 2016.

NASCIMENTO, R. M. **Estudo Da Aditivção do Metacaulim de Alta Reatividade, Produzido por Meio do Método de Calcinação Flash em Cimento Portland**. 2009. 88 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

NEVES, K. P. L.; MELO FILHO, J. A. Produção de metacaulinita a partir de caulim da região de Presidente Figueiredo – Am. In: CONTECC – **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia**, 2018.

OLIVEIRA, C. U.; RAMBO, D. A. S.; GOMES, O. F. M.; SALVADOR, R. P.; TOLEDO DIAS, R. D. Compósitos cimentícios reforçados com tecido de sisal: desenvolvimento, caracterização mecânica e tratamento do reforço com nano sílica. In: 60º Congresso Brasileiro do Concreto, 2018.

OLIVEIRA, I. R. C. **Propriedades mecânicas, físicas e químicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras longas de juta e de malva**. 96 p., 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas – (UFAM). Manaus, 2013.

OLIVEIRA, M. S. **Desenvolvimento e Caracterização de Telhas Cimentícias Reforçadas com Tecido de Fibras Vegetais da Amazônia**. 118 p., 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas - (UFAM). Manaus, 2017.

ONUAGULUCHI, O.; BANTHIA, N. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 68, p. 96-108, 2016.

PAZ, S. P. A.; ANGÉLICA, R. S.; NEVES, R. F. Síntese hidrotermal de sodalita básica a partir de um rejeito de caulim termicamente ativado. **Química Nova**, v. 33, n. 3, 579-583, 2010.

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

PIZZOL, V. D. **Carbonatação acelerada: nova tecnologia de cura para fibrocimento sem amianto**. 61p., 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras – (UFLA). Lavras, 2013.

PIZZOL, V. D. *et al.* Mineralogical and microstructural changes promoted by accelerated carbonation and ageing cycles of hybrid fiber–cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 750-756, 2014.

PONTES, J.; SILVA, A. S.; FARIA, P. Contributos para melhoria da durabilidade e sustentabilidade de argamassas e betões – Avaliação da reatividade de pozolanas artificiais. In: **Congresso Construção**, 4, Coimbra, 2012.

PORTELLA, E. H.; ROMANZINIB, D.; ANGRIZANIB, C. C.; AMICOB, S. C.; ZATTERA. Influence of stacking sequence on the mechanical and dynamics mechanical properties of cotton/glass fiber reinforced polyester composites. **Materials Research**, v. 19, p. 542-547, 2016.

PORTELA, G. **Compósito Geopolimérico Reforçado com Tecido de Juta**. 105 p., 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2016.

QUIRINO, M. G. **Estudo de Matriz Polimérica Produzida com Resina Natural e Fibra da Semente de Açaí (Euterpe Precatória)**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2010.

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

RAMBO, D. A. S.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D.; UKRAINCZYK, N.; KOENDERS, E. Tensile strength of a calcium-aluminate cementitious composite reinforced with basalt textile in a high-temperature environment. **Cement and Concrete Composites**, v. 70, p. 183-193, 2016.

REGO, J. H. S. *et al.* Análise da microestrutura e da estrutura porosa de pastas de cimentos compostos com cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina. In: **48º IBRACON – Congresso Brasileiro de Concreto**, 2006.

ROCHA, C. A. A.; CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D. Influence of stone cutting waste and ground waste clay brick on the hydration and packing density of cement pastes. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 6, p. 661-680, 2013.

ROSSA JR, J.; PORTELA, K. F. Adição de Escória de Alto Forno em Argamassas Colantes Tipo AC-I. **Cerâmica**, n. 58, p. 542-548, 2012.

SAHMARAN, M.; CHRISTIANTO, H. A.; YAMAN, I. O. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. **Cement & Concrete Composites**, v.28, p. 432-440, 2006.

SALENTIJJN, E. M. J.; ZHANG, Q.; AMADUCCI, S.; YANG, M.; TRINDADE, L. M. New developments in fiber hemp (*cannabis sativa L.*) breeding. **Industrial Crops and Products**, v. 68, p. 32-41, 2015.

SANCHES, R. A. *et al.* Wearability analysis of knited fabrics produced with colored organic cotton, bamboo rayon, corn, recycled pet/cotton and recycled pet/polyester. **American International Journal of Contemporary Research**, v. 4, p. 28-37, 2014.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. Segunda Edição, v.2. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1992.

SAWSEN, C.; FOUZIA, K.; MOHAMED, B. MOUSSA, G. Effect of flax fibers treatments on the rheological and the mechanical behavior of a cement composite. **Construction and Building Materials**, v. 79, p. 229-235, 2015.

SAWSEN, C.; FOUZIA, K.; MOHAMED, B. MOUSSA, G. Optimizing the formulation of flax fiber-reinforced cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 659-664, 2014.

SCANDIUZZI, L.; ANDRIOLO, F. R. **Concreto e seus Materiais: Propriedades e Ensaio**s. São Paulo: PINI, 1986.

SHAHZAD, A. Hemp fiber and its composites – a review. **Journal of Composite Materials**, v. 46, n. 8, p. 973-986, 2011.

SEGAL, L.; CREELY, J. J.; MARTIN, A. E.; CONRAD, C M. An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-ray Diffractometer. **Textile Research Journal**, Princeton, p. 786-794, 1959.

SEPE, R.; BOLLINO, F.; BOCCARUSSO, L. CAPUTO, F. Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 133, p. 210-217, 2018.

SILVA, E. MARQUES, M. FORNARI Jr., C. Aplicação de fibra de coco em matrizes cimentícias. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 8, p. 1555-1561, 2012.

SILVA, F. D. 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, E. J.; VELASCO, F. G.; LUZARDO, F. M.; MARQUES, M. L.; MILIAN, F. M.; RODRIGUES, L. B. Cement composite with high content treated coconut fiber: physical properties and Durability. **Revista Matéria**, v. 23, n. 3, 2018.

SLISERIS, J.; YAN, L.; KASAL, B. Numerical modelling of flax short fibre reinforced and flax fibre reinforced polymer composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 89, p. 143-154, 2016.

SPINACÉ, M. A. S.; LAMBERT, C. S.; FERMOSELLI, K. K. G.; DE PAOLI, M. A. Characterization of Lignocellulosic Curaua Fibres. **Carbohydrate Polymers**, v. 77, p. 47-53, 2009.

SONESSO, M. F. C. **Obtenção e Caracterização de Nanocristais de Celulose a Partir de Algodão Cru e Polpa Kraft**. 111 p., 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

SOKOLOVICZ, B. C.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Concreto com cinza de casca de arroz natural: estudo da penetração de cloretos em protótipos de concreto. In: **X CONPAT**

– **Congreso Latinoamericano De Patología Y XII Congreso De Calidad En La Construcción**, 2009.

SOUZA, E. P.; SOARES, N. S.; ALVES, A. V. S.; SILVA, M. L. Competitividade dos produtores de sisal da Bahia. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 49, n. 3, p. 39-49, 2018.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**, 2. ed. London: Thomas Telford, 1997, 459 p.

TEIXEIRA, E. M.; OLIVEIRA, C. R.; MATTOSO, L. H. C.; CORRÊA, A. C.; PALADIN, P. D. Nanofibras de Algodão Obtidas sob Diferentes Condições de Hidrólise Ácida. **Polímeros**, v. 20, p. 264-268, 2010.

TIAN, H.; CUI, Y. H.; ZHANG, Y. X.; YANG, C. The application of general self-consistent model on mechanical behaviour of fibre-reinforced cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 114-121, 2017.

TONOLI, G. H. D.; SANTOS, S. F.; JOAQUIM, A. P.; SAVASTANO JR., H. Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre. **Construction and Building Materials**, v. 2, p. 193-201, 2010.

VARELA, P. H. A. Obtenção, caracterização e aplicabilidade de um compósito com matriz de resina ortoftálica e reforços de tecidos de juta (*Corchorus Capsularis*) hibridizado com fibra de vidro. 120 p., 2017. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

WANG, K.; SHAH, S. P.; PHUAKSUK, P. Plastic Shrinkage Cracking in Concrete Materials-Influence of Fly Ash and Fibers. **Materials Journal**, v. 98, n. 6, p. 458-464, 2001.

WEBER, A. M. **Viabilidade Técnica da Utilização de Fibra de Curauá (Ananas Erectifolius) como Reforço em Compósitos Cimentícios Laminados**. p. 117., 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

WEI, J.; MEYER, C. Degradation of natural fiber in ternary blended cement composites containing metakaolin and montmorillonite. **Corrosion Science**, v. 120, p. 42-60, 2017.

WEI, J. Degradation behavior and kinetics of sisal fiber in pore solutions of sustainable cementitious composite containing metakaolin. **Polymer Degradation and Stability**, v. 150, p. 1-12, 2018.

WEI, J. **Durability of Cement Composites Reinforced with Sisal Fiber**. 252 p., 2014. Tese (Doutorado) – Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Columbia University. New York, 2014.

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

WILLE, K.; EL-TAWIL, S.; NAAMAN, A. E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. **Cement and Concrete Composites**, v. 48, p. 53-66, 2014.

WONG, H. S.; RAZAK, H. A. Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance. **Cement and Concrete Research**, v.35, p. 696-702, 2005.

YAN, L.; CHOUW, N.; JAYARAMAN, K. Effect of UV and water spraying on the mechanical properties of flax fabric reinforced polymer composites used for civil engineering applications. **Materials & Design**, v. 71, p. 17-25, 2015.

YAN, L.; CHOUW, N. Effect of water, seawater and alkaline solution ageing on mechanical properties of flax fabric/epoxy composites used for civil engineering applications. **Construction and Build Materials**, v. 99, p. 118-127, 2015.

YAN, L.; CHOUW, N. Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column. **Construction and Build Materials**, v. 40, p. 1118-1127, 2013.

YAN, L.; CHOUW, N.; JAYARAMAN, K. Flax fibre and its composites – a review. **Composites Part B**, v. 56, p. 296-317, 2014.

ZONATTI, W. F.; GUIMARÃES, B. M. G.; DULEBA, W.; RAMOS, J. B. Thermoset composites reinforced with recycled cotton textile residues. **Textiles and Clothing Sustainability**, v. 1, p. 1-12, 2015.