

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA À FLEXÃO EM PLACAS CIMENTÍCIAS
REFORÇADAS COM TECIDOS DE FIBRAS DE MALVA E JUTA**

STEFANNY DI SAMUEL DA SILVA COSTA

MANAUS - AM

2021

STEFANNY DI SAMUEL DA SILVA COSTA

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA À FLEXÃO EM PLACAS CIMENTÍCIAS REFORÇADAS
COM TECIDOS DE FIBRAS DE MALVA E JUTA

*Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de
Materiais, como requisito para
obtenção do título de Mestre em
Ciência e Engenharia de
Materiais.*

*Linha de pesquisa: Propriedades
Físicas, Mecânicas e Modelagem
de Materiais*

Orientador: Prof. Dr. Jean Carlos Silva Andrade

Coorientador: Prof Dr. João de Almeida Melo Filho

MANAUS – AM

2021

Ficha Catalográfica

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

Costa, Stefanny Di Samuel da Silva
D111c Caracterização mecânica à flexão em placas cimentícias
reforçadas com tecidos de fibras de de Malva e Juta /
Stefanny Di Samuel da Silva Costa . 2021
94 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Jean Carlos Silva Andrade
Coorientador: João de Almeida Melo
Filho

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de
Materiais) -Universidade Federal do Amazonas.

1. Fibras da Amazônia. 2. Tecidos fibrosos. 3. Metacaulim.
4. Hidróxido de Cálcio. I. Andrade, Jean. II. Universidade
Federal do Amazonas III. Título

STEFANNY DI SAMUEL DA SILVA COSTA

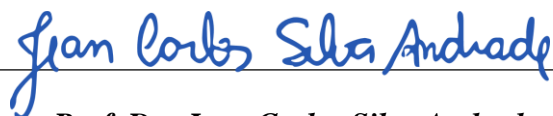
CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA À FLEXÃO EM PLACAS CIMENTÍCIAS REFORÇADAS
COM TECIDOS DE FIBRAS DE MALVA E JUTA

*Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de
Materiais, como requisito para
obtenção do título de Mestre em
Ciência e Engenharia de
Materiais.*

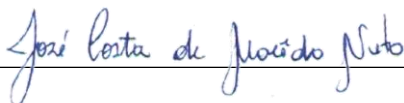
*Linha de pesquisa: Propriedades
Físicas, Mecânicas e Modelagem
de Materiais*

Aprovado em 17 de agosto de 2021.

BANCA EXAMINADORA



**Prof. Dr. Jean Carlos Silva Andrade,
Universidade Federal do Amazonas**



**Prof. Dr. José Costa Macedo Neto
Universidade do Estado do Amazonas**



**Prof. Dra. Luciane Farias Ribas
Centro Universitário Fametro**

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais, Samuel e Lúcia, ao meu noivo Thiago Caminha, minha amiga Larissa Brandão e os demais amigos!

Algumas coisas ruins acontecem
em nossas vidas para nos colocar
na direção das melhores coisas que
podíamos viver.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, acima de tudo, a Deus, pela força dada durante todos esses meses no processo de pós-graduação,

À Universidade Federal do Amazonas (UFAM), nosso maior patrimônio, e ao PPGCEM que me proporcionou o caminho para a realização de mais esse sonho. O profissional que sou hoje devo a minha querida UFAM.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), a qual auxiliou financeiramente uma parcela desta jornada.

Aos professores que contribuíram para a minha formação, em especial a meu orientador, professor Dr. Jean Andrade (obrigada por ter me aceitado e ter confiado em mim no meio desta jornada do mestrado e além disso, por toda a compreensão.

Ao professor Dr. João Melo Filho (muito obrigada por estar caminhando nessa jornada comigo desde meu trabalho de conclusão de curso, muito obrigada por sempre ser tão solícito, por toda a paciência e confiança). Muito obrigada por ter sido meu braço direito e esquerdo durante todo o período de pesquisa na pandemia! O senhor além de um guia, é um amigo e é um espelho como pessoa que eu quero ser quando crescer! Não teria conseguido concluir meu mestrado sem o senhor para me auxiliar.

À professora Dra. Samantha Coelho e ao professor Dr. Otávio Paiva. Agradeço por todo o apoio, por toda a disposição em sanar dúvidas.

A todos os meus colegas do mestrado por também estarem sempre a disposição de ajudar em momentos difíceis.

Ao curso de Geologia por me proporcionar a utilização da mufla do laboratório de laminação e pelos ensaios de difratometria, um muitíssimo obrigado ao ser José Glauco e ao Alfredo por tudo.

Agradeço também ao Professor Sérgio e ao Professor Rafael do curso de Engenharia Química da Universidade do Estado do Amazonas pela realização do ensaio de FTIR.

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia – INPA, especialmente ao laboratorista Lucas, pela realização do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura.

Agradeço ao Serviço Geológico do Brasil – CPRM, pela realização dos ensaios

de Granulometria a Laser.

Agradeço ao coordenador do Laboratório de Estruturas e Materiais da UEA, Professor Dr. Otávio Paiva por ter possibilitado a utilização deste laboratório durante minha pesquisa.

Agradeço ao Prof Dr. Lizandro e ao técnico Mitsuo por terem disponibilizado a utilização da prensa do seu grupo de pesquisa do IFAM.

Agradeço a minha psicóloga Danielle Miranda, por ter mudado minha vida desde o momento que eu a procurei, pedindo ajuda para entender a minha cabecinha pensante (rs). Sem você, tenho certeza que os obstáculos para vencer esta jornada chamada mestrado seriam enfrentados de uma maneira minha mais complicada.

E por fim agradeço a mim mesma que apesar de estar vivendo em um ano de pandemia consegui concluir meu trabalho da melhor forma possível. E principalmente, sem desistir.

RESUMO

A utilização de fibras naturais como reforço em matrizes cimentícias é uma alternativa renovável e de baixo custo que gera compósitos com menor densidade e maior tenacidade. Dentre as diversas fibras produzidas no Brasil, podemos destacar as fibras de juta e malva, produzidas em larga escala no município de Manacapuru no Estado do Amazonas. Tais fibras tem grande potencial de aplicação em compósitos para a construção civil devido a suas propriedades mecânicas satisfatórias. Desta forma, este trabalho tem por objetivo analisar o desempenho de placas cimentícias reforçadas com fibras de juta e malva quanto ao número de camadas e o tipo de tratamento. Inicialmente o caulim foi coletada no km 35 da BR 174, posteriormente foi calcinada a 700 °C por 2 horas. Em seguida a metacaulim produzida foi submetida a ensaios físico-químicos para sua caracterização e por fim foi adicionada na matriz cimentícia a fim de reduzir o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Para determinação das suas propriedades físico-mecânicas a matriz cimentícia foi submetida a ensaios físico mecânicos e após isso, foram produzidas placas com substituição parcial do cimento Portland por metacaulim reforçadas com 3, 4 e 5 camadas de tecidos fibrosos tratados com 2 tipos de tratamentos que foram analisadas por seu comportamento a flexão. Por fim, a análise mecânica indicou que os compósitos moldados com 4 camadas de tecidos fibrosos e tratamento com resina acrílica apresentou tenacidade superior aos demais.

Palavras-Chave: Compósitos Cimentícios. Metacaulim. Juta e Malva. Resistência à flexão.

ABSTRACT

The use of natural fibers as reinforcement in cementitious matrices is a renewable and low-cost alternative that generates composites with lower density and greater tenacity. Among the various fibers produced in Brazil, we can highlight the fibers of jute and mallow, produced on a large scale in the municipality of Manacapuru in the State of Amazonas and with great potential for application in composites for civil construction due to their satisfactory mechanical properties. Thus, this work refers to the bending mechanical analysis of cementitious slabs reinforced with jute and mallow fibers. Initially, kaolin was collected at km 35 of BR 174, later it was calcined at 700 °C for 2 hours. Afterwards, the metakaolin produced was submitted to physicochemical tests for its characterization and, finally, it was added to the cement matrix in order to reduce calcium hydroxide (Ca(OH)₂). To determine its physical-mechanical properties, the cementitious matrix was subjected to tests. After optimizing the developed composite, plates were produced with partial replacement of Portland cement by metakaolin, reinforced with 3, 4 and 5 layers of fibrous fabrics treated with 2 types of treatments that were analyzed for their bending behavior. Finally, the mechanical analysis indicated that the composites molded with 4 layers of fibrous fabrics and treated with acrylic resin showed higher tenacity than the others.

Keywords: Cement composites. Metakaolin. Jute and Mauve fabrics. Flexural strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Hastes das fibras de malva sendo emersas em água	23
Figura 2 - Estrutura Cristalina	27
Figura 3 - Depósitos de caulim do Brasil	28
Figura 4 - Depósitos de caulim na região metropolitana de Manaus	28
Figura 5 - O empilhamento de sucessivas camadas de reforço com fibras orientadas para um compósito laminar	33
Figura 6 - Tipos de distribuição de reforço fibroso: a) Fibras curtas distribuídas aleatoriamente, b) Fibras contínuas unidirecionais e c) Fibras contínuas bidimensionais.	34
Figura 7 - Materiais compósitos quanto ao seu tipo de reforço.....	34
Figura 8 - Geometrias testadas: a) tecidos simples; b) tecido "tricotado" e; c) tecido "tricotado" em ziguezague	35
Figura 9 - Esquema de comportamento de um compósito submetido à flexão: a) sem reforço fibroso e b) com reforço fibroso c) caminhamento da trinca 1- deslocamento; 2 - interceptação; 3- arrancamento; 4- fratura da fibra	38
Figura 10 - Comportamento de compósitos fibrosos: frágil (a), strain softening (b) e strain hardening (c).....	39
Figura 11 - Representação esquemática da resposta típica de um CRT sob tração.....	40
Figura 12 - Testes de arrancamento para determinar a aderência do (a) fio e (b) tecido ..	41
Figura 13 - Compósitos com teor de 6% de fibra de sisal: a flexão (a) e a tração (b).....	42
Figura 14 - Fluxograma da Pesquisa	44
Figura 15 - Granulometro a Laser	46
Figura 16 - Jazida de Caulim, Igarapé Cabeça Branca.....	47
Figura 17 - Torrões de Caulim	48
Figura 18 - Caulim em consistência pastosa e na peneira 75 µm.....	48
Figura 19 - Sedimentação das partículas de caulim.....	49
Figura 20 - Secagem da pasta de caulim na estufa a 110 °C	49
Figura 21 - Caulim após secagem em estufa	49
Figura 22 - Argila sendo calcinada.....	50
Figura 23 - Mufla Linn	50
Figura 24 - TGA 50 Shimadzu	51
Figura 25 - Espectrofotômetro de Raios X	52
Figura 26 - Corte do tecido de juta e malva.....	53
Figura 27 - Resina Acrílica.....	53
Figura 28 - Impermeabilizante de tecidos	54
Figura 29 – Ensaio de Flow Table.....	55
Figura 30 - Pasta com Metacaulim	57
Figura 31 - Pasta unicamente cimentícia	57
Figura 32 - Máquina Universal CONTENCO	58
Figura 33 - Produção da placas reforçadas com tecidos fibrosos.....	59

Figura 34 - Regularização de camada cimentícia	60
Figura 35 - Prensa para ensaio de tração na flexão	61
Figura 36 - Análise da tensão para o ensaio de 4 pontos.....	61
Figura 37 - Curva de Distribuição Granulométrica	63
Figura 38 - Curva de perda de massa e DTG do CPlI F 32.....	64
Figura 39 - Difratoograma do CPlI-F-32	66
Figura 40 - Curva de distribuição granulométrica.....	67
Figura 41 - Curva de perda de massa de DTG do Caulim.....	68
Figura 42 - Curva de perda de massa e DTG do Metacaulim.....	69
Figura 43 - Difratoograma do Caulim e Metacaulim	72
Figura 44 - Curva de perda de massa e DTG da pasta cimentícia.....	75
Figura 45 - Curva de perda de massa da pasta 50M	75
Figura 46 - CP de matriz de cimento	76
Figura 47 - CP com 50% de metacaulim.....	76
Figura 48 - Gráfico de Resistência à compressão da argamassa com 50% de MK.....	77
Figura 49 - Gráfico de Resistência à compressão da argamassa MCIM.....	78
Figura 50 - Curvas típicas de tensão x deflexão dos compósitos sem tratamento.....	79
Figura 51 - Placa cimentícia com 3 camadas (M0T0).....	80
Figura 52 - Placa com 5 camadas não tratadas (M505T0)	80
Figura 53 - Detalhes de rompimento da M505T0	81
Figura 54 - Curvas típicas de tensão x deflexão dos compósitos tratados.....	81
Figura 55 - Placa com 4 camadas t1 (M504T1)	82
Figura 56 - Placa com 4 camadas t2 (M504T2)	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores que afetam a qualidade da fibra	21
Tabela 2 - Análise química comparativa da fibra de Juta com a fibra de Malva.....	23
Tabela 3 - Valores de referência de algumas fibras	25
Tabela 4 - Quantidade de materiais utilizados na dosagem da argamassa	55
Tabela 5 - Traço e Nomenclatura dos Compósitos	60
Tabela 6 - Grandezas granulométricas do material.....	63
Tabela 7 - Composição Química do CP II F.....	64
Tabela 8 - Grandezas granulométricas do material.....	67
Tabela 9 - Composição química da Caulinita e da Metacaulim.....	69
Tabela 10 - Resist. à compressão da matriz unicamente de cimento Portland	77
Tabela 11 - Resistência à compressão da matriz com metacaulim.....	77
Tabela 12 - Valores médios de tensão e deflexão do ensaio de flexão dos compósitos	79
Tabela 13 - Valores médios de tensão e deflexão do ensaio de flexão dos compósitos	82

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
CEPED	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DTG	Termogravimetria Derivada
INPA	Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
KM	Quilometro
PPGCEM	Programa de Pós Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais
TA	Análise Térmica Diferencial
NBR	Norma Brasileira
UEA	Universidade do Estado do Amazonas
UFAM	Universidade Federal do Amazonas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	19
1.1.1 Geral.....	19
1.1.2 Específicos	19
2. REVISÃO E LITERATURA.....	20
2.1. FIBRAS NATURAIS VEGETAIS.....	20
2.1.1. Fibras de malva	22
2.2. COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS FIBRAS NATURAIS	24
2.3. TRATAMENTO DAS FIBRAS VEGETAIS.....	25
2.4. POZOLANA	25
2.5. METACAULIM.....	31
2.6. INTERFACE FIBRA- MATRIZ.....	31
2.7. COMPÓSITOS LAMINADOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS VEGETAIS	32
2.8. MATRIZ CIMENTÍCIA PARA COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS	35
2.9. COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS.....	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1. Materiais Utilizados	44
3.1.1. Cimento Portland.....	44
3.1.1.1. Granulometria a Laser	44
3.1.1.2. Granulometria a Laser	45
3.1.1.3. Fluorescência de Raios X	47
3.1.2. Produção do Metacaulim	48
3.1.2.1. Coleta de Caulim.....	49
3.1.2.2. Granulometria a Laser	50
3.1.2.3. Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial	51
3.1.2.4. Fluorescência de Raios X	52
3.1.2.5. Difração de Raios X	52
3.1.3. Reforço Fibroso.....	53
3.1.3.1. Preparo dos Tecidos de fibras de Malva	53
3.1.3.2. Tratamento	53
3.1.4. Produção da Matriz Cimentícia	54

3.1.4.1. Ensaio de Consistência da Pasta	54
3.1.4.2. Confeção da Matriz Cimentícia	55
3.1.4.3. Análise Termogravimétrica nas Pastas	56
3.1.4.4. Resistência à Compressão	57
3.1.5. Produção dos Compósitos	58
3.1.6. Caracterização mecânica dos compósitos de fibrocimento	59
3.1.6.1. Resistência à flexão em 4 pontos.....	60
3.2. CARACTERIZAÇÃO FÍS-QUIM DOS MAT. UTIL. NA PESQ.....	62
3.2.1. Cimento Portland.....	62
3.2.1.1. Granulometria a Laser	62
3.2.1.2. Termogravimetria e a Análise Térmica Diferencial.....	63
3.2.1.3. Fluorescência de Raios X	64
3.2.1.4. Difratomia de Raios X (DRX).....	65
3.2. Metacaulim.....	66
3.2.2.1. Granulometria a Laser	66
3.2.2.2. Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial	67
3.2.2.3. Fluorescência de Raios X	69
3.2.2.4. Difratomia de Raios X.....	71
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	74
4.1. MATRIZ CIMENTÍCIA	74
4.1.1. Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial	75
4.1.2. Resistência à compressão	76
4.1. Cimento Portland.....	76
4.1.1. Granulometria a Laser	76
4.2. ANÁLISE DOS COMPÓSITOS REF. COM TEC. DE FIBRA DE JUTA E MALVA.....	78
4.2.1. Influência do Número de Camadas.....	78
4.2.2. Influência dos tratamentos nas Fibras.....	81
5. CONCLUSÃO	84
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade existem relatos sobre a utilização de fibras como reforço de materiais de construção. Sabe-se que o Amazonas desponta com expressivo número de biodiversidade, composta pela vasta biomassa de sua floresta que possuem propriedades semelhantes às fibras sintéticas e são adequadas para serem utilizadas como reforço em produtos confeccionados para a construção civil.

Nos dias de hoje, estudos intensivos têm sido desenvolvidos com o objetivo de encontrar uma fibra que possa substituir eficientemente a fibra de asbesto. Essa fibra, utilizada na produção do cimento amianto, ainda é utilizada em países em desenvolvimento, pelo seu baixo custo e boas características mecânicas, mas traz sérios malefícios à saúde humana e animal (ABREA, 2016).

Na engenharia civil, os compósitos mais empregados são aqueles a base de cimento, utilizados sob a forma de concreto com fibras, de argamassa armada (ferrocimento) e de cimento amianto (fibrocimento). Apesar de conhecido há muito tempo, o concreto com fibra representa somente uma pequena porcentagem do concreto produzido no mundo (ARRUDA FILHO, 2012).

Dentre os materiais compósitos, os laminados cimentícios apresentam grande potencial de aplicação na construção civil devido sua facilidade de aplicação (vedação, cobertura, pisos e etc.) e seus desempenhos mecânicos satisfatórios.

Entretanto, apesar dos laminados cimentícios apresentarem boas resistências aos esforços de compressão, sua matriz é frágil e não suporta grandes solicitações de tração, flexão e cargas dinâmicas. Para compensar esta deficiência, reforcá-los com fibras tanto vegetais quanto sintéticas, é uma solução realizada desde a antiguidade.

Atualmente, as fibras naturais vegetais passaram a ser uma alternativa como reforço de matrizes cimentícias, uma vez que, as fibras vegetais, como podemos citar o curauá (WEBER, 2018), a malva e a juta (GOMES, 2019), são renováveis, biodegradáveis, não prejudiciais à saúde, de baixo custo de produção e ainda possuem ótimo desempenho físico-mecânico para serem aplicadas na construção civil, principalmente, em elementos de cobertura e revestimento.

As fibras vegetais podem ser utilizadas como reforço em matriz cimentícias, em configurações variadas, como em forma de fibras longas alinhadas, fibras curtas

distribuídas aleatoriamente, fibras em forma de polpa e tecidos. Sabe-se que 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).

Além disso, a utilização de fibras naturais vegetais na construção civil motivaria o aumento de sua produção anual, gerando, assim, novos empregos e favorecendo o desenvolvimento das regiões onde são cultivadas. No Brasil, a maior ocorrência do cultivo da juta e malva encontra-se no município de Manacapuru, no estado do Amazonas.

Estudos recentes realizados por (Gomes (2019), Aguiar (2016); Rodrigues (2015); Fidelis (2014); Oliveira (2013); Melo Filho (2012)), exibem resultados promissores na utilização de fibras de juta, malva e sisal como reforço de matrizes cimentícias. Dessa maneira, para exemplificação da capacidade promissora das fibras vegetais naturais, podemos citar Gomes (2019) que estudou placas reforçadas com 2 e 4 camadas tecidos de fibras de juta e malva e substituição parcial do cimento Portland por metacaulim e obteve um aumento na quantidade de fissuras do compósito quanto maior foi a camada, indicando uma melhor distribuição de tensões na matriz produzidas pelo tecido.

Entretanto, com relação ao uso das fibras naturais vegetais existem alguns fatores críticos quanto à sua durabilidade na matriz cimentícia, ocasionados principalmente, pelos produtos de hidratação do cimento, em especial, o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), que migram para as 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).

Tendo em vista, o aumento da durabilidade dos compósitos e a não degradação da fibra pela alcalinidade da matriz, autores como Fidelis (2014), Melo Filho (2012), Melo Filho (2005) sugerem alterações na matriz por substituição parcial do cimento por material pozolânico, além de um tratamento nas fibras de forma a impermeabilizá-las, impedindo, assim, o contato direto com a matriz e absorção da água de hidratação, fatores estes que diminuem seu desempenho.

Com o objetivo de minimizar o ataque alcalino às fibras vegetais, Melo Filho (2012), desenvolveu uma matriz livre de hidróxido de cálcio, substituindo parcialmente

cimento Portland por 50 % de metacaulinita. Já Fidelis (2014), realizou substituição parcial do cimento por metacaulinita e cinza volante.

Tendo em vista o grande potencial de fibras naturais vegetais como reforço em placas a base de cimento e os escassos estudos utilizando fibras lignocelulósicas em forma de tecido, o interesse deste trabalho é analisar o desempenho de placas cimentícias reforçadas com fibras de juta e malva quanto ao número de camadas e o tipo de tratamento. Para se iniciar esta pesquisa foi necessária uma fundamentação teórica, onde observou-se os trabalhos anteriores no que se refere a compósitos cimentícios reforçados com tecidos de fibras natural, como também tratamentos e desempenho mecânico.

Quanto à descrição metodológica, deu-se ênfase a característica dos materiais para assim ter um conhecimento amplo da função de cada material empregado no compósito.

E por fim para conhecer os compósitos utilizados nesta pesquisa, seu desempenho mecânico será fundamentado através de ensaios de flexão, para análise de suas características e desempenho.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Analisar o desempenho de placas cimentícias reforçadas com fibras de juta e malva quanto ao número de camadas e o tipo de tratamento.

1.1.2 Específicos

- Produzir metacaulim através da calcinação da caulim, tendo em vista o potencial econômico das jazidas presentes no nosso estado;
- Avaliar o tratamento das fibras mais eficaz para a utilização em matriz cimentícia;
- Desenvolver e caracterizar uma matriz cimentícia de baixa alcalinidade, através da substituição parcial do cimento Portland pela a pozolana metacaulim;
- Avaliar o efeito de número de camadas do tecido fibroso nas propriedades de flexão das placas cimentícias.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. FIBRAS NATURAIS VEGETAIS

Caetano *et al.* (2004) definiram fibras vegetais como estruturas alongadas de secção transversal vazada e arredondadas, distribuídas por todo vegetal podendo ser classificadas de acordo com a parte da planta que será obtida em: fibras de folha, fibras de talo, fibras de superfície e fibras de lenho.

As fibras obtidas do caule são formadas por feixes de fibras, cada um contendo fibrocélulas individuais ou filamentos. Fibras de juta, malva, cânhamo e linho são exemplos desse tipo. Fibras das folhas, como o sisal e a banana, possuem diâmetro superior aos das fibras oriundas do caule. O algodão é um exemplo de fibra de sementes e a fibra de coco de fibra proveniente do fruto. Há ainda outras fontes de lignocelulose, que pode ser obtida através de resíduos agrícolas, como o bagaço da cana de açúcar, casca da semente de girassol e da casca do arroz (THOMAS *et al.*, 2011).

De acordo com Dittenber *et al.* (2012), as principais vantagens na utilização das fibras vegetais é que estas são de fácil manuseio, boas propriedades mecânicas e demandam de menos energia no processo de produção, além de serem fontes renováveis e biodegradáveis. Devido ao esgotamento de recursos petroquímico, e ao crescimento do interesse das indústrias da construção civil por materiais sustentáveis, o desenvolvimento de materiais compósitos reforçados com fibras vegetais vem crescendo nos últimos anos. Ademais, a utilização de materiais naturais acoplada a modernas técnicas de construção pode reduzir os resíduos de construção, aumentar a eficiência de energia e ao mesmo tempo promover o conceito de sustentabilidade.

John *et al.* (2008) relatou que as fibras naturais são por si mesmas materiais compósitos naturais. Dispõem de estrutura complexa, formadas por uma fina parede primária e por uma parede secundária constituída por três camadas, sendo que a camada de espessura média determina as propriedades mecânicas da fibra. Entretanto Thomas *et al.* (2011) descreveram as fibras vegetais como tubos microscópicos, onde o lúmen está entre as paredes celulares.

As paredes celulares são constituídas por microfibrilas de diâmetro entre 10 e 30 mm e são constituídas de 30 a 100 moléculas de celulose, unidas por uma matriz de lignina e hemicelulose que apresentam diferentes orientações em cada parede celular (JOHN *et al.*, 2008, THOMAS *et al.*, 2011, DITTENBER *et al.*, 2012).

A celulose é um polissacarídeo composto de carbono, oxigênio e hidrogênio. Durante a síntese da celulose, as ligações poliméricas foram longas cadeias de maneira que as moléculas ficam próximas por meio de longos segmentos, originando fortes ligações químicas secundárias intermoleculares, as quais são responsáveis pela grande resistência dos materiais celulósicos. Desta forma, o módulo de resistência à tração é diretamente proporcional ao teor de celulose das fibras (TOMCZAK, 2010).

A hemicelulose é o complexo de maior ocorrência na biosfera depois da celulose. É um polissacarídeo com baixa massa molar, interceptado por microfibrilas de celulose que favorecem a elasticidade e evitam que as microfibrilas se toquem (BENINI, 2011). A lignina é responsável pela ligação dos filamentos que formam um feixe e a pectina liga esse feixe à haste. Como a lignina e a pectina são polímeros mais fracos que a celulose, os mesmos devem ser removidos quando as fibras são utilizadas como reforço em compósitos (DITTENBER *et al.*, 2012).

A qualidade da fibra, em diferentes estágios pode ser afetada por diversos fatores, como apresentado na Tabela 1 (FIDELIS, 2014). A forma, o tamanho e a resistência mecânica das fibras naturais podem variar amplamente, dependendo do ambiente de cultivo, da região de origem e de outras características (OCHI, 2008).

Tabela 1 - Fatores que afetam a qualidade da fibra

Estágio	Fatores que afetam a qualidade da fibra
O crescimento das plantas	<p>Espécie da planta;</p> <p>Cultivo;</p> <p>Localização do cultivo;</p> <p>Localização da fibra na planta;</p> <p>Clima local.</p>

Colheita	Maturação fibra, obtida através da: - Espessura da parede celular; - Aspereza das fibras.
Extração da fibra	Processo de decorticação; Método de maceração.
Fornecimento	Condições de transporte; Condições de armazenamento; Idade da fibra

FONTE: Fidelis (2014)

2.1.1. Fibras de juta e malva

O Brasil é produtor de inúmeros tipos de fibras, dentre estas, podem citar a malva. Tal fibra pode perfeitamente se enquadrar na utilização industrial. As plantas de malva e juta são cultivadas grandemente nos estados do Amazonas e Pará, pois, necessita para seu desenvolvimento um clima quente e úmido com períodos alternados de sol e chuva. Possuem grande importância econômica nestas regiões e aponta, através de resultados preliminares, excelentes propriedades a serem exploradas, todavia, ainda apresenta poucos estudos realizados sobre as suas características e propriedades estruturais (MARGEM *et al.*, 2012).

No estado do Amazonas, o principal produtor de juta e malva, é o município de Manacapuru, onde a semeadura começa logo após o período das cheias, nas áreas de várzeas que afloram à beira do rio Solimões, à medida que o rio baixa. Segundo Toledo (2010), muitas das vezes as sementes são lançadas ainda na lama, sempre depois de julho. As longas hastes, que se erguem do solo sem que nenhum adubo lhes seja ofertado, são cortadas a golpes de terçado, e depois são imersas as hastes na água do próprio rio para assim separar as fibras do caule (FIGURA 1). O processo não admite interrupções, pois logo vem às chuvas, o rio sobe novamente, e o ciclo recomeça.

De acordo com Leão (2010), secretário executivo do Instituto de Fibras da Amazônia (IFIBRAM), a importância da produção da juta e malva amazônica é fato indiscutível assim como a sua influência no desenvolvimento social da região, aliada à

influência básica no desenvolvimento econômico. As fibras de juta e malva extraídas artesanalmente das hastes longilíneas são usadas como matéria-prima, sobretudo para a confecção de sacaria para café e batata, pois é capaz de controlar a umidade desses produtos. A produção das fibras tem sido valorizada por conta da sustentabilidade de sua cadeia produtiva, por serem naturais, portanto biodegradáveis e obtidas sem insumos químicos, elas são uma alternativa ecológica para a confecção de embalagens e sacarias.

Figura 1 - Hastes das fibras de malva sendo emersas em água



FONTE: Globo Rural (2017)

A fibra de malva, pertencente à família das fibras longas, a exemplo do linho, juta, sisal e cânhamo. Apresenta alta resistência considerada três vezes superior à do cânhamo, quatro vezes à do linho e oito vezes à do algodão. A malva e a juta são plantadas em sistema de consórcio, ambas em terras muito férteis, sendo que a juta em várzea baixa e a malva em várzea alta. Quando comparada a juta, a malva origina uma fibra menos sedosa e brilhante, porém de maior resistência (ZHAO-TIE *et al.*, 2007; SABBÁ, 1993 *apud* MARGEM, 2013).

Na Tabela 2 pode ser visualizada uma análise química comparativa realizada por Oliveira (2013) entre as fibras de juta e malva.

Tabela 2 - Análise química comparativa da fibra de Juta com a fibra de Malva

Constituintes Químicos	Espécies			
	<i>Fibras de juta</i>		<i>Fibras de malva</i>	
	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)
Celulose	66,33	0,0018	69,36	0,0013
Hemicelulose	24,83	-	21,28	-
Lignina	10,49	0,0324	13,55	0,0649
Extrativos Totais	5,71	0,0332	7,55	0,0636

FONTE: Oliveira (2013)

As fibras de malva são frequentemente empregues na confecção de papel, vestuário e tecidos para estofados e tapetes, principalmente, na confecção de sacaria para acondicionar produtos como açúcar, café, castanha de caju e cacau, e apresenta grande potencial de utilização na construção civil. Entretanto, sua maior utilização é, sobretudo, na confecção de sacaria para acondicionar produtos como açúcar, café, castanha de caju e cacau. E recentemente, vem despertando interesse de pesquisadores como grande potencial de reforço em compósitos poliméricos utilizados na construção civil (SAVASTANO JR., 2000).

Segundo Martins Neto (2011), a fibra de malva por ser um material renovável, abundante, com baixo custo de produção, apresentar boas propriedades mecânicas, não ser tóxica, biodegradável, dentre outras inúmeras vantagens tem ainda potencial de aplicabilidade em matrizes cimentícias para utilização na construção civil.

Pioneiramente, Savastano Jr. (2000) realizou pesquisas com a fibra e comprovou que a argamassa reforçada com fibras de malva apresenta desempenho e propriedades mecânicas superiores as argamassa sem incorporação de fibras.

Da mesma forma Martins Neto (2011) realizou estudos que comprovaram que a adição dessas fibras, em matrizes cimentícias, altera positivamente o desempenho mecânico dos corpos de prova quando ensaiados sob flexão em três pontos. Em seu estudo, os corpos de prova da matriz sem adição de fibras sofreram ruptura brusca enquanto os corpos de prova reforçados com fibras curtas desempenharam um comportamento mecânico favorável pós-fissuração, conferindo ao compósito uma tenacidade e uma pseudo ductilidade já esperada. Este mesmo autor ainda verificou que o compósito a base de cimento reforçado com fibras de malva de comprimento 25 mm, apresentou o melhor desempenho na deformação, antes do aparecimento da primeira fissura.

2.2. COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS FIBRAS NATURAIS

As propriedades mecânicas das fibras naturais apresentam grande variação e dependem de fatores como: diâmetro da fibra, estrutura, grau de polimerização, estrutura cristalina, origem (caule, folha, fruto e semente) e das condições de crescimento. Além das características das fibras, a forma de obtenção da área e condições de ensaios também afetam os resultados. Parâmetros como: precisão da instrumentação, taxa de deformação, tipo de garra, comprimento e flexibilidade da máquina são exemplos de fatores que

influenciam os resultados de resistência mecânica (THOMAS *et al.*, 2011, SILVA *et al.*, 2008). A Tabela 3 apresenta valores de referência para algumas fibras.

Tabela 3 - Valores de referência de algumas fibras

Fibra	Densidade (g/cm³)	Resistência à Tração (Mpa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Deformação (%)	Referência
Coco	1,25	192 ± 37	3,44	42,4 ± 14	DEFORIT <i>et al.</i> , 2010
Bambu	1,38 ± 0,02	813 ± 94	33,37	2,9 ± 0,7	DEFOIRT <i>et al.</i> , 2009
Juta	1,39 ± 0,05	399 ± 100	26,25	1,6 ± 0,3	DEFOIRT <i>et al.</i> , 2010
Malva	1,409	160	17,4		AGOPYAN E SAVASTANO JR, 1997
Sisal	1,33	546,31 ± 318,55	17,37 ± 8,42	2,82 ± 1,182	SILVA <i>et al.</i> , 2008
Curauá	1,3	131 – 310	48,7	4,49 ± 4,57	TOMCZAK <i>et al.</i> , 2008
PVA	1,81	1200 – 1600	31,4 – 42	7,0	MAGALHAES, 2010

FONTE: Fidelis (2014) e Oliveira (2017)

2.3. TRATAMENTO DAS FIBRAS VEGETAIS

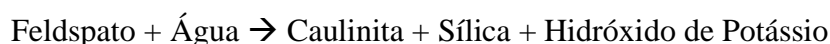
Com a finalidade de melhorar a durabilidade dos compósitos, Rodrigues (2015), realizou um tratamento por impregnação das fibras por meio de imersão em verniz a base de copolímeros acrílicos em emulsão, com o intuito de diminuir a hidrofobicidade. Através de ensaios de microscopia eletrônica foi possível identificar que não houve melhora interfacial entre fibra e matriz após o tratamento. Entretanto, ensaios mecânicos mostraram que os compósitos com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico e fibras tratadas com 40% de verniz apresentaram resultados superiores quando comparados aos não tratados.

Oikawai (2019) tratou suas fibras longas com tratamento polimérico e obteve através de resultados mecânicos que os compósitos com 10% de fibras longas tratadas apresentou melhor comportamento, com tensão de primeira fissuração e tensão máxima, com médias de 14,61 Mpa e 43,09 MPa respectivamente.

Paralelamente, Oliveira (2017) tratou as fibras que compunham o tecido misto de fibras de juta e malva, imergindo-as em resina acrílica, composta por produto à base de copolímeros acrílicos em solução, solventes do tipo hidrocarboneto aromático, além de aditivos. O polímero formou um filme que protegeu a fibra, impedindo o contato da fibra com os produtos de hidratação.

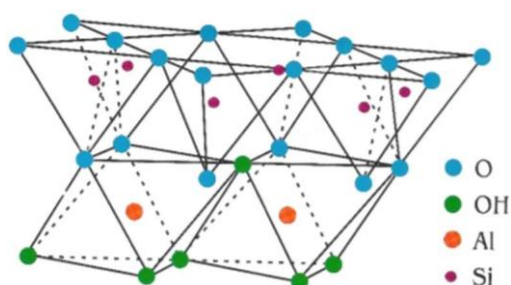
2.4. CAULIM

A Matéria-prima básica para a fabricação da Metacaulim é o caulim de alta qualidade, com baixos teores de impurezas. Em geral, o caulim é obtido através do beneficiamento de argilas caulínicas, cujos teores de caulim em geral situam-se acima de 50% e abaixo do qual normalmente torna-se inviável para este tipo de aplicação devido ao alto custo de beneficiamento. O caulim é geralmente formado pela decomposição do feldspato por meio de processos geológicos, podendo ser representada pela equação mostrada a seguir (ROCHA, 2005):



A caulinita é um mineral de argila 1:1 (FIGURA 2) com a composição química $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, o que significa que cada partícula tem uma camada de sílica tetraédrica e uma camada de alumina octaédrica, onde sua composição teórica é 46.54% SiO_2 , 39.5% Al_2O_3 , 13.96% H_2O (MITCHELL, 2005). Embora o mineral caulinita seja o principal constituinte do caulim, outros elementos além do alumínio, silício, hidrogênio e oxigênio acham-se geralmente presentes. A composição química do caulim é usualmente expressa em termos de óxidos dos vários elementos, embora eles possam estar presentes em forma mais complicada e por vezes desconhecida (SILVA, 2001).

Figura 2 - Estrutura Cristalina



FONTE: Michell (2005)

As reservas de caulim no Brasil, estão presentes nos estados do Pará, Amazonas e Amapá, com respectivamente 56%, 41% e 2% do total das reservas nacionais (DNPM, 2009). Na Região Norte predominam os depósitos sedimentares, enquanto que nas demais regiões há a predominância dos depósitos primários.

A Figura 3 mostra a localização de alguns dos depósitos de caulins brasileiros. Os depósitos comerciais mais importantes no Brasil são de caulim sedimentar da Bacia Amazônica. As maiores produtoras do país situam-se na região Norte, onde o estado do Pará representa 80% do total da produção do caulim brasileiro, seguido do Amapá (FIGURA 6) (LUZ; LINS, 2008).

Apesar de possuir a segunda maior reserva nacional de caulim, este ainda é pouco explorado a nível de comercialização no estado do Amazonas. Na década de 90, a zona litorânea dos municípios de Manaus e Rio Preto da Eva foi palco de pesquisa pela Mineração Horboy Clays, recentemente a Kalamazon Estudos Geológicos também explorou um depósito na mesma região (CPRM, 2016).

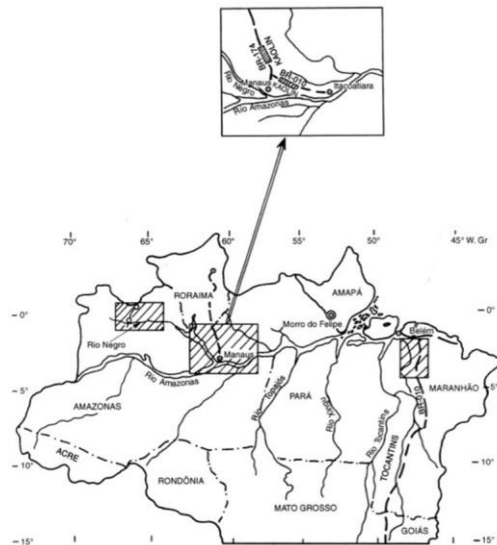
Nas proximidades dos municípios de Manaus, Presidente Figueiredo e Itacoatiara, porção nordeste do estado, são encontradas boas exposições de caulim ao longo das vias de acesso a estes municípios, como BR-174 e AM-010, conforme é mostrado na Figura 4. Este é pertencente à Formação Alter do Chão e é composto principalmente por caulinita e quartzo (HURTADO; LIMA, 2016; COSTA; MORAES, 1998).

Figura 3 - Depósitos de caulim do Brasil



FONTE: Wilson, Santos e Satnos (2006)

Figura 4 - Depósitos de caulim na região metropolitana de Manaus



FONTE: Adaptado de Costa e Moraes (1998)

2.5. METACAULIM

A NBR 12653 (ABNT, 2014), e a American Society for Testing and Materials (ASTM), em sua norma D5370 (2014) definem pozolanas como materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio

à temperatura ambiente formando compostos com propriedades aglomerantes. A NBR 12653 (2014) classifica em três classes os materiais pozolânicos (Classe N, Classe C e Classe E) em função da sua origem, requisitos químicos e físicos estabelecidos por esta Norma.

A principal finalidade das adições minerais é promover reações pozolânicas, as quais consomem o hidróxido de cálcio (CH) formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), e atuar como filler aumentando a densificação da matriz (MELO FILHO, 2012).

De acordo com Melo Filho (2005), vários pesquisadores têm verificado os benefícios da substituição de parte do cimento por outros aditivos minerais (microsílica, cinza volante, metacaulinita, resíduo cerâmico e outros) que realizem atividade pozolânica, proporcionando assim uma estrutura de poros mais densa e, em consequência, o aumento de resistência à compressão e impermeabilidade nos componentes à base de cimento.

Sabe-se que a produção de cimento Portland gera diversos problemas ambientais, notadamente quanto à elevada emissão de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera durante sua fabricação (ROCHA, 2005). Sua fabricação é responsável por cerca de 7% das emissões globais de gases de efeito estufa, o que representa ameaça significativa às mudanças climáticas globais (NEUPANE, 2018).

Servindo-se desta prerrogativa, um dos impactos ambientais mais benéficos do Metacaulim decorre da sua utilização em produtos à base de cimento Portland, oferecendo grandes vantagens às estruturas e peças fabricadas com este material de construção. Isto se deve ao fato, principalmente, da presença do Metacaulim reduzir significativamente a quantidade de cimento necessário nas misturas, sem deixar de atender às especificações de desempenho do produto final, tanto em termos de resistência mecânica quanto durabilidade. A longo prazo, a construção de obras com concretos dosados com Metacaulim proporcionam maior vida-útil com menos despesas com assistência técnica, manutenção ou recuperação.

Sabe-se que o metacaulim é obtido através do tratamento térmico do caulim, composto principalmente de caulinita. Esse processo permite a transição de uma fase puramente cristalina, para um estado amorfo e altamente reativo, normalmente observam-se os seguintes comportamentos: a desidratação com a remoção de água livre que ocorre na faixa de 20 a 200 °C e a desidroxilação, na temperatura de 400 a 650 °C, sendo o fenômeno mais importante na calcinação e consiste na evaporação da água quimicamente ligada, a partir dos grupos OH presentes no mineral (MOHAMMED, 2017). Os grupos

funcionais mais reativos da caulinita são os grupos hidroxila, capazes de participar de muitas reações químicas e processos de troca iônica (CHENG *et al.*, 2012).

Essa mudança de estrutura é influenciada também pelas condições de produção como tempo, temperatura e taxa de aquecimento (TIRONI *et al.*, 2012). Enquanto a caulinita é cristalina, a metacaulim possui uma estrutura altamente desordenada e oferece boas propriedades como aditivo mineral.

Para a maioria dos autores a temperatura de calcinação para produção do metacaulim está na faixa de 600 a 900°C. Avet, Li e Scriver (2018) calcinaram 7 caulins da América do Norte, América do Sul, Sul da Ásia e Sudeste da Ásia a uma temperatura de 800 °C por 1 hora. Os autores estudaram três métodos comparativos para determinar a quantidade de metacaulim reagida em misturas de argila calcinada. Os três métodos mostraram que a quantidade de metacaulim reagida aumenta com o tempo e que essa quantidade é mais alta para um maior teor de metacaulim na argila calcinada.

Tironi *et al.* (2017) calcinaram três argilas naturais diferentes da província de Rio Negro e Argentina a uma temperatura de 700 °C por 1 hora e em seguida as argilas calcinadas foram moídas até 80% do tamanho de partícula < 45µm. Para determinar a atividade pozolânica utilizou-se o teste de condutividade elétrica, o teste de Fratinni e o índice de resistência à compressão. Por fim, os resultados mostraram que todas as argilas calcinadas foram classificadas como pozolanas altamente reativas. A presença de caulinita e halloysite tubular teve maior influencia na atividade pozolânica e na resistência à compressão em argamassas em idades posteriores.

Marques (2017) coletou caulim em jazida de solo caulínítico localizado no km 45 da BR 174. A argila foi calcinada em forno tipo mufla a temperatura de 750 °C por 3 horas. Após calcinação, a caulim foi moída por 2 horas em um moinho de bolas com 16 bolas de diâmetro 43, 49 mm, 21 bolas de 30, 53 mm e 81 bolas de 19,61 mm para moer 2 quilogramas de material. Como resultado obtido, pode-se verificar que todas as adições minerais apresentaram composições químicas com teores significativos de SiO₂ e percentuais de Al₂O₃ em menores proporções que os parâmetros estabelecidos na norma BR 12653 (ABNT, 2014). No tocante a reatividade das pastas com os materiais pozolânicos, a metacaulim adicionada em 50% reduziu em torno de 98,61% do (Ca(OH)₂) em comparação com a pasta referência, originando compostos hidratados mais resistentes como demonstrado nas análises de DRX com presença de silicatos de cálcio hidratado resultante no produto final que melhor empacotaram a microestrutura da matriz influenciando nas propriedades mecânicas.

Já Campos (2016) coletou argila caulínica também na jazida localizada no Km 45 da BR 174. A argila foi calcinada a 800 °C por 2 horas. Como conclusão, através da análise de fluorescência de raios x pode-se encontrar uma razão Si/Al igual a 1,43, desta forma o metacaulim pode ser utilizado para a produção de placas de aluminossilicatos. Também pode-se notar que o a somatória dos óxidos SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ foi de 98, 21% o que está de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1992), classificando o material como pozolânico.

Da mesma forma que Marques (2017) e Campos (2016), Azevedo (2017) coletou caulim da jazida localizada no km 45 da BR 174. Nesta pesquisa o caulim foi calcinado a 750 °C por 6 horas. Por fim, através de análise de resultados o metacaulim produzido mostrou-se um aluminossilicato precursor nobre para aplicação na síntese de geopolímero e que melhores resultados de resistência à compressão foram obtidos para a menor granulometria do material, pois, a maior resistência de 61,4 Mpa aos 28 dias foi apresentada por geopolímeros produzidos a partir da metacaulim calcinada a 750 °C e peneirado na peneira de 325 mesh.

A utilização de metacaulim e de fibras vegetais na produção de fibrocimento resulta em um material ecologicamente mais eficiente do que os tradicionais. Cerca de 20-25% dos compostos hidratados do cimento são (Ca(OH)₂), que não contribui para a resistência final do material endurecido. Na presença de metacaulim, formam-se silicatos de cálcio hidratados durante a hidratação do cimento Portland que melhoram a resistência e a durabilidade das pastas, argamassas e concretos no estado endurecido. O resultado é um material cimentícios com menor quantidade de clínquer e, conseqüentemente, menor consumo de energia e menor emissão de dióxido de carbono (CO₂) (LIMA e TOLEDO FILHO, 2008).

2.6. INTERFACE FIBRA- MATRIZ

Matriz cimentícia é um material composto pela mistura de cimento Portland, agregado miúdo, adições minerais (caso sejam necessárias) e água. Estes materiais quando homogeneizados formam uma massa de consistência plástica de fácil manuseio e que poderá ser moldada em diversos tipos de fôrmas. O endurecimento desta mistura deve-se as reações químicas entre o cimento e a água, que ocorrem durante o processo de hidratação do cimento, promovendo o aumentando da resistência à compressão com o passar do tempo (OLIVEIRA, 2017).

A interface fibra-matriz é a responsável pelo trabalho de transferências dos esforços entre a matriz e o reforço. Alguns fatores como tipo de fibra, quantidade, volume relativo, comprimento, forma e orientação das fibras influenciam no desempenho dos compósitos. Outro fator importante a ser observado é a qualidade da interface entre os componentes fibra/matriz (IZQUIERDO, 2011).

Toledo Filho (1997, apud FIDELES, 2014), observou melhoria da aderência fibra-matriz devido, entre outros fatores, à substituição parcial de cimento por microssílica e escória, os quais conferiram ao compósito aumento na carga máxima de arrancamento (pull out) em cerca de 9 a 20%. O autor relata que esse aumento está relacionado à finura e reatividade da escória e da microssílica, pois os mesmos foram responsáveis pela redução da porosidade da zona de transição, contribuindo para um melhor desempenho da interface fibra-matriz.

A utilização da fibra promove melhoria nas propriedades mecânicas do compósito, porém o desempenho mecânico do compósito também pode ser alterado principalmente através da variação do comprimento da fibra, ou através do uso de agentes de acoplamento (MORRISSEY *et al.*, 1985).

Sabe-se que a interface fibra-matriz dos compósitos cimentícios reforçados com tecidos fibrosos, é integralmente dessemelhante 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, 2014).

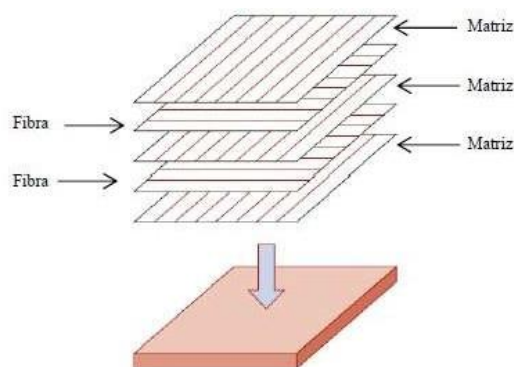
2.7. COMPÓSITOS LAMINADOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS VEGETAIS

Os compósitos são normalmente formados por duas fases: a matriz e o elemento de reforço. Callister e Rethwish (2012) definem compósito laminar como qualquer material multifásico, composto pela combinação de dois ou mais materiais, e assim, é realizado o princípio de ação combinada através do arranjo das propriedades.

De acordo com Callister (2000), laminados são determinados por folhas ou painéis bidimensionais de direção única, possuem alta resistência mecânica, igual ao encontrado na madeira e em plásticos reforçados com fibras contínuas e alinhadas.

No processo de fabricação dos laminados, as camadas são empilhadas e subsequentemente unidas de forma que a orientação da direção varie com cada camada sucessiva (FIGURA 5), pois segundo os autores, o compósito laminar possui uma resistência mecânica relativamente mais elevada em um determinado número de direções no plano bidimensional, mas, tal resistência em qualquer direção é, naturalmente, menor do que seria se as fibras fossem orientadas em uma só direção. Os laminados também podem ser constituídos empregando-se fibras na forma de tecido, tais como o algodão, o papel, ou fibras trançadas, os quais são inseridos no interior de uma matriz polimérica (CALLISTER, 2000; RODRIGUES, 2015).

Figura 5 - O empilhamento de sucessivas camadas de reforço com fibras orientadas para um compósito laminar

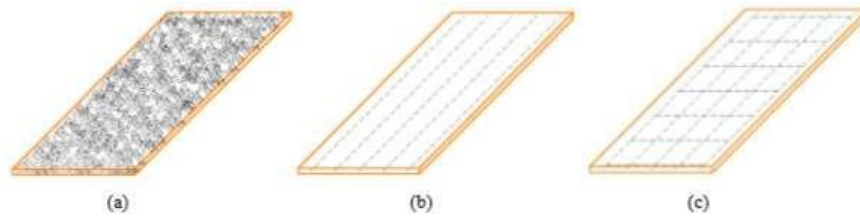


FONTE: CALLISTER e RETHWISCH (2012).

Os compósitos geralmente consistem em reforços utilizando de fibras curtas dispersas no interior da matriz (FIGURA 6a), porém os compósitos também podem ser produzidos com fibras longas alinhadas (FIGURA 6b) ou em forma de tecido (FIGURA 6c). No reforço com fibras curtas dispersas, a contribuição destas quando o compósito é submetido à flexão é inferior à que ocorre quando se utiliza fibras longas orientadas ou em forma de tecidos (FIGURA 21b, c) (MARQUES, 2009).

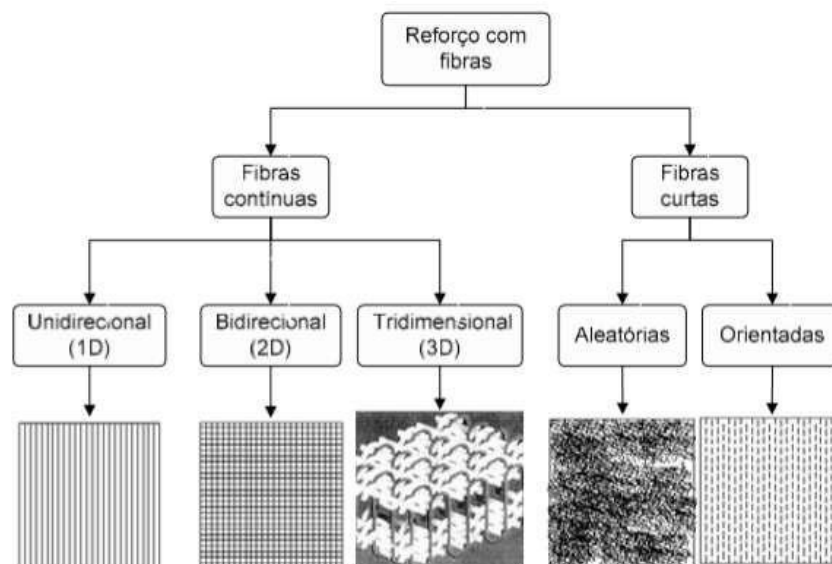
Diversos estudos utilizaram fibras como reforço (FIGURA 7), em formas de polpa (SAVASTANO *et al.*, 2009; SIERRA BELTRAN, 2011), curtas aleatoriamente distribuídas (TOLEDO FILHO, 1997; LIMA, 2004; SILVA, 2008), fibras longas e alinhadas (MELO FILHO, 2012, SILVA, 2009), além de reforço bidirecional em forma de tecido (FIDELIS, 2014; ARRUDA FILHO, 2015; OLIVEIRA, 2017).

Figura 6 - Tipos de distribuição de reforço fibroso: a) Fibras curtas distribuídas aleatoriamente, b) Fibras contínuas unidirecionais e c) Fibras contínuas bidimensionais.



FONTE: Oliveira (2013).

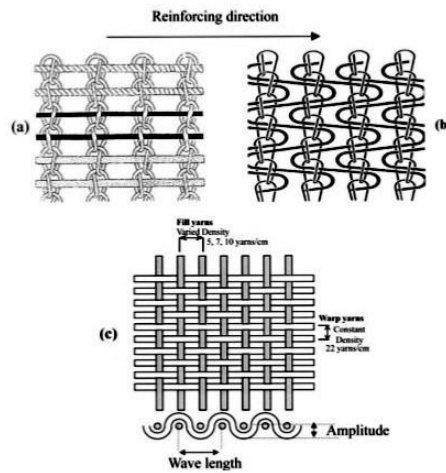
Figura 7 - Materiais compósitos quanto ao seu tipo de reforço



FONTE: Melo Filho (2012)

Os reforços de tecido diferem das demais pela forma como os tecidos são combinados, conforme ilustra a Figura 8. Em tecelagem, o urdume ou urdidura é o conjunto de fios dispostos longitudinalmente através dos quais a trama é tecida. No tecido da figura 23(b) e 23(c) os fios da direção da urdidura são tricotados, sendo que em (c) os fios estão em forma de ziguezague. Geralmente a eficiência do reforço leva em conta apenas os fios na direção longitudinal (na direção do carregamento), e os fios perpendiculares são tratados como não estruturais, com a função apenas manter os fios longitudinais no lugar durante a produção do compósito. Porém, esse conceito pode não ser adequado em compósitos cimentícios onde micromecanismos de interação entre a matriz cimentícia e os fios individuais são mais complexos (PELED e BENTUR, 2000; SORANAKOM e MOBASHER, 2009).

Figura 8 - Geometrias testadas: a) tecidos simples; b) tecido "tricotado" e; c) tecido "tricotado" em ziguezague



FONTE: PELED e BENTUR (2000).

De acordo com Cadispoti 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.

Rambo (2016) explana 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 de estruturas. Os tecidos 3D são produzidos com o objetivo de reforçar elementos estruturais como vigas, pilares e placas.

2.8. MATRIZ CIMENTÍCIA PARA COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS

Um dos aspectos mais importantes no desenvolvimento de um produto para a construção civil é a durabilidade. Essa característica pode ser definida como a capacidade do material em continuar a desempenhar sua função por tempo prolongado mesmo depois de repetidas condições adversas (COOKE *et al.*, 2000).

Um grande problema na utilização de fibras vegetais como reforço em matrizes cimentícias está relacionando à durabilidade do compósito. A perda de resistência desses compósitos ao longo do tempo se deve, em parte, à alcalinidade da matriz. Uma vez que, a água presente nos poros é altamente alcalina, ela promove a dissolução da hemicelulose e lignina e hidrólise alcalina das moléculas de celulose, o que reduz o grau de polimerização

e resistência das fibras. Somado a isso, os produtos de hidratação, principalmente o hidróxido de cálcio, migram para paredes, lumens e vazios das fibras, ocasionando mineralização das fibras. Para evitar que isso ocorra são realizadas modificações nas matrizes, como substituição parcial do cimento por material pozolânico, têm sido realizadas a fim de obter uma matriz livre de hidróxido de cálcio (AGOPYAN *et al.*, 2005; TOLEDO FILHO *et al.*, 2003; CLARAMUNT *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2010; LIMA, 2004; SAVASTANO *et al.*, 2009).

A fim de se obter uma matriz livre de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , Toledo Filho *et al.* (2009) substituíram parte do cimento por metacaulim e resíduo de tijolo moído. Já Fidelis (2014) realizou substituição parcial do cimento por metacaulim e cinza e volante.

Melo Filho (2005) realizou substituição parcial do cimento Portland por 30% de metacaulim e 20% de tijolo moído e obteve uma matriz livre de hidróxido de cálcio. Em seguida Melo Filho (2012) com o objetivo de minimizar o ataque alcalino às fibras vegetais, desenvolveu uma matriz livre de hidróxido de cálcio, substituindo parcialmente cimento Portland por 50 % de metacaulim.

Toledo Filho *et al.* (2003) também apresentaram um estudo de durabilidade em compósitos com fibras vegetais de coco e sisal. Os autores realizaram carbonatação da matriz em um ambiente rico em CO_2 , imersão das fibras em uma solução de sílica ativa antes de incorpora-las à matriz, substituição parcial do cimento por sílica ativa ou escória de alto-forno e combinação de imersão da fibra em sílica com substituição parcial do cimento, a fim de se avaliar os efeitos na durabilidade. Foram produzidos compósitos com fibras longas (sisal), curtas (coco e sisal) e híbridos.

Os resultados de testes de flexão indicaram que a fragilização dos compósitos reforçados com fibras de sisal pode ser reduzida em longo prazo, caso as fibras sejam previamente imersas numa solução de sílica ativa antes de serem adicionadas à matriz. A cura dos compósitos em ambiente rico em CO_2 se mostrou como uma alternativa promissora no aumento da durabilidade do material com o envelhecimento. Houve também melhoria na durabilidade dos compósitos através da redução da alcalinidade da matriz, devido à adição de sílica. A substituição de 40% de cimento por escória não reduziu a fragilidade do compósito.

Rodrigues *et al.* (2010), investigaram a resistência de compósitos reforçados com fibras de bambu, em forma de polpa, através de ensaios de flexão. Os autores realizaram substituição parcial do cimento por cinza da casca do arroz. Dois tipos de cinza foram utilizados: uma com alto teor de carbono e outra com baixo teor, obtidas por diferentes

processos de queima. Melhores resultados foram obtidos para os compósitos com cinza com baixo teor de carbono.

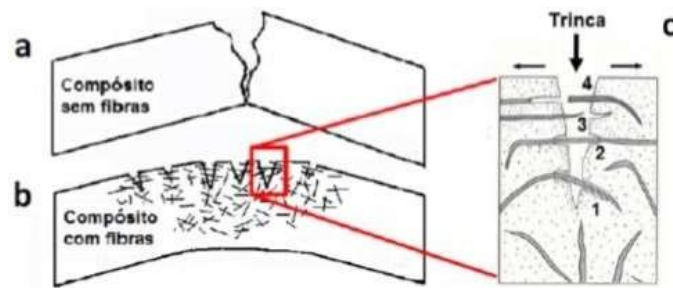
Os autores observaram que um teor 30% de substituição não prejudicou a resistência à flexão e a rigidez dos compósitos e melhorou a adesão interfacial. Além da redução da alcalinidade da matriz, devido à reação pozolânica, as partículas não reagidas de cinza, bem como os produtos de hidratação, preencheram os poros da matriz e interface, causando redução na porosidade total do compósito, levando à melhoria da resistência e menor susceptibilidade à deterioração das fibras.

2.9. COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS

Normalmente, o concreto contém inúmeras fissuras. A rápida propagação de fissuras sob tensão aplicada é consequência de baixa resistência à tração do material. Inicialmente, foi considerado que as resistências à tração na flexão do concreto podiam ser aumentadas substancialmente, pela introdução de fibras próximas umas as outras, as quais poderiam obstruir a propagação de microfissuras, retardando, portanto, o início das fissuras e aumentando a resistência à tração do material (AGOPYAN; SAVASTANO JR., 1997).

O papel das fibras em materiais compósitos é o de melhorar as propriedades mecânicas, principalmente via ductilidade, no estágio pós-primeira fissura. As fibras oferecem ao compósito o surgimento de mecanismos de tenacificação, possibilitando um comportamento mecânico pseudoplástico ao fibrocimento. Compósitos convencionais sem fibras rompem repentinamente, com um comportamento frágil. Por outro lado, a inserção de fibras na matriz cimentícia promove o aumento da resistência mecânica e melhora a capacidade de absorção de energia com a distribuição de microfissuras ao longo do compósito (FIGURA 9). Sem o reforço das fibras, o material falharia de maneira brusca após iniciada a fissuração (COUTTS, 2005).

Figura 9 - Esquema de comportamento de um compósito submetido à flexão: a) sem reforço fibroso e b) com reforço fibroso c) caminhamento da trinca 1- deslocamento; 2 - interceptação; 3- arrancamento; 4- fratura da fibra.



FONTE: Coutts (2005).

Em relação aos compósitos produzidos com fibras curtas dispersas no interior da matriz, a contribuição das fibras para as propriedades mecânicas do compósito, é inferior a que ocorre quando se utiliza fibras longas orientadas perpendiculares ao carregamento, quando submetidos à flexão (MARQUES, 2009).

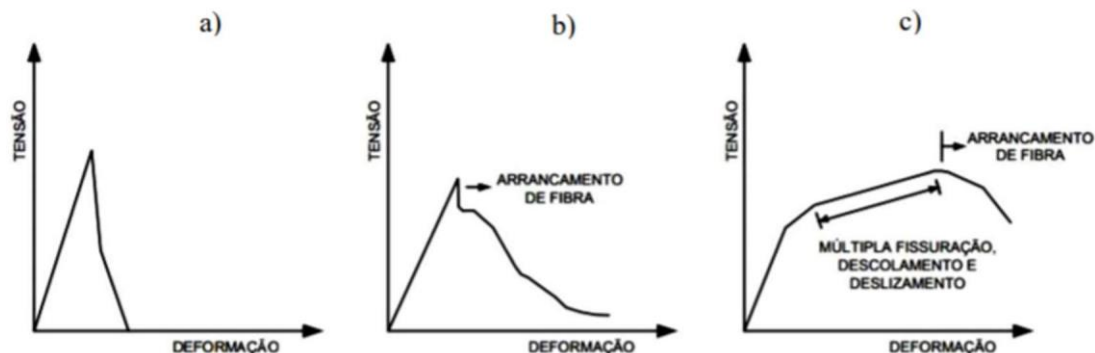
No tocante às fibras longas, um estudo sobre compósitos com fibras longas de sisal foi realizado por Melo Filho (2012). Foram produzidos compósitos com reforço uni e bidirecional, fração volumétrica de 6% e 10%, respectivamente. Os resultados de tração e flexão foram melhores para compósitos com 10% de fibras. Tanto compósitos com 6% de fibra quanto os com 10% apresentaram múltipla fissuração na flexão e na tração, porém nos compósitos reforçados com 10% de fibras houve formação de mais fissuras com menor espaçamento. Os resultados de flexão não apresentaram diferença significativa nos valores de deflexão de primeira fissura e módulo de elasticidade. Os compósitos com 10% suportaram maiores valores de carga durante a múltipla fissuração, além de rigidez aparente de endurecimento 24% superior ao compósito com 6%. Houve ainda, aumento de 9% nos valores de tensão última e redução de 17% na deflexão última.

De acordo com Balaguru et al. (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 10 (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 isso, as cargas inferiores são transmitidas para fibra, sendo a ruptura

caracterizada pelo arrancamento das fibras (FIGURA 10 (b)). Nesse tipo de compósito, mesmo não havendo acréscimo na resistência, a fibra proporciona ductilidade ao material.

Figura 10 - Comportamento de compósitos fibrosos: frágil (a), strain softening (b) e strain hardening (c).

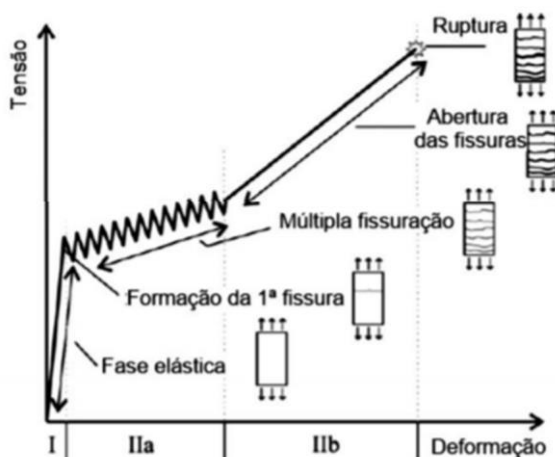


Fonte: Balaguru et al. (1992).

O terceiro comportamento é caracterizado pelo endurecimento de tensão, conhecido como *strain hardening* (FIGURA 25 (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 et al, 1992; LI et al., 1995). Com esse aumento de carga ocorre o processo denominado múltipla fissuração, este é subdividido em três fases principais, as quais, Rambo (2016) exemplifica como:

- 1. Fase elástica:** composta pela resposta elástica do compósito, predominantemente governada pela matriz. O fim desta fase é alcançado quando o nível e 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 11.
- 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 11 - Representação esquemática da resposta típica de um CRT sob tração.

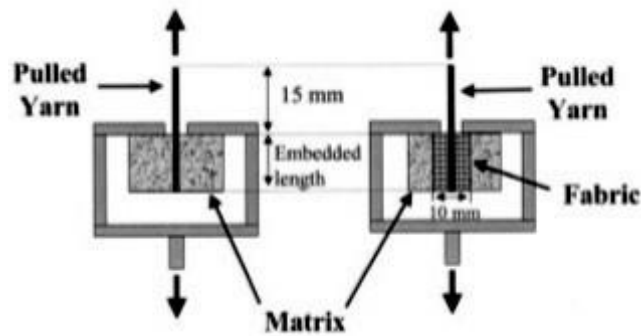


Fonte: Adaptado de BARHUM & MECTCHERINE (2012).

Compósitos cimentícios de alto desempenho podem ser obtidos através da utilização de fibras contínuas como reforço. Esses compósitos podem ser produzidos com fibras na forma de tecido o qual é impregnado pela matriz cimentícia. Esse tipo de tecnologia tem sido aplicado, com limitação, na produção de placas cimentícias de pequena espessura e em aplicações in situ como reparo e reabilitação (FAELLA *et al.*, 2010; GOPINATH *et al.*, 2014).

Compósitos reforçados com diferentes geometrias dos tecidos foram estudados por Peled e Bentur (2000). Foram utilizados tecidos com fios de baixo módulo (polietileno, polipropileno e Nylon) e alto módulo (Kevlar e Polietileno de Alta Densidade). A avaliação das características da adesão dos compósitos foi feita com base nos ensaios de arrancamento do fio e do tecido, conforme Figura 12. O valor da carga máxima foi utilizado para calcular a adesão interfacial (obtido pela divisão da carga pela área de superfície do fio embebido). Embora esse valor tenha significado físico limitado, pois a distribuição de tensão adesional não é uniforme, pode servir como um parâmetro para comparar a eficiência de aderência de diferentes sistemas.

Figura 12 - Testes de arrancamento para determinar a aderência do (a) fio e (b) tecido



Fonte: PELED e BENTUR (2000).

O tecido da Figura 12 (b) apresentou adesão menor que a do fio. A redução está entre 20 e 85%, sendo que a maior queda foi para fios com maior número de filamentos. Essa diminuição pode ser facilmente explicada pela compactação da matriz ao redor do feixe, que é interferida pelos pontos “tricotados”. Esses pontos podem também unir os filamentos em feixes reduzindo a penetração da matriz. Já para o tecido da Figura 15 (a), a adesão do tecido é maior que a do fio, devido ao engaste que a geometria da tela induz e talvez à ancoragem fornecida pelos fios perpendiculares (FIDELIS, 2014).

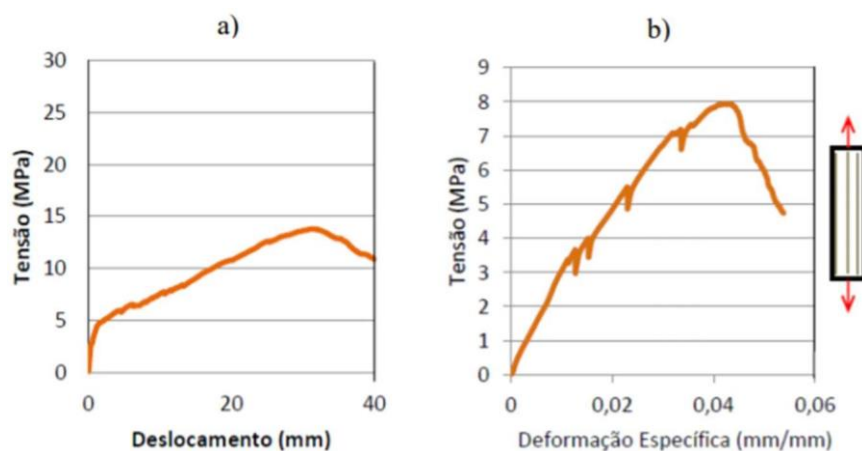
Segundo Bernat-Maso (2013) é essencial entender que a matriz cimentícia reforçada com tecido (MCRT) fornece resistência à tração graças às fibras dos tecidos e que essas fibras só suportam as cargas que a argamassa é capaz de transmitir. Portanto, a transferência de tensões da matriz é um dos principais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

Referente as fibras naturais, Fidelis (2014) apresentou resultados satisfatórios em compósitos reforçados com frações volumétricas de 6 a 10% equivalente a 3 e 5 camadas de tecido tratado de juta. Os compósitos apresentaram maior capacidade de deformação e múltipla fissuração, apresentando comportamento *strain hardening*. O compósito com teor de 6% de fibra resistiu a tensão máxima de 4,38 Mpa, apresentando seis fissuras no terço médio. Enquanto o compósito com 5 camadas, resistiu a tensão de 4,73 Mpa, e apresentou 11 fissuras. Com relação ao tratamento da fibra, este aumentou a tenacidade em 155,7%. Além disso, também houve melhora no comportamento de formação de fissuras, além do aumento na tensão última que foi de 6,94 MPa.

Arruda Filho (2015) produziu placas cimentícias reforçadas com tecido estrutural de sisal, com fração volumétrica de 3,4,6, 9 e 10%. Amostras de 40x10x1cm (comprimento, largura, espessura) foram utilizadas para ensaios de flexão, e espécimes de

20x5x1cm (comprimento, largura, espessura) foram submetidos a tração direta, ambos aos 28 dias de idade. De modo, geral, os compósitos apresentaram comportamento *strain hardening*, tanto para flexão, quanto para tração. As amostras com teor de 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 7,26mm, conforme pode-se visualizar no gráfico característico da amostra na Figura 13 (a) abaixo. No momento em que foram submetidas à tração direta as amostras tiveram média de tensão máxima de 6,89 MPa, cujo gráfico tipo é apresentado na Figura 13 (b), com média de 8 fissuras com espaçamento de 11,4 mm.

Figura 13 - Compósitos com teor de 6% de fibra de sisal: a flexão (a) e a tração (b).



Fonte: Arruda Filho, 2015.

Em relação as fibras de malva, diversos autores como Oliveira (2013), Aguiar (2016) e Oliveira (2017) realizaram pesquisas sobre o desempenho mecânico de compósitos reforçados com fibras de malva.

Oliveira (2013), produziu dois tipos de compósitos com o teor de 8% de fibras longas de malva e de juta, alinhadas unidirecionalmente e distribuídas em 5 camadas. Os resultados obtidos possibilitaram notar que os compósitos reforçados com fibras de malva apresentaram resistência à tração na flexão de cerca de 20% superior aos compósitos reforçados com juta e 10% superior na tração direta. Na tração direta os resultados dos compósitos reforçados com fibra de malva foram respectivamente, 17,88%, 25% e 23,02% superiores aos de fibras de juta. Na flexão os compósitos reforçados com fibra de malva apresentaram uma tensão e deflexão de primeira fissuração superior ao compósito com fibras de juta, respectivamente cerca de 94% e 88%.

Aguiar (2016) confeccionou compósitos fibrosos reforçados com fibras longas de malva. Produziu um traço com fibras hornificadas e impermeabilizadas e com substituição

parcial de 30% do cimento Portland pelo resíduo cerâmico, 1% de superplastificante e 6% do volume de fibras longas de malva. De uma forma geral, observou-se que os compósitos apresentaram um comportamento dúctil com aumento da tensão após o surgimento da primeira fissura. Aumento este significativo, tanto para os melhores como os piores resultados. Logo, concluiu-se que os reforços das fibras de malva fazem grande diferença nos compósitos analisados, uma vez que seus resultados foram bem superiores aos resultados dos compósitos sem fibras.

Souza (2017) estudou o comportamento mecânico e os mecanismos de fissuração e autocicatrização de compósitos cimentícios reforçados com diferentes camadas de fibras de curauá. Os mecanismos de fissuração foram estudados por meio de fotografia obtidas ao logo do ensaio. A capacidade de autocicatrização dos compósitos foi avaliada por meio de ensaios mecânicos cíclicos e de carregamento contínuo, e também por acompanhamento de microscópio estereoscópico. As amostras foram expostas a diferentes ambientes e a influência deles foi avaliada. Todos os compósitos apresentaram *strain/deflection hardening* com formação de múltiplas fissuras de média de abertura que não excederam 43 μm e 60 μm na tração e na flexão, respectivamente. Fissuras na presença de água apresentaram cicatrização total e parcial, demonstrando que o material desenvolvido é promissor para ocorrência de autocicatrização. E para as amostras submetidas ao ciclo de molhagem de 12 horas, apenas um ciclo foi suficiente para haver autocicatrização parcial ou total de fissuras.

Barros (2019) confeccionou placas de face de acordo com a norma NBR 15498 (ABNT, 2019), C393 (ASTM, 2016) e norma NBR 15575 (ABNT, 2013) para viabilizar a utilização do painel sanduíche cimentício (PSC) como sistema de vedação vertical em edificações. Foram analisados os desempenhos físicos e mecânicos dos painéis sanduíches cimentícios (PSC) constituídos de placas de face de argamassa cimentícia com substituição parcial de 30% do cimento por metacaulim reforçado com tecido de juta em dupla camada e núcleo em poliestireno expandido (EPS). Após realizados os experimentos, concluiu-se que o PSC pode ser utilizado na construção civil como material leve de vedação vertical para edificações habitacionais em Manaus, pois o mesmo obteve requisitos de resistência, conforto térmico e acústico superiores aos solicitados pelas normas vigentes e sua utilização impactaria em maior conforto para construção de casas populares.

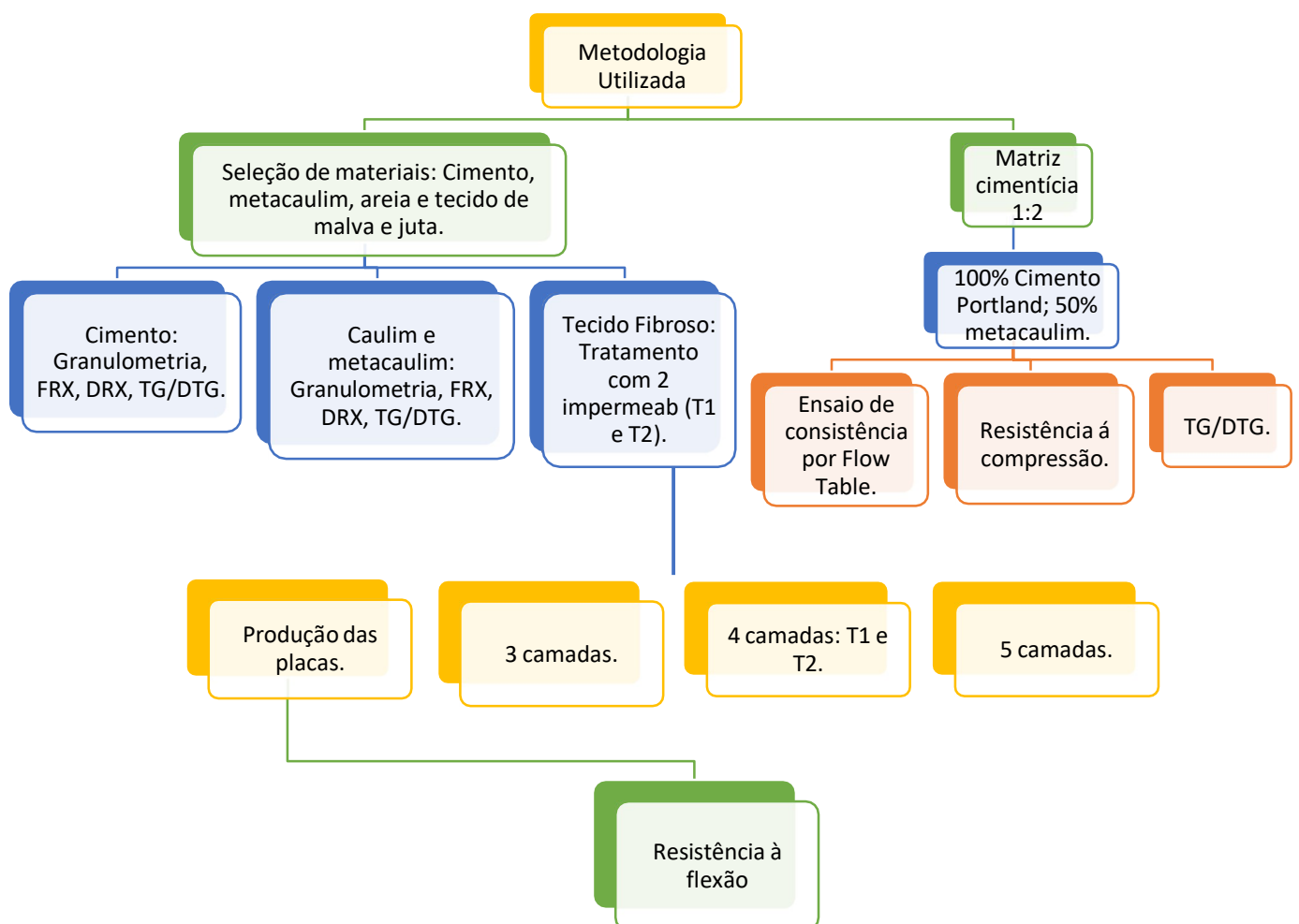
CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa teve por objetivo analisar o desempenho de placas cimentícias reforçadas com fibras de juta e malva quanto ao número de camadas e o tipo de tratamento.

A pesquisa foi executada conforme mostrado na Figura 14 abaixo:

Figura 14 - Fluxograma da Pesquisa



3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

No programa experimental foram utilizados os seguintes materiais:

- Cimento Portland CPII-F produzido pela empresa Poty;
- Areia de jazida localizada na BR-174;

- Metacaulim;
- Superplastificante TechFluid e;
- Tecido de fibra de juta e malva comprada no mercado local da cidade de Manaus.

A areia utilizada foi lavada, seca em estufa e foi peneirada na peneira n° 16 (1,18mm), pois, de acordo com Melo Filho (2012), as partículas com granulometria inferior a 1,18 mm têm influência na área de contato entre as partículas dos aglomerantes, fazendo com que a mistura final possua um maior empacotamento de partículas.

O superplastificante é fabricado pela Rheotec Aditivos de Concreto, é a base de Naftaleno sulfonatos, de densidade $1,2 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ e teor de sólidos 38% ($\pm 2,0$).

3.1.1. Cimento Portland

No tocante à caracterização do cimento Portland composto com Fíller (CPII F) utilizado, realizou-se caracterização físico-química em ensaios como: Granulometria, Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial, Difração de Raios X (DRX) e Fluorescência de Raios X (FRX).

3.1.1.1. Granulometria

O ensaio de granulometria à laser foi realizado em um analisador de partículas a laser, modelo Mastersizer 2000, Marca Malvern (FIGURA 15), com unidade de leitura a úmido, no Laboratório de Análise Mineral – LAMIN, da Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais - CPRM.

O tamanho das partículas de cimento foram analisadas pela técnica de granulometria à laser. Na análise do CPII F, utilizou-se álcool etílico 96% como dispersante, inibindo alguma reação com o cimento. A velocidade da bomba de dispersão foi de 2.000 rpm sem ultra-som, sendo empregado o modelo de cimento disponível na biblioteca do programa computacional e forma de partícula irregular.

Este ensaio foi realizado com o objetivo de determinar a distribuição granulométrica das partículas constituintes da amostra, pois, este parâmetro é fundamental para a determinação da área superficial, implicando na maior ou menor quantidade de água necessária para a hidratação das fases anidras dos cimentos e das cinzas da combustão de carvão mineral.

Figura 15 - Granulometro a Laser



3.1.1.2. Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial

Nesta pesquisa a análise térmica diferencial e a termogravimetria foram efetuadas conjuntamente por meio do equipamento TGA 50 da marca Shimadzu, módulo TGA/DSC, da TA Instruments, do Laboratório de Físico-Química, localizado na Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas. O equipamento é composto de um forno com aquecimento até 1500 °C, termopares para controle de temperatura acoplado ao sistema de termobalança com sensibilidade de 0,1 µg e capacidade de 200 mg, panelinha de platina (porta-amostra) de 110 µL alocada na extremidade do termopar.

O CPII-F analisado foi coletado em em tubos plásticos eppendorf, selados com filme plástico e armazenado em dessecador. As massas das amostras pesadas encontravam-se na faixa de 10 a 12 mg, estas foram espalhadas cuidadosamente na panelinha de platina, evitando qualquer prisão de gases na amostra que pudesse comprometer o ensaio.

O patamar de temperatura do forno estabelecida foi de até 1000 °C, aquecendo a uma taxa de 10 °C/min com fluxo de gás N₂ 5.0 de 30 ml/min. As curvas TA e DTG são obtidas em tempo real e trabalhadas posteriormente com o auxílio do software Universal Analysis 2000.

3.1.1.3. Fluorescência de Raios X (FRX)

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio Físico-Químicos na Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Utilizou-se o equipamento

da marca Panalytical modelo Epison 3 XL, com tensão máxima de 50 kV, corrente máxima de 3 mA e atmosfera de gás Hélio.

3.1.2. Produção do Metacaulim

3.1.2.1. Coleta da Caulim

O caulim, pertencente à formação Alter do Chão, foi coletado nas camadas argilosas do km 45 da BR 174 com a localização de latitude em 2°35'09.8'' S e de longitude em 60°01'55.2'' W (FIGURA 16).

Figura 16 - Jazida de Caulim, Igarapé Cabeça Branca



O caulim in natura, foi seco ao ar por 48h e posteriormente destorroados de forma manual para desagregação parcial dos torrões maiores (FIGURA 17). Após o procedimento de maceração para desagregação o caulim foi misturado em água até que fosse adquirida uma consistência pastosa. Em seguida, peneirou-se por via úmida na peneira de 75 μ m, para remoção da fração de quartzo, matéria orgânica e demais impurezas (FIGURA 18).

Figura 17 - Torrões de Caulim



Figura 18 - Caulim em consistência pastosa e na peneira 75 μm



O beneficiamento preliminar garantiu uma composição química mais próxima possível das esperadas para a argila.

Em seguida, o caulim já livre de impurezas, passou pelo processo de sedimentação de suas partículas pelo período de 24h, onde retirou-se o excesso de água da mesma (FIGURA 19) até formação de uma pasta de caulim para um novo processo de secagem em estufa a 110 °C por 48h (FIGURA 20). Após a retirada da umidade, o caulim adquiriu uma consistência sólida (FIGURA 21).

Figura 19 - Sedimentação das partículas de caulim



Figura 20 - Secagem da pasta de caulim na estufa a 110 °C



Figura 21 - Caulim após secagem em estufa



Para a obtenção do produto final, destorroou-se novamente o caulim e este foi peneirado na peneira de abertura 300 μm , para desagregar os torrões.

Na sequência foi calcinada em forno resistivo mufla Linn Elektro Therm a 700 °C por 2 h (CAMPOS (2016); AZEVEDO (2017); MARQUES (2017)), taxa de aquecimento 15°C/min e resfriamento por 12h (FIGURA 22). O forno mufla está localizado no Laboratório de Laminação do curso de Geologia na Universidade Federal do Amazonas (UFAM) (FIGURA 23).

Figura 22 - Argila sendo calcinada



Figura 23 - Mufla Linn



3.1.2.2. Granulometria

O ensaio de granulometria à laser foi realizado em um analisador de partículas a laser, modelo Mastersizerr® 2000, Marca Malvern, com unidade de leitura a úmido, no Laboratório de Análise Mineral – LAMIN, da Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais - CPRM.

Antes da coleta de dados as amostras foram submetidas à banho de ultrassom por cerca de 5 min com a adição de 20 ml de Hidróxido de Sódio (NaOH) 0,1 M para maior dispersão das partículas. com velocidade da bomba de dispersão de 2000 rpm com ultrassom e princípio de difração denominado “Kaolini”.

3.1.2.3. Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial (TG/DTG/DTA)

Nesta pesquisa a análise térmica diferencial e a termogravimetria foram efetuadas conjuntamente por meio do equipamento TGA 50 da marca Shimadzu, módulo TGA/DSC, da TA Instruments, do Laboratório de Físico-Química, localizado na Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas (FIGURA 24). O equipamento é composto de um forno com aquecimento até 1500 °C, termopares para controle de temperatura acoplado ao sistema de termobalança com sensibilidade de 0,1 µg e capacidade de 200 mg, panelinha de platina (porta-amostra) de 110 µL alocada na extremidade do termopar.

Figura 24 - TGA 50 Shimadzu



O patamar de temperatura do forno estabelecida foi de até 1000 °C, aquecendo a uma taxa de 10 °C/min. As curvas TA e DTG são obtidas em tempo real e analisadas posteriormente com o auxílio do software Universal Analysis 2000.

Além de analisar as transformações térmicas ocorridas durante o tratamento do caulim, estas análises também auxiliam na quantificação do conteúdo de caulinita das amostras (AVET;LI;SCRIVENER, 2018; AVET;SCRIVENER, 2018; LORENTZ *et al.*, 2018, LIU *et al.*, 2018; AVET *et al.*, 2016). Do mesmo modo, permitem a avaliação do processo de produção do metacaulim através do cálculo de conteúdo residual de caulinita nas amostras calcinadas e da taxa de desidroxilação das mesmas (AVET; LI; SCRIVENER, 2018; AVET; SCRIVENER, 2018; AVET *et al.*, 2016, ALUJAS *et al.*, 2015; BICH, 2005; BICK; AMBROISE; PÉRA, 2009).

3.1.2.4. Fluorescência de Raios X

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio Físico-Químicos na Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Utilizou-se o equipamento da marca Panalytical modelo Epison 3 XL, com tensão máxima de 50 kV, corrente máxima de 3 mA e atmosfera de gás Hélio (FIGURA 25).

Figura 25 - Espectrofotômetro de Raios X



3.1.2.5. Difração de Raios X

Este experimento foi realizado no Laboratório de Geologia da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). A mineralogia da amostra foi realizada por meio de difração de raios x (DRX), as medidas foram obtidas em um difratômetro Shimadzu, modelo XRD 6000, com tubo de Cu- $K\alpha$ (1,5418 Å), a coleta ocorreu na faixa angular entre 10° e 40° (2 θ), velocidade do goniômetro de 0,02°/passo, operando a 40 KV e corrente de 40 mA.

3.1.3. Reforço Fibroso

3.1.3.1. Preparo do tecido de fibras de Juta e Malva

Após compra, o tecido foi cortado com medidas de 40 cm x 40 cm (FIGURA 26), ou seja, no tamanho dos moldes das placas. O tecido será tratado antes de ser misturado à matriz cimentícia para produção do compósito.

Figura 26 - Corte do tecido de juta e malva



3.1.3.2. Tratamento

Como apresentado na revisão bibliográfica, existem diversos tipos de tratamento de fibras a fim de evitar a troca de água da matriz com o reforço fibroso. Para esta pesquisa foram escolhidos 2 tratamentos: imersão dos tecidos em resina acrílica Luckcolor (Figura 27) e em impermeabilização com impermeabilizante para tecidos Spray Scotchgard 3M (Figura 28).

Figura 27 - Resina Acrílica



Figura 28 - Impermeabilizante de tecidos



A aplicação da resina acrílica procedeu-se nos seguintes passos: Os tecidos foram imersos na resina em um reservatório por 8 minutos. Em seguida, foram retirados do reservatório e secos em temperatura ambiente (25 °C) durante 2 horas.

Com relação ao impermeabilizante de tecidos este foi aplicado a 15 cm do tecido com movimentos largos e com velocidade suficiente para umedecer o tecido. Esperou-se o tecido secar antes de utilizá-lo, por um tempo de 6 horas. E por fim realizou-se um teste de repelência com algumas gotas d'água para que caso o tecido absorvesse água, aplicasse mais impermeabilizante para tecidos Scotchgard 3M.

3.1.4. Produção da matriz cimentícia

3.1.4.1. Ensaio de Consistência da Pasta

O ensaio de teor ótimo de superplastificante na matriz foi realizado para avaliar sua compatibilidade com o cimento CP-II-F-32 e para que a matriz fosse de alta fluidez. O ponto ótimo de saturação indica para o superplastificante a dosagem ótima, a partir da qual verificou-se ganhos relevantes na fluidez.

Os ensaios de consistência foram realizados de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016). Utilizou-se uma mesa horizontal lisa e plana, um molde tronco-cônico ($V= 463,29 \text{ cm}^3$) e o soquete de metal. Para este tipo de ensaio são aplicados golpes na mesa e depois mede-se o espalhamento.

O teor ótimo de superplastificante foi definido com referência em pesquisas realizadas anteriormente (Toledo Filho *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2010; Fidelis, 2014) onde foi obtido um valor de espalhamento de aproximadamente 400 mm, que proporcionou melhor trabalhabilidade a matriz cimentícia. Também avaliou-se outras características como bordas uniformes, exsudação e segregação de material (Figura 29).

Figura 29 – Ensaio de Flow Table



Na Tabela 4 abaixo, apresenta-se as massas dos materiais utilizados para desenvolver este ensaio. No qual foram empregados diferentes teores de superplastificante, a relação água cimento foi mantida em 0,5%.

Tabela 4 - Quantidade de materiais utilizados na dosagem da argamassa

Materiais	Teor de Superplastificante		
	0,8	1,0	1,2
Cimento (g)	151,65	151,65	151,65
Metacaulim (g)	151,65	151,65	151,65
Areia (g)	606,62	606,62	606,62
Água (g)	147,69	146,71	145,72
Superplastificante (g)	6,39	7,98	9,58

3.1.4.2. Confecção da Matriz Cimentícia

Quanto à produção da matriz cimentícia, como visto anteriormente, Melo Filho (2005) utilizou 30% de metacaulinita comercial fabricada pela empresa Metacaulim do Brasil combinada com 20% resíduo cerâmico e obteve uma matriz 100% livre de Ca(OH)_2 . Seguindo os mesmos passos de sua primeira pesquisa, Melo Filho (2012) produziu uma matriz com substituição parcial do cimento Portland por 50% da metacaulinita comercial e novamente obteve uma matriz 100% livre de Ca(OH)_2 .

Da mesma forma que Melo Filho (2005), Melo Filho (2012), o presente trabalho produziu uma matriz de traço 1:2 e fator a/c de 0,5, livre de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) com adequado comportamentos reológico e mecânico, realizando a substituição parcial do cimento Portland por 50% de metacaulim produzida neste trabalho.

A mistura foi produzida em sala climatizada a 22 ± 1 °C, utilizando um misturador mecânico. Iniciou-se o processo, primeiramente com a colocação de cimento Portland, metacaulim e areia. O material seco (cimento Portland, metacaulinita e areia) foi misturado por 2 minutos, até que estes sejam homogeneizados. Após este primeiro processo foi adicionado 70% da água que compôs a mistura e logo depois a quantidade de superplastificante Tecfluid 1000 com os 30% restantes de água.

Após a mistura, foi realizado ensaio de espalhamento e, em seguida, moldados corpos de prova cilíndricos de diâmetro 50 mm e altura 100 mm para a realização do ensaio e resistência à compressão da matriz em 3, 7 e 28 dias. Vale ressaltar que o preenchimento da argamassa no molde foi realizado através de 4 camadas com 15 golpes em cada uma delas.

Foram produzidas duas matrizes cimentícias: Uma matriz composta unicamente por cimento Portland e uma matriz com substituição parcial de 50% do cimento Portland por Metacaulim. A mistura foi feita da mesma forma explicada acima. Após mistura, foi realizado ensaio de espalhamento e, em seguida, moldados corpos de prova cilíndricos de diâmetro 50 mm e altura 100 mm para a realização do ensaio e resistência à compressão da matriz em 24 horas, 3, 7 e 28. O preenchimento da argamassa no nos corpos de prova foi realizado através de 4 camadas com 15 golpes em cada uma delas.

3.1.4.3. Análise Termogravimétrica nas Pastas

Com o propósito de verificar o teor de hidróxido de cálcio na matriz, foi realizado o ensaio de termogravimetria com a pasta composta unicamente e cimento Portland e com a pasta com substituição parcial de 50% de cimento Portland por metacaulim comercial. Ambos os ensaios realizados após 28 dias de cura. As análises foram realizadas no Laboratório de físico-química, localizado na Faculdade de Tecnologia da UFAM no equipamento TG/DTA de marca Shimadzu, modelo TGA 50.

Foram preparadas dois tipos de pastas, de matriz unicamente cimentícia e de matriz com substituição parcial de metacaulim, conforme é mostrado na Figura 30 e Figura 31. A amostra foi preparada da seguinte forma: a) produção de cerca de 50g de pasta; b)

inserção da pasta em saco plástico; c) vedação do saco plástico; d) após 28 dias de cura, moagem natural em saco plástico; c) retirada de aproximadamente 10mg para todas as análises.

Figura 30 - Pasta com Metacaulim



Figura 31 - Pasta unicamente cimentícia



A análise foi realizada a uma taxa de aquecimento de 10°C/min, em uma temperatura de 0 a 1000°C e em atmosfera de nitrogênio e fluxo do registrador de 30 mL/min.

3.1.4.4. Resistência à Compressão

O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996). Foram produzidos 16 corpos de prova para tal experimento. A cura realizada foi a úmida durante todo o processo. Estes foram capeados e rompidos à compressão em 1, 3, 7 e 28 dias. O ensaio de resistência à compressão foi realizado na prensa universal CONTENCO 100

toneladas (FIGURA 32), localizada no laboratório de Materiais de Construção da UEA. A velocidade de carga foi de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s e após obtenção das tensões será confeccionado o gráfico carga (kgf) x tempo.

Figura 32 - Máquina Universal CONTENCO



3.1.5. Produção dos compósitos

As placas laminadas com tecidos de fibra de juta e malva foram moldadas por meio de adaptações do processo industrial amplamente utilizado na fabricação e placas e telhas de fibrocimento, para produção em laboratório, o qual já vem usado por outros pesquisadores, com dimensões 40 cm x 40 cm x 10 mm, conforme pode-se visualizar na Figura 33, onde foi mostrado o processo de moldagem das camadas das placas. A espessura escolhida foi de 10 mm pois as placas serão comparadas com as produzidas industrialmente com fibras sintéticas. Foram produzidas placas com 3, 4 e 5 camadas de tecidos fibrosos.

Figura 33 - Produção da placas reforçadas com tecidos fibrosos



A metodologia a ser seguida foi a seguinte: Calculou-se o volume total da placa cimentícia ($V_f = 160 \text{ cm}^3$), e desse volume total 5, 10% e 15% foram utilizados para a distribuição dos tecidos fibrosos que foram divididos em 3, 4 e 5 camadas. Além das diferentes porcentagens, também houve diferenciação com relação a matriz cimentícia e ao tratamento dos tecidos fibrosos.

Foram confeccionadas diferentes tipos de placas: Placas com 3 camadas de matriz totalmente cimentícia e tecidos não tratados (M0), placas com 4 camadas de matriz com substituição parcial por metacaulim e tecidos com 2 tipos de tratamentos (M505t1 e M505t2) e placas com 5 camadas de tecidos não tratados e matriz totalmente cimentícia.

Com relação as porcentagens, estas foram definidas de acordo com a literatura mencionada anteriormente.

Na fase de produção dos compósitos, foram utilizadas fôrmas de acrílico. A primeira moldagem foi realizada colocando a primeira camada de matriz no molde e está foi regularizada com espátula (FIGURA 34), logo após colocou-se a camada de reforço e este procedimento foi repetido até que fossem atingidas todas as camadas de matriz e reforço suficiente para completar o compósito. Em seguida, os compósitos foram vibrados externamente em mesa vibratória por aproximadamente 40 segundos.

Na tabela 5 apresentam-se as abreviações utilizadas para os compósitos produzidos.

Figura 34 - Regularização de camada cimentícia



Tabela 5 - Traço e Nomenclatura dos Compósitos

Matrizes					Compósitos		
Nome	Traço	CP (%)	MK (%)	SP (%)	Nome	Tratamento	Vf (%)
M0	1:2:0,5	100	-		M0T0	-	5
M504	1:2:0,5	50	50		M504T1	Res.Acrili.	10
					M504T2	Imperme.	10
M505	1:2:0,5	50	50		M505T0	-	15

Antecedendo-se a cura as placas foram envolvidas em filme plástico e armazenadas, a fim de evitar perdas de água excessivas. Como também, antes dos ensaios mecânicos, as placas foram submetidas ao corte com serra circular de acordo com as dimensões pré-estabelecidas na metodologia do ensaio.

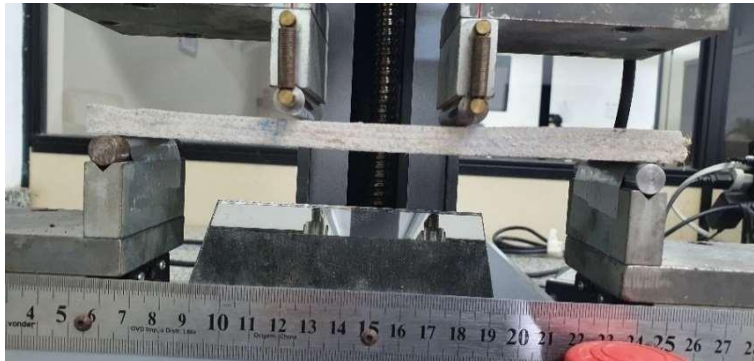
3.1.6. Caracterização mecânica dos compósitos de fibrocimento

3.1.6.1. Resistência à flexão em 4 pontos

Os ensaios foram realizados em máquina Oswaldo Filizola (FIGURA 35), modelo AME, localizada no Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LAMAC). Da mesma forma que Melo Filho (2012), utilizou-se uma cédula de carga de 5 kN (500 kgf) e

taxa de deslocamento de 0,5mm/min, velocidade esta padronizada para todos os ensaios realizados nesta máquina.

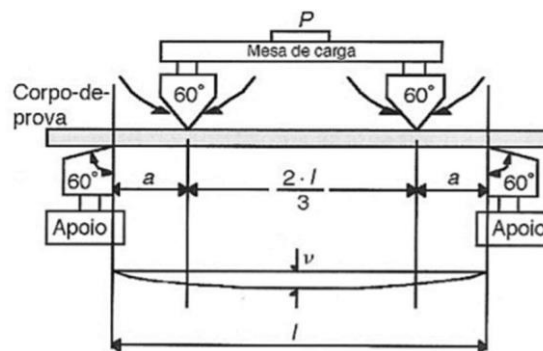
Figura 35 - Prensa para ensaio de tração na flexão



Romperam-se 4 placas com 28 dias de idade, para que o número de amostras atendesse a um padrão NQA 4. O equipamento forneceu os dados do ensaio em função da carga aplicada (N) e da deflexão gerada (mm). Essa carga foi medida instantaneamente por célula de carga, e a deformação foi medida durante todo ensaio por um extensômetro interno a máquina.

Foram calculados os deslocamentos centrais, em função da tensão equivalente de flexão (MPa). A equação 3 abaixo fornece o módulo de ruptura para o ensaio de flexão de 4 pontos e barra de seção de seção transversal retangular, conforme a ASTM E855-90, que tem como base a resistência dos materiais, de acordo com a Equação 1 e Equação 2. A demonstração da análise para ensaio de flexão em 4 observada na Figura 36.

Figura 36 - Análise da tensão para o ensaio de 4 pontos



Fonte: Baptista – USP (2017)

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I_z} \quad (1)$$

$$I_z = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (2)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{3P \cdot a}{b \cdot h^2} \quad (3)$$

Onde:

M= momento fletor;

Y = distância até a letra neutra;

Iz = momento de inércia em relação à linha;

σ = tensão de tração na flexão;

P = carga aplicada;

a = distância entre o suporte e o ponto de carga;

b = largura da amostra;

h = espessura da amostra.

3.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

3.2.1. Cimento Portland

3.2.1.1. Granulometria a Laser

A curva granulométrica do cimento Portland CP II F mostra que o material apresentou tamanho médio igual a 17, 378 μm e 90% das partículas do cimento tem tamanho inferior a 60,256 μm .

Tal parâmetro reforça que os resultados da granulometria implicam diretamente nos fenômenos de superfície como a área superficial que tem papel fundamental na demanda por água na fase de hidratação dos grãos de cimento (CIRINO, 2016).

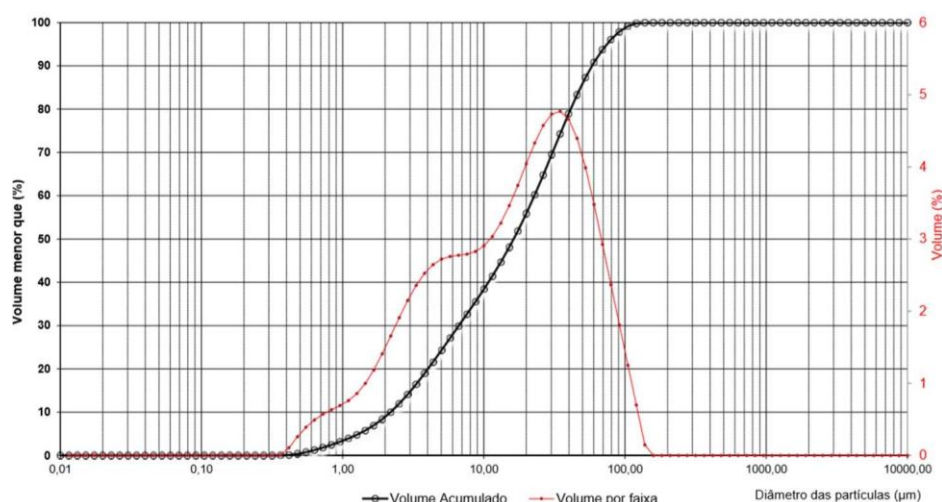
Pelo ensaio de granulometria a laser foi traçada a curva de distribuição de tamanho das partículas (FIGURA 37). Sabe-se que o pequeno tamanho das partículas possibilita partículas mais reativas, devido a maior área superficial, o que acelera as reações de hidratação.

Com relação as proporções de finura quando observado a superfície média ponderada tempo para o cimento Portland, conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Grandezas granulométricas do material

Dados da análise	CPII F POTY
Superfície média ponderada D [3,2]	5,476
D (0,1) (μm)	2,184
D (0,5) (μm)	16, 259
D (0,9) (μm)	58, 229

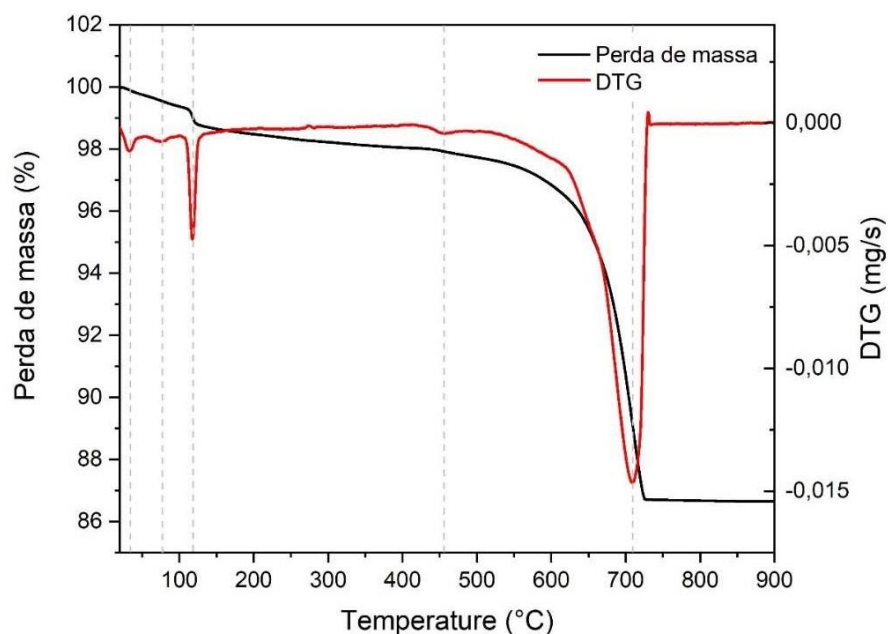
Figura 37 - Curva de Distribuição Granulométrica



3.2.1.2. Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial

A perda de massa total da análise térmica da amostra de cimento foi de 12,13 %. A curva DTG da amostra CPII F32 (FIGURA 38), apresenta 3 picos bem definidos e 2 bandas menos intensas. O pico em 33 °C e a banda centralizada em 73 °C correspondem a desidratação de silicatos hidratados que podem ter se formado devido à umidade absorvida durante o armazenamento e manuseio do material. O terceiro pico, em 117 °C, refere-se à desidratação do sulfato de cálcio di-hidratado (gipsita) (LEMOS, CUNHA e DWEK, 2017).

Figura 38 - Curva de perda de massa e DTG do CPlI F 32



3.2.1.3. Fluorescência de Raios x

A composição química do cimento Portland expressão em óxidos está apresentada na Tabela 7 abaixo:

Tabela 7 - Composição Química do CP II F

Elementos	Cimento
SiO ₂	12,033 %
Al ₂ O ₃	2,293 %
Fe ₂ O ₃	4,666 %
CaO	76,011 %
MgO	1,315 %
SO ₃	2,293 %
TiO ₂	-
K ₂ O	-
MnO	-

Na ₂ O	-
P ₂ O ₅	-
Outros	-

A composição granulométrica não apresentou diferenças significativas nas porcentagens dos compostos constantes no relatório da fabricante de cimento.

Observam-se na composição química do cimento analisado em sua maioria os compostos de óxido de cálcio e sílica, componente principal do calcário e da argila, com valores respectivos de 76,011 % e 12,033 %. Percebe-se também que na sua composição há uma pequena quantidade de 4,666% de Fe₂O₃ e 2,293 % de Al₂O₃. Tanto o CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ são componentes do clínquer. Todos esses compostos têm a propriedade de reagir em presença da água, por hidrólise, dando origem, então, a compostos hidratados.

A norma NBR 11578 (ABNT, 1991), não especifica percentual de SiO₂ para o CP II F, entretanto na análise química encontrou-se um percentual de 12,033% de SiO₂.

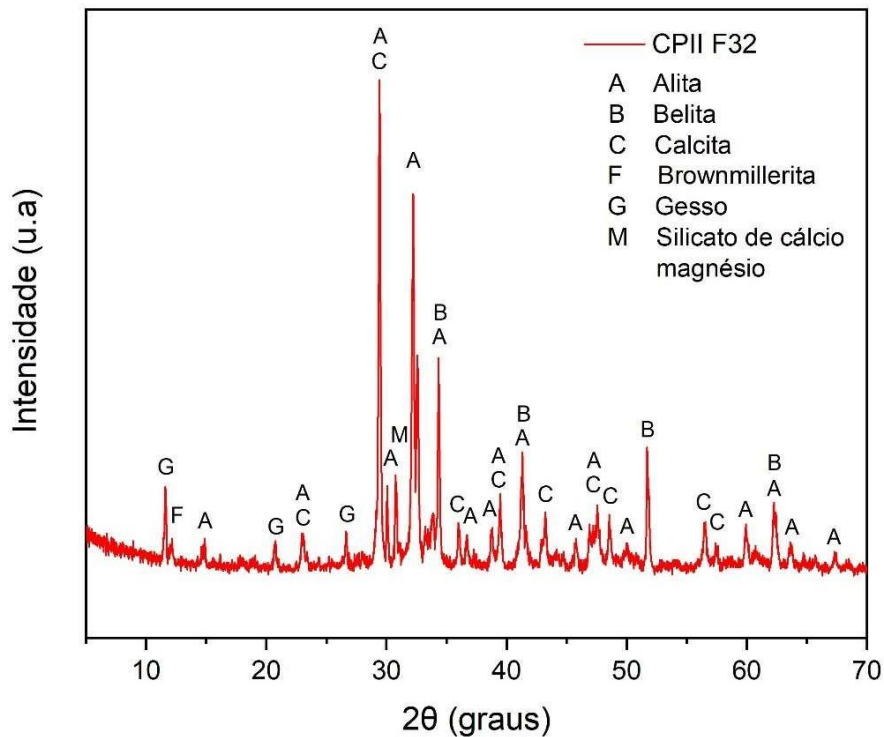
3.2.1.4. Difractometria de Raios X (DRX)

O difratograma da amostra de cimento CPII-F-32 (FIGURA 39) apresentou três das quatro principais fases do clínquer, presentes em cimentos dessa tipologia: Alita (ICSD 64759) ou Silicato tricálcico Ca₃O(SiO₄); Belita (ICSD 79550) ou Silicato dicálcico Ca₂(SiO₄); e Brownmillerita (ICSD 082967) ou Ca₂Fe_{1.052}Al_{0.665}Mg_{0.133}Si_{0.133}O₅ (PINTO et al., 2006; Hassaan, SALEM e EBRAHIM, 2008; LIMA 2020).

Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), a amostra refere-se a um cimento Portland composto com material carbonático, o que justifica a incidência do mineral Calcita (ICSD 29179), que é a forma de carbonato de cálcio encontrada no calcário, o qual é a principal matéria-prima para a fabricação de cimento Portland (HARRISSON, 2019).

O gesso é adicionado ao clínquer como aditivo retardador em uma porcentagem de 3–5 % em peso, durante o processo de fabricação do cimento (CAILLAHUA e MOURA, 2018) e a fase Silicato de cálcio magnésio (ICSD 086343), CaMgO₆Si₂, também é comumente identificada em cimentos Portland na literatura (SONG et al., 2006; SHIH et al., 2005; SONG et al, 2021).

Figura 39 - Difratoograma do CII-F-32



Alita (ICSD 64759), Silicato tricálcico $\text{Ca}_3\text{O}(\text{SiO}_4)$, C_3S

Belita (ICSD 79550), Silicato dicálcico $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$, C_2S

Calcita (ICSD 29179), Carbonato de Cálcio (CaCO_3)

Brownmillerita (ICSD 082967), $\text{Ca}_2\text{Fe}_{1.052}\text{Al}_{0.665}\text{Mg}_{0.133}\text{Si}_{0.133}\text{O}_5$

Gesso (ICSD 002058), Sulfato de Cálcio hidratado $\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_2$

Silicato de cálcio magnésio (ICSD 086343), $\text{CaMgO}_6\text{Si}_2$

3.2.2. Metacaulim

3.2.2.1. Granulometria a Laser

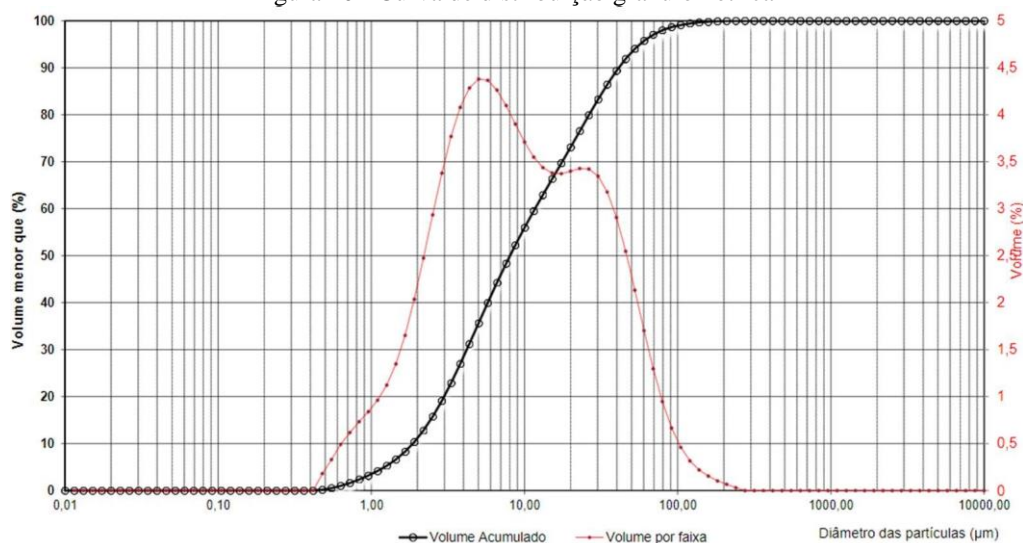
Realizou-se o ensaio de granulometria a laser em uma amostra de metacaulim: As leituras médias das porcentagens passantes acumuladas foram calculadas e o gráfico é apresentado abaixo na Figura 40, seguido dos diâmetros médios referentes a 10%, 50% e 90% da quantidade passante.

Com relação as proporções de finura quando observado a superfície média ponderada tempo para o metacaulim, conforme mostrado na Tabela 8:

Tabela 8 - Grandezas granulométricas do material

Dados da análise	AMOSTRA
	METACAILIM
Superfície média ponderada D [3,2]	4,377
D (0,1) (μm)	1,869
D (0,5) (μm)	8,04
D (0,9) (μm)	41, 133

Figura 40 - Curva de distribuição granulométrica

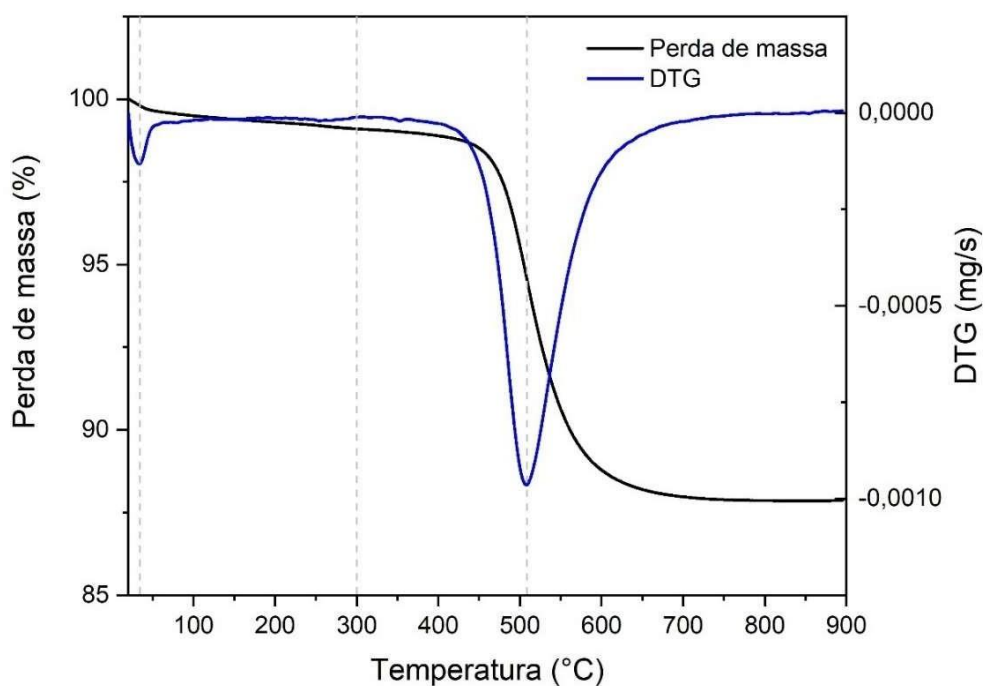


3.2.2.2. Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial

A análise térmica para a amostra Caulim (FIGURA 41) exibiu dois eventos térmicos: um iniciando em 20°C e terminado, aproximadamente, em 300° C. A perda de massa nesse estágio corresponde a apenas 0,92 % e refere-se ao processo de desidratação, no qual a água fisicamente ligada evapora (SUNITROVÁ e TRNÍK, 2018). No segundo evento térmico, de 300 °C a 900 °C, ocorre a desidroxilação da Caulinita e formação de Metacaulim (ECE et al., 2013). A saída máxima de íons OH⁻ é identificada no pico centralizado em 509 °C e a perda de massa é em torno de 11,23 %.

Através desse estudo térmico, pode-se perceber que a desidroxilação da Caulinita terminou por volta de 700 °C e, portanto, utilizou-se essa temperatura de queima para a produção de Metacaulim e posterior incorporação nas pastas.

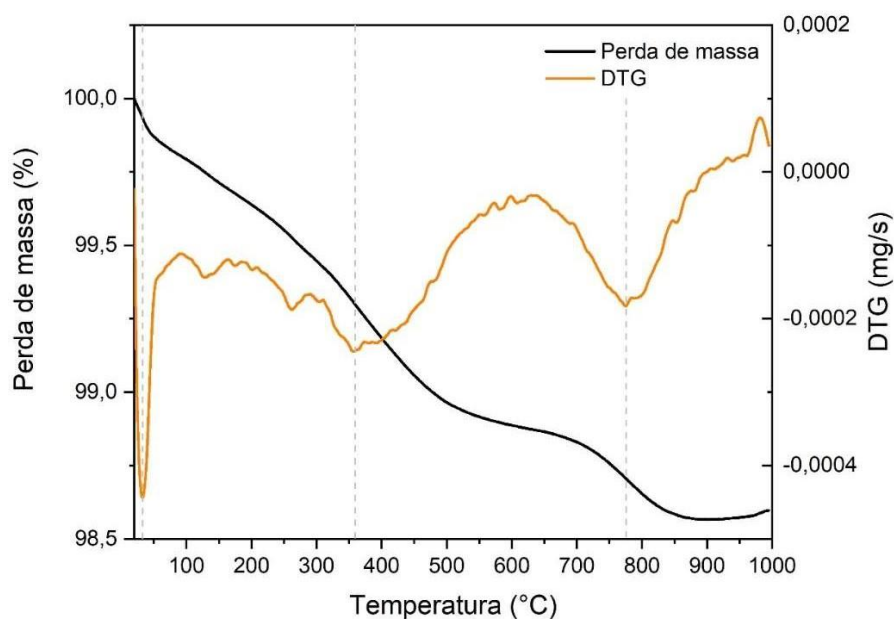
Figura 41 - Curva de perda de massa de DTG do Caulim



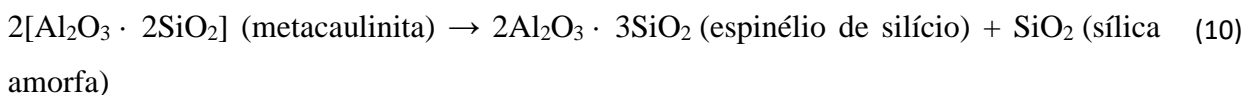
A perda de massa na análise térmica da amostra Metacaulim (FIGURA 42) apresentou-se contínua e com um total de 1,45 %. Na região entre 20 e 200 °C encontra-se a perda de água livre no material (IRASSAR et al., 2019).

Em torno de 200 a 400 °C, a perda de massa está associada à remoção de moléculas de água localizadas nas camadas intermediárias da Ilita e liberação de uma pequena quantidade de CO₂. A subsequente perda de massa de 0,6 % (entre 400 e 850 °C) refere-se a desidroxilação da Ilita e, entre 500 °C e 700 °C, também pode estar ocorrendo a desidroxilação da Caulinita remanescente (DRITS e MCCARTY, 2007; SOUZA, 2019; ANTAL et al., 2017).

Figura 42 - Curva de perda de massa e DTG do Metacaulim



A partir de de 800 ° C, ocorre o processo de vitrificação, sinterização e reações de alta temperatura. O pico em 981 °C corresponde à transformação da metacaulinita em uma fase cúbica de espinélio ($2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$ or $\text{Si}_3\text{Al}_4\text{O}_{12}$) e uma sílica amorfa (Equação 10) (PTÁČEK et al., 2013; ZHAN et al., 2020; BEWA et al., 2020).



3.2.2.3. Fluorescência de Raios X

A Tabela 9, apresenta os resultados obtidos da caulinita e metacaulim analisada, são listados os principais elementos químicos que compõem a amostra de caulim.

Tabela 9 - Composição química da Caulinita e da Metacaulim

Elementos	Caulinita	Metacaulim
SiO ₂	56,711 %	55,859 %
Al ₂ O ₃	36,809 %	38,007 %
Fe ₂ O ₃	2,969 %	2,807%

CaO	0,210 %	0,194%
MgO	0,000 %	0,000 %
TiO ₂	1,640 %	1,567 %
K ₂ O	0, 553 %	0, 541 %
P ₂ O ₅	0, 838 %	0, 772 %
Outros	-	-
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	96, 489	96, 673

A caulinita analisada consistiu predominantemente SiO₂ e Al₂O₃, compatíveis com a composição da caulinita (Al₂O₃.2SiO₂H.2H₂O). Além disso, o teor de Fe₂O₃ também de grande relevância, pois, geralmente é o responsável pelo aumento na coloração vermelha da caulim, o baixo teor deste para o caulim em estudo relaciona-se com a sua coloração branca (LORENTZ *et al.*, 2018).

A amostra atendeu ao requisito mínimo de 70% em massa para a soma de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, estabelecido na NBR 12653 (2014) e ASTM C618 (2014). Além disso não foram detectados na análise teores de SiO₃. As quantidades de K₂O, Na₂O e MgO foram baixas, este fator indica que a presença de montmorilonita e feldspatos não era provável (ALUJAS *et al.*, 2015).

Constatou-se que o metacaulim empregado possuem, em média, 96,67% de aluminossilicatos. Acredita-se que a maior contaminação em todas as amostras seja a do quartzo livre, por exemplo, na forma de areia fina, uma vez que o teor de alumina (Al₂O₃) está em 36,7% da amostra, enquanto que o teor de sílica (SiO₂) apresenta-se mais elevado. Tendo em vista que, para uso na construção civil, como aditivo ao concreto de cimento Portland, o ferro (Fe₂O₃) presente, em percentuais abaixo de 5%, não representa qualquer prejuízo a qualidade do produto final.

Dos álcalis existentes, foi encontrado apenas a presença do potássio (K), já que não encontrou-se a presença de sódio (Na). O óxido de potássio presente, deve ser devido à presença de baixas concentrações de feldspato ou muscovita. A preocupação quanto a presença de álcalis é devido a importância que o metacaulim exerce no combate da

reatividade álcali-agregado. Sendo o óxido de sódio, o álcali mais mais nocivo ao concreto, praticamente ausente em todas as amostras.

Tanto o óxido de potássio quanto o de sódio, para contribuírem às reações expansivas com alguns tipos de sílicas, silicatos e carbonatos presentes em alguns tipos de areia e pedra utilizadas na confecção de concretos, precisam estar na forma livre e solúvel, em geral não sendo prejudiciais se estiverem associados a outros compostos na forma de um mineral, como é o caso do feldspato ou da muscovita.

O óxido de titânio presente, em baixa concentração, não afeta diretamente o uso dos metacaulins como adição para produtos à base de cimento Portland, entretanto, há uma preocupação com a presença deste óxido, uma vez que pode estar associado a minerais que afetam negativamente as reações de endurecimento da pasta de cimento, diminuindo sua resistência mecânica ou química.

3.2.2.4. Difratomia de Raios X

Com relação aos padrões de DRX as reflexões $19,7^\circ$, $20,3^\circ$, $21,2^\circ$, $21,5^\circ$ e $23,0^\circ$ o 2θ , correspondem aos minerais caulinita (K), quartzo (Q), gibsitita (Gb), goethita (G) (CASTELLANO *et al.*, 2010).

A Figura 51 apresenta o espectro de difração de raios x da caulim e da metacaulim. A análise do difratograma de raios x, sugere a existência de minerais de argila e quartzo. Da presença do quartzo, resulta pico bem definido e de grande intensidade na amostra.

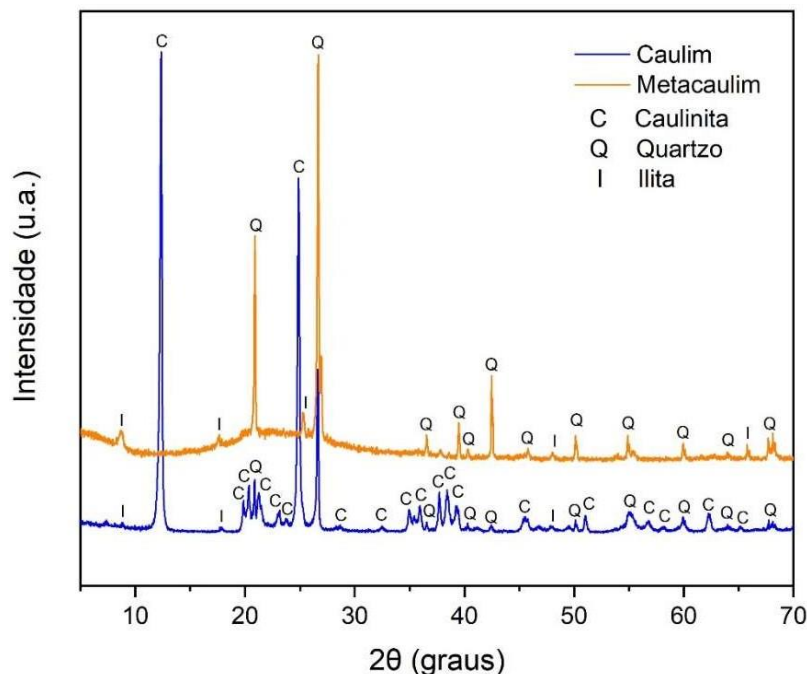
A análise de DRX do Caulim e do Metacaulim produzido exibiu picos referente aos minerais Quartzo (SiO_2 - ICSD 16331), Ilita ($\text{K, H}_3\text{O(Al,Mg,Fe)}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,\text{H}_2\text{O}]$ - ICSD 901440) e Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ - ICSD 63192). Os difratogramas das amostras estão expostos na Figura 43.

O caulim possui a caulinita como fase cristalina principal, mas também apresenta picos relacionados a Ilita e Quartzo, minerais comumente encontrados nesse tipo de argila (ISHIDA, 2010; MAIA *et al.*, 2015). Após a calcinação do Caulim a 700°C , obteve-se o Metacaulim cujos minerais identificados foram o Quartzo e a Ilita, como resíduos provenientes do material original.

A permanência dos minerais residuais no Metacaulim indica que suas estruturas não foram alteradas pela temperatura, permanecendo estáveis (FERNANDEZ, MARTIRENA e SCRIVENER, 2011). No entanto, o mesmo comportamento térmico não ocorreu para a Caulinita, a qual sofreu desidroxilação e conseqüente mudança no arranjo

estrutural, deixando de ser cristalino para desordenado (halo amorfo entre 15° e 30° 2θ na amostra Metacaulim), o que testifica a eficiência do processo de queima para obtenção de Metacaulim.

Figura 43 - Difratoograma do Caulim e Metacaulim



C Caulinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ – ICSD 63192

Q Quartzo SiO_2 – ICSD 16331

I Ilita $\text{K, H}_3\text{O}(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,\text{H}_2\text{O}]$ - ICSD 90144

Observou-se também uma sobreposição de picos, por exemplo, no difratograma do Caulim, em 25° 2θ, o pico da Caulinita encobre o pico da Ilita, que só é identificado após a desidroxilação, no difratograma do Metacaulim. E, ainda, presume-se que o pico correspondente a Ilita, em torno de 66° 2θ pode estar abaixo dos limites de detecção devido a normalização dos picos, por isso não foi identificado.

Os principais compostos cristalinos encontrados na amostra foram: quartzo (SiO_2) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). A amostra encontra-se amorfa com a presença de fases pozolanicamente inertes como quartzo, hematita, rutilo e moscovita.

Os picos de caulinita indicam que a argila não sofreu total calcinação para a formação do metacaulim. O teor de Fe_2O_3 (2,807 %), obtidos na análise química é confirmado com a presença de picos de hematita que confere uma cor alaranjada para compósitos com altos teores de metacaulim. Na Figura 30, pode-se visualizar também o

halo amorfo, característico de materiais pozolânicos, situado na faixa de $24,00^\circ 2\theta$, de acordo com a literatura que prescreve que a banda difusa (halo amorfo), situa-se na faixa de 20° a $30^\circ 2\theta$. Esta banda indica a presença de materiais amorfos na amostra.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISES DOS RESULTADOS

4.1. MATRIZ CIMENTÍCIA

4.1.1. Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial

A análise termogravimétrica da pasta feita apenas com o cimento CPII F32 pode ser dividida em três faixas principais de temperaturas (FIGURA 44). Entre 20 °C e 300 °C, com perda de massa de 17,06 %, os picos endotérmicos da curva DTG são atribuídos a liberação da água fisicamente ligada, à decomposição de hidratos de silicato de cálcio (CSHs), etringita (AFt) e sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (VOGLER et al., 2020).

A decomposição e desidroxilação de portlandita ocorre entre 300 e 500 °C (perda de 4,32 %) e a última região de temperatura, de 500 a 1000 °C (perda de 10,57 %), possui um pico em torno de 700 °C que corresponde à descarbonatação do CaCO_3 (HE et al., 2021; HAMIDI et al., 2013). A perda total da análise foi de, aproximadamente, 31,95 %.

A pasta com adição de metacaulim (FIGURA 45) exibiu perda de massa constante com um total de 29,33 %, denotando um teor menor de matéria orgânica, comparada a pasta sem adição. Assim como a amostra anterior, pode-se dividir a análise em três faixas de temperatura para o reconhecimento das reações.

Na primeira região, entre 20° C e 200 °C, tem-se uma perda de massa de 14,5 % que indica perda de umidade e depois perda de água fisicamente ligada em CSH e outros hidratados (RASHAD e SADEK, 2017).

O pico em 270 °C, na segunda faixa de temperatura (200-500°C), corresponde a decomposição da gehlenita hidratada (C_2ASH_8), um produto de hidratação nas pastas de cimento com mistura de metacaulim (GLEIZE, CYR e ESCADEILLAS, 2007; DING et al., 2020). A perda de massa foi de 7,56 %.

A partir de 500 °C até o fim da análise obteve-se uma perda de massa de 7,27 % e um pico em torno de 700 °C que, novamente, refere-se a descarbonatação do CaCO_3 (HE et al., 2021; HAMIDI et al., 2013).

Figura 44 - Curva de perda de massa e DTG da pasta cimentícia

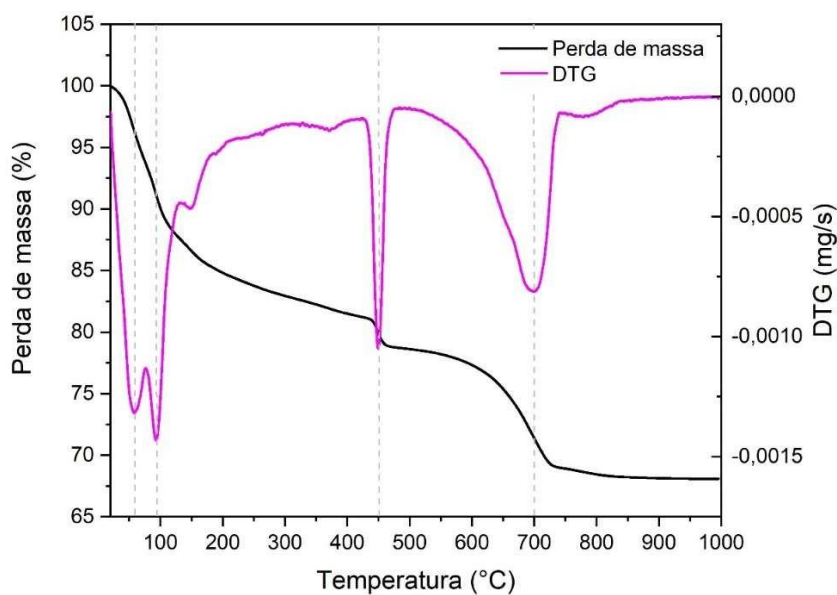
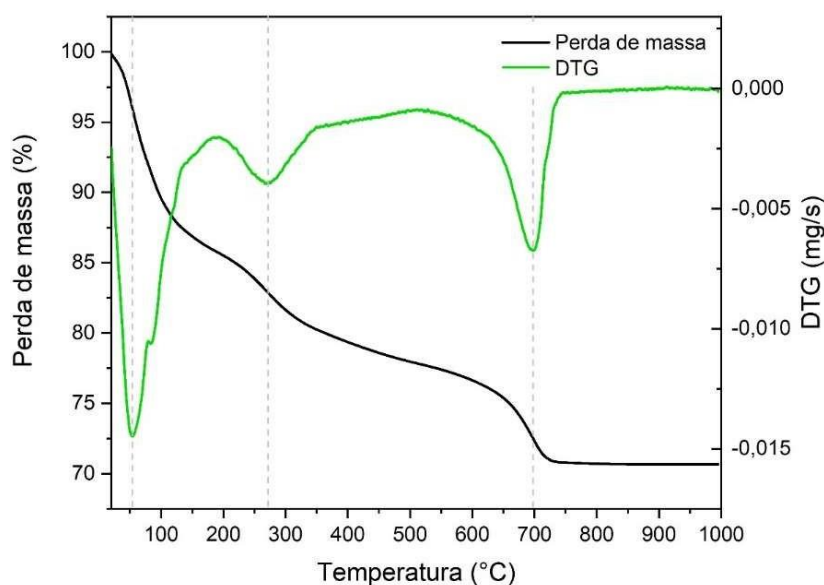


Figura 45 - Curva de perda de massa da pasta 50M



Comparando-se os dois gráficos pode-se notar uma diminuição do Hidróxido de cálcio (CH), pois houve uma diminuição no pico endotérmico entre 400 e 450 ° C. Tal fator indica a reatividade pozolânica do material e a progressão do consumo do hidróxido de cálcio.

A interação do material pozolânico com o hidróxido de cálcio em meio aquoso resulta em compostos hidratados similares aos resultantes do cimento Portland hidratado. A diferença entre os dois sistemas é que o cimento Portland puro libera o hidróxido de cálcio

como um subproduto, enquanto a atividade pozolânica utiliza desse subproduto para formação de cristais mais resistentes (HOPPE FILHO, 2008).

4.1.2. Resistência à compressão

Os corpos de prova foram moldados, postos em cura úmida, capeados e rompidos à compressão em 24 horas, 1, 3, 7 e 28 dias de idade, como pode-se visualizar na Figura 46 para a argamassa de cimento Portland (MCIM) e na Figura 47 para a argamassa com 50% metacaulim (MK50).

Figura 46 - CP de matriz de cimento



Figura 47 - CP com 50% de metacaulim



A Tabela 10 e 11 apresentam os valores de resistência à compressão para as duas matrizes utilizadas nas pesquisas.

Os valores médios de resistência à compressão obtidos pela matriz referência (MCIM) são mostrados no gráfico da Figura 48. Acerca dos corpos de prova de matriz com 50% de metacaulim (MK50) os resultados alcançados são mostrados no gráfico da Figura 49.

Tabela 10 - Resist. à compressão da matriz unicamente de cimento Portland

RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DA ARGAMASSA COM 50% DE METACAU LIM (MPa)				
CORPOS DE PROVA	1 d	3 d	7d	28d
CP1	22,5	33,5	39,3	44,2
CP2	19	29,6	37,6	49,6
CP3	23	34,8	40,6	50,6
CP4	25	35,6	42,01	52,4
RM	23,5	34,63333333	40,63666667	50,86666667
DESVIO RELAT MAX	4,26	3,27	5,71	5,51

Tabela 11 - Resistência à compressão da matriz com metacaulim

RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DA ARGAMASSA COM CIMENTO PORTLAND				
CORPOS PROVA	1 d	3 d	7d	28d
CP1	15,9	20,8	35,6	41,18
CP2	14,2	19	33,9	
CP3	10,05	15,3	31,6	34,85
CP4	14,6	19,5	34,1	35,16
RM	14,9	19,76666667	34,53333333	36,37
DESV RELAT MAX	4,7	3,88	1,83	1,39

Figura 48 - Gráfico de Resistência à compressão da argamassa com 50% de MK

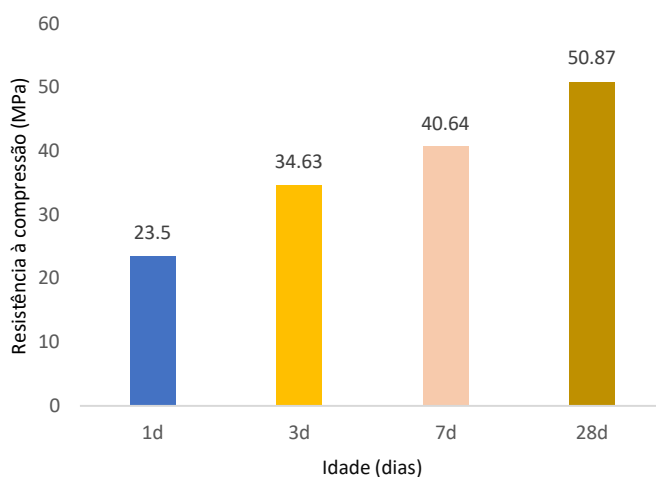
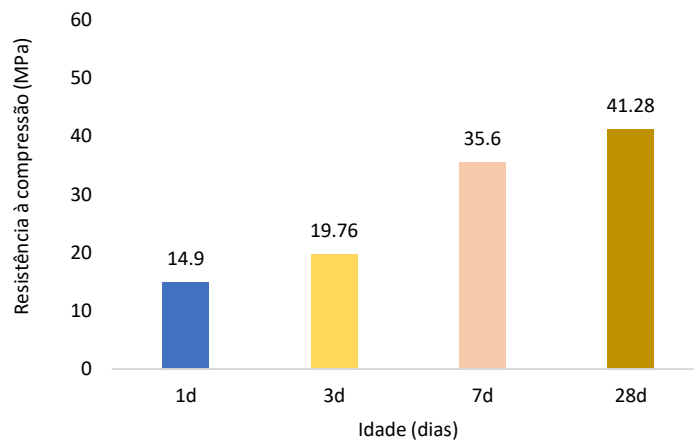


Figura 49 - Gráfico de Resistência à compressão da argamassa MCIM



Mesmo com 50% a menos de cimento Portland na argamassa MK50, sua resistência à compressão não sofreu reduções drásticas, devido a atividade pozolânica desenvolvida pela metacaulim durante a hidratação do cimento, a qual influenciou de forma significativa nos resultados conforme as idades. Pode-se atribuir esse fato às reações pozolânicas que reduzem a porosidade sensivelmente, tornando a matriz mais densa e também ao fato que a adição de metacaulim provocou um maior adensamento de mistura devido ao refinamento dos poros. Tal resultado pode ser alinhado, com base nos gráficos de análise termogravimétrica (TG\DTG) que indicaram um aumento significativo na produção de silicatos e aluminatos na argamassa MK50.

4.2. ANÁLISE DOS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM TECIDOS DE FIBRA DE JUTA E MALVA

São apresentados neste item os resultados e análises dos ensaios de flexão em quatro pontos, de acordo com as diferentes disposições das camadas dos reforços fibrosos dos compósitos.

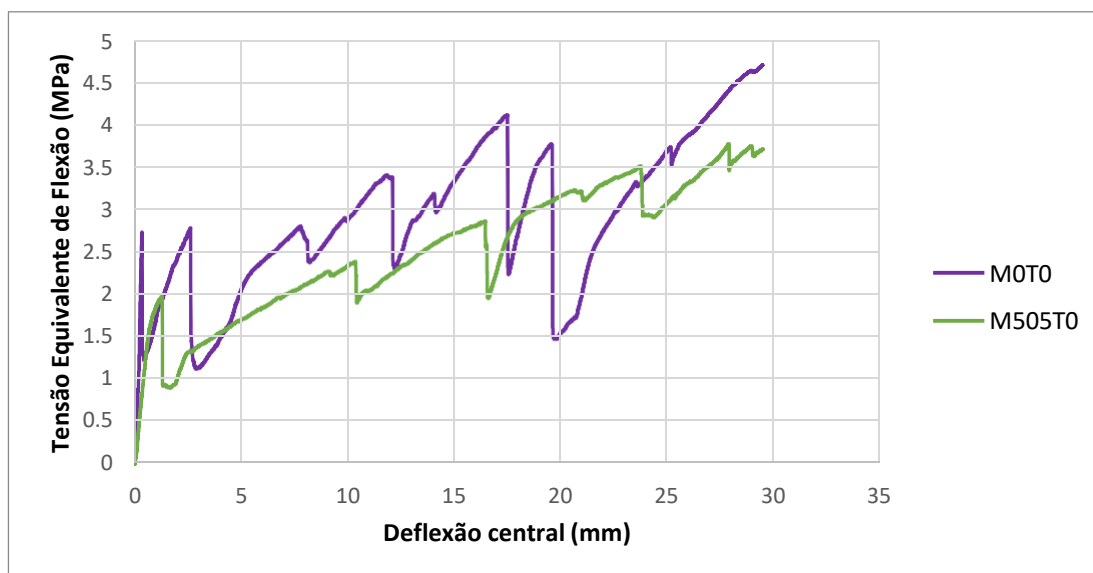
4.2.1. Influência do número de camadas

Na Figura 50 são apresentadas curvas características para os compósitos sem tratamento superficial reforçados com 3 (M0T0) e 5 (M505T0) camadas de tecidos de fibras de Juta e Malva.

Analisando-se os gráficos percebeu-se um comportamento muito parecido para os dois compósitos com o aparecimento de microfissuras ao longo do ensaio. Com relação às

quedas de tensões, verificou-se que os compósitos com 3 camadas apresentaram uma queda maior de tensão que os com 5 camadas, explicado pelo fato da placa com 5 camadas ter maior concentração de fibras na seção transversal do compósito.

Figura 50 - Curvas típicas de tensão x deflexão dos compósitos sem tratamento



A tabela 12 abaixo mostra os resultados obtidos para as amostras de 3 e 5 camadas de tecidos fibrosos. Os compósitos com 3 camadas apresentaram melhor desempenho com relação à flexão e além disso apresentaram maior deformação.

Tabela 12 - Valores médios de tensão e deflexão do ensaio de flexão dos compósitos

CP	1ª fissuração		Máximo	
	σ_{1f} (Mpa)	d1f (mm)	σ_{max} (Mpa)	dmax (mm)
M3T0	2,56 (0,05)	0,34 (0,01)	4,2 (0,09)	22,31 (5,0)
M505T0	1,94 (0,03)	1,57 (0,33)	3,24 (0,515)	18,6 (4,22)

Nas figuras 51 e 52 é possível observar o comportamento dos corpos de prova submetidos ao ensaio de flexão para ambas as camadas utilizadas. Nas figuras observa-se o comportamento semelhante das fissuras produzidas pela carga aplicada durante a realização do ensaio. Observa-se que o estado de fissuração para ambos os compósitos é dominado por múltipla fissuração. É evidente a contribuição da matriz cimentícia na região elástica até a ocorrência da primeira fissura, após isto, inicia o importante papel do reforço. Isto decorre da transferência de tensões da matriz para as fibras, gerando ao compósito a

capacidade de suportar cargas e não romper (comportamento dúctil) sem antes apresentar expressivas deformações.

Figura 51 - Placa cimentícia com 3 camadas (M0T0)

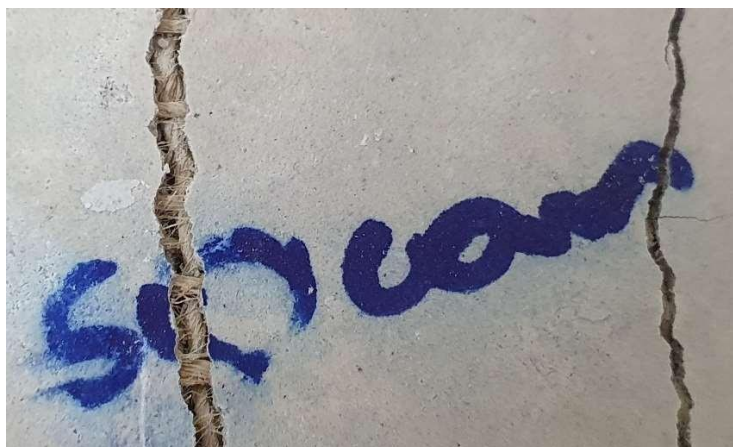


Figura 52 - Placa com 5 camadas não tratadas (M505T0)



Na Figura 53 pode-se visualizar com detalhes uma das fissuras formadas, sendo visível a camada de reforço e a evidência que não ocorreu rompimento total das amostras.

Figura 53 - Detalhes de rompimento da M505T0

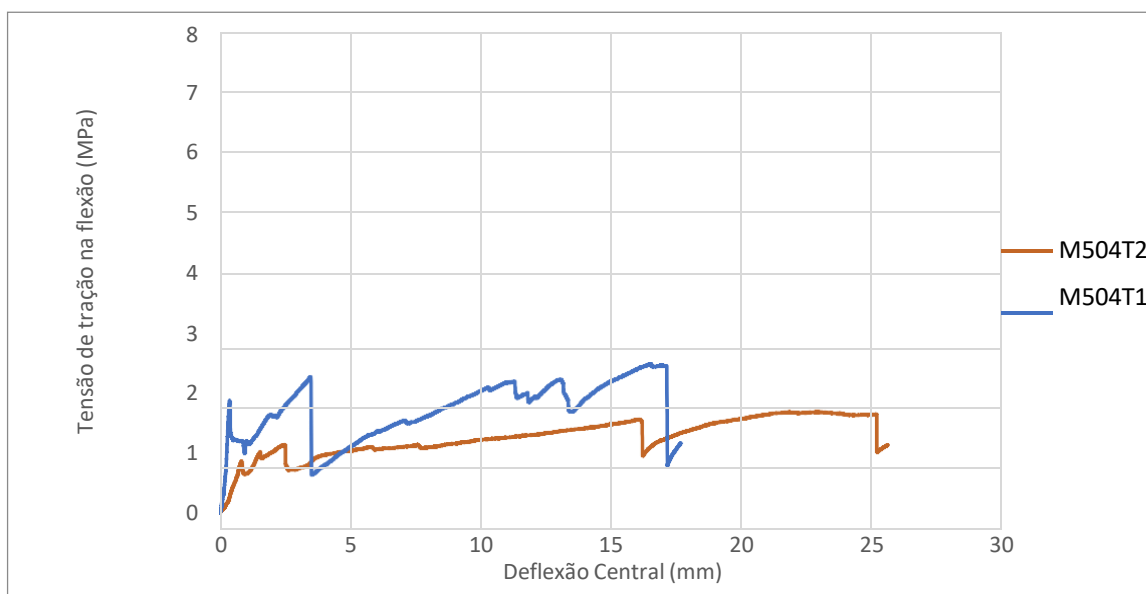


4.2.2. Influência dos tratamentos nas fibras

Os compósitos com 4 camadas de tecidos fibrosos foram tratados de 2 formas, com resina acrílica e com impermeabilizante. Curvas típicas de tensão equivalente de flexão x deflexão para as misturas são apresentadas na Figura 54 abaixo.

É evidente após análise do gráfico que o tratamento t2 proporcionou uma melhor aderência no compósito que o tratamento t1, pois, houve uma menor queda de tensão. Em todos os casos observou-se que imediatamente após a tensão de primeira fissura, ocorre queda na carga.

Figura 54 - Curvas típicas de tensão x deflexão dos compósitos tratados



Na Tabela 13 encontram-se os valores médios e respectivos coeficientes de variação de tensão de primeira fissuração (σ_{1f}), deflexão de primeira fissura (d_{1f}), máxima tensão atingida (σ_{\max}) e deflexão referente à máxima tensão (D_{\max}).

Tabela 13 - Valores médios de tensão e deflexão do ensaio de flexão dos compósitos

CP	1ª fissuração		Máximo	
	σ_{1f} (Mpa)	d_{1f} (mm)	σ_{\max} (Mpa)	d_{\max} (mm)
M504T1	2,25 (0,41)	0,36 (0,02)	2,91 (0,57)	20,84 (2,95)
M504T2	0,97 (0,13)	0,77 (0,07)	1,66 (0,03)	24,56 (3,41)

Com relação aos valores de deflexão de primeira fissura Tabela 13, observou-se que as placas tratadas com impermeabilizante (t2) obtiveram maior deflexão, devido a uma melhor aderência entre fibra e matriz. Para os valores de tensão última, as placas tratadas com tratamento 1 (t1) apresentaram melhor desempenho, 57,54% maior que as de tratamento 2.

Na Figura 55 e 56 estão apresentados os modos de fissuras das placas com os 2 tipos de tratamento, t1 e t2, respectivamente.

Figura 55 - Placa com 4 camadas t1 (M504T1)



Figura 56 - Placa com 4 camadas t2 (M504T2)



Após análise dos resultados é sabido que após o estado de primeira fissura o tecido fibroso com tratamento 1 desempenhou maior capacidade de ponte de transferência de tensão entre fibra e a matriz, o que pode ser confirmado pois o compósito alcançou maior tensão máxima. O aumento do módulo de ruptura à flexão no compósito M504T1 foi decorrente da maior adesão interfacial fibra-matriz, evidenciada pela fixação dos produtos de hidratação nas partículas (ancoragem física e química).

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÃO

Nesta pesquisa produziram-se compósitos cimentícios utilizando como reforço tecidos de fibras de malva e juta com modificação na matriz através de substituição parcial por metacaulim. Os compósitos foram moldados em formato de placas de dimensões 400x400x10mm, sendo que o reforço foi dividido em 3, 4 e 5 camadas, com fração volumétrica de 5%, 10% e 15% intercaladas na matriz.

Quando tratamos de resistência à intempéries de compósitos cimentícios reforçados com fibras lignocelulósicas, muitos autores consideram que estes possuem boas resistências físico-mecânicas iniciais, porém, após experimentos tanto de envelhecimentos acelerados quanto envelhecimentos a intempéries naturais, a resistências físico-mecânicas (resistência á tração, resistência á flexão, resistência ao impacto e permeabilidade) tendem a serem diminuídas, devido a degradação das fibras lignocelulósicas pela alcalinidade da matriz cimentícia.

Com relação a calcinação da caulim pode-se observar já no rejeito de caulim calcinado, os picos da caulinita somem. Isso ocorreu devido a calcinação destruir o ordenamento estrutural desse mineral, tornando o mesmo uma fase amorfa.

A aplicação de metacaulinita em substituição do cimento é justificada tanto pelas suas características físicas, químicas e a granulometria próxima a do cimento utilizado. Foi possível observar que a composição química da metacaulinita atende aos requisitos normativos para utilização como pozolana. Além disso, por meio dos ensaios de DRX, FRX e TG é evidenciada a efetividade da queima realizada nas amostras de argila. Uma vez que tal fator pode alterar a reatividade da mesma. Entretanto, são necessários ensaios para determinação de parâmetros físicos como a massa específica, índice de atividade pozolânica e a morfologia do caulim estudado para que seja possível conhecer as variáveis que podem influenciar a atividade pozolânica do produto final.

Por conseguinte a matriz dosada com substituição parcial de 50% cimento Portland por metacaulinita teve menor teor de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , pois conforme mostrado no ensaio de termogravimetria (TG-DTG) o pico relacionado a este foi diminuído.

Em relação ao tratamento do reforço, as impermeabilizações escolhidas impossibilitaram a fibra de absorver a água de hidratação presente na mistura cimentícia e além disso, garantiram uma boa interface fibra-matriz. Sendo que o tratamento com resina acrílica (t1) obteve melhor resultado em relação ao impermeabilizante de tecido (t2).

Por fim, os resultados dos ensaios de flexão para os compósitos rompidos em 28 dias de idade mostraram que as placas com 4 camadas e tratadas com resina acrílica obtiveram melhor resistência a primeira fissura e maior resistência máxima, entretanto a placa reforçada com 5 camadas apresentou maior deflexão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREA – Associação Brasileira dos Expostos ao Amianto. 2016. <http://www.abrea.com.br/02amianto.htm>. Acessado em julho de 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653 –Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

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

American Society for Testing and Materials. C1557 – Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers¹, 2004.

American Society for Testing and Materials. D5370 – Standard Specification for Pozzolanic Blended Materials in Construction Applications, 2014.

AGOPYAN, V. et al. *Developments on Vegetable Fibre–Cement Cased Materials in São Paulo, Brazil: an Overview. Cement & Concrete Composites*, British Columbia, v. 27, p. 527-536, May. 2005.

AGUIAR, S. A. *Estudo das propriedades físicas e mecânicas de placas cimentícias reforçadas com fibras longas de malva*. 2016. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

ALMEIDA, A. E. F. S. et al. *Improved durability of vegetable fiber in reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. Cement & Concrete Composites*, Barking, v. 42, n. 2, p. 49-58, Sept. 2013.

ARRUDA FILHO, B. A. *Placas cimentícias reforçadas com tecidos estruturais de sisal*. 2015. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

AZEVEDO, M.A. *Síntese e caracterização química, física e mecânica de geopolímero utilizando caulim da Amazônia desidroxilizado*. 2017. 41f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Tecnologia/PPGEC, Universidade Federal do Amazonas.

BARROS, S.M. *Desenvolvimento de painéis sanduíches com núcleo de EPS e placas de face cimentícias como sistema de tecnologia construtiva para casas populares em Manaus*. 2019. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Tecnologia/PPGEG, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

BENINI, K.C. C.C. *Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas: HIPS/fibras de casca de coco verde e bagaço da cana de açúcar*. 2011.125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

BENTUR, A., MINDESS, S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. 2 Ed. London and New York: Elsevier Applied Science, 2007. 625 p.

CAETANO, L. F. et al. *Compósito de matriz cimentícia reforçada com fibras*, 2004. Trabalho apresentado ao: II SEMINÁRIO DE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES – NOVOS MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES, Porto Alegre, 2004.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D.G. *Materials Science and Engineering an Introduction*. 8 Ed., New York: Willey, 2012. 975 p.

CALLISTER, JR.; William D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 7 Ed., New York: LTC Editora S.A, 2000.

CAMPOS, W.P.A. *Placas cimentícias obtidas a partir de argamassas de aluminossilicatos*. 2016. 53f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Tecnologia/PPGEC, Universidade Federal do Amazonas.

CLARAMUNT, J. et al. *The Hornification of Vegetable Fibers to Improve the Durability of Cement Mortar Composites, Cement & Concrete Composites*, Barking, v. 33, n. 5, p. 586-595. may. 2011.

COOKE, A. M. et al. *Durability of autoclaved cellulose fibercement composites*. In: INORGANIC – BONDED WOOD AND FIBRE CONFERENCE, Sidney, 2000.

COUTTS, R. S. P. *A review of Australian research into natural fibre cement composites. Cement & Concrete Composites*, Barking, v. 27, n. 5, p. 518-526, May. 2005.

DEFOIRDT, N., et al. *Assessment of the Tensile Properties of Coir, Bamboo and Jute Fibre, Composites: Part A*, Kidlington, v. 41, n.5, p. 588–595. May. 2010.

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*, Kidlington, v.43, n.8, p. 1419-1429, Ago.2012.

FAELLA, C. et al. *Shear Capacity of Masonry Walls Externally Strengthened by a Cement-Based Composite Material: An Experimental Campaign, Construction and Building Materials*, Guildford, v. 24, n.1, p. 84-93, Jan. 2010.

FIDELIS, T. *Desenvolvimento e Caracterização Mecânica de Compósitos Cimentícios Têxteis Reforçados com Fibras de Juta*. 2014. 295 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), PEC/COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

GOMES, M.F.E. *Desenvolvimento e Caracterização Mecânica de Placas Cimentícias Reforçadas com Tecido de Juta e Malva e Substituição Parcial do Cimento por Metacaulinita*. Manaus: UFAM, 2019. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Amazonas, Amazonas, 2019.

GOPINATH, S. et al. *PreFabricated Sandwich Panels using Cold-Formed Steel and Textile Reinforced Concrete, Construction and Building Materials*, Guildford, v. 64, p. 54-59. Ago.2014.

GONÇALVES, J. P. *Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental e contendo argila calcinada e areia artificial*. 2005. 292 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), PEC/COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

GUIMARÃES, S. S. *Fibra vegetal-cimento - Resultados de algumas experiências realizadas no THABA/CEPED, 1987*. Apresentado ao: I SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUÇÃO E TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA EM HABITAÇÃO: DA PESQUISA À PRÁTICA, São Paulo, 1987.

IZQUIERDO, S. I. *Uso de Fibras de Sisal em Blocos de Concreto para Alvenaria Estrutural*. 2011. 146 f. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia das Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

JOHN, M. J. ANANDJIWAL, R. D. *Recent Developments in Chemical Modification and Characterization of Natural Fiber-Reinforced Composites*. *Polymer Composites*, South Africa, v. 29, n.2, p. 187-207. Feb. 2008.

LEÃO, A. Secretário executivo do Instituto de Fibras da Amazônia – IFIBRAN. Produção de juta e malva envolve 15 mil famílias no norte do país. *Revista Globo Rural*. Globo, 2010. Entrevista concedida a Luís Roberto Toledo. Disponível em:<<http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,,ERT146775-18078,00.html>> Acesso em: 05 abril 2017.

Lima, J.A.Q. *Forma colaborante para elementos estruturais usuais de concretoarmado – produzida com matriz cimentícia, reforçada com armadura*. 2019. 187f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Tecnologia/PPGEC, Universidade Federal do Amazonas. Manaus.2019.

LIMA, P. R. L. *Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal*. 2004. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), PEC/COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

LUZ, A. B., CAMPOS, A.R., CARVALHO, E.A. e BERTOLINO, L.C. *Caulim*. In *Rochas & Minerais Industriais: usos e especificações*. 2 Ed, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p.231-262, 2005.

KANTRO, D. L. *Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste - a miniature slump test*, *Cement, Concrete, and Aggregates*, Winter, v.2, n.2, p. 95-108, 1980.

MAGALHÃES, M. S. *Caracterização Experimental de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de PVA: Processo de Fratura, Propriedades Térmicas, Deformações Diferidas e Estabilidade Térmica*. 2010. 245 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), PEC/COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MARGEM, J.I. et al. *Infrared spectruscopy analysis of malva fibers*. Trabalho apresentado ao: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DE MATERIAIS, Joinville, 2012.

MARGEM, J.I. *Estudo das Características Estruturais e Propriedades de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Malva*. 2013. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Campus de Goytacazes, Universidade Federal do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2013.

MARTINS NETO, S.F. *Material compósito de matriz frágil reforçado com fibras naturais de sisal e malva: caracterização e correlações das propriedades mecânicas*. 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, 2011.

MARQUES, M. G. *Caracterização das propriedades da fibra vegetal de Arumã para aplicação como reforço à matriz cimentícia*. 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil), Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

MARQUES, C.S. *Estudo comparativo do potencial pozolânico de adições argilo-minerais disponíveis no Amazonas e Porto Velho*. 2017. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Tecnologia/PPGEC, Universidade Federal do Amazonas.

MELO FILHO, J. A. *Desenvolvimento e Caracterização de Laminados Cimentícios Reforçados com Fibras Longas de Sisal*. 2009. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), PEC/COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

MELO FILHO, J. A. *Durabilidade Química e Térmica e Comportamento Mecânico de Compósitos de Alto Desempenho Reforçados com Fibras de Sisal*. 2012. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), PEC/COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 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 & Concrete Composites*, British Columbia, v. 40, p. 30-39, Jul. 2013.

MORRISSEY, F. E., COUTTS, R. S. P., GROSSMAN, P. U. A. Bond between cellulose fibres and cement, *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, v. 7, p. 73-80. May. 1985.

NEUPANE, K. *High-Strength Geopolymer Concrete- Properties, Advantages and Challenges*, Science Publishing Group, v.7, p.1-11. 2018.

OCHI, S. *Mechanical Properties of Kenaf Fibers and Kenaf/PLA Composites*, *Mechanics of Materials*, v. 40, n. 4-5, p. 86–96. May. 2008.

OLIVEIRA, I. R. *Propriedades mecânicas, físicas e químicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras longas de juta e de malva*. 2013. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.

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

PASTUSZKA, J. S. *Emission of airborne fibers from mechanically impacted asbestos-cement sheets and concentration of fibrous aerosol in the home environment in Upper Silesia, Poland*, *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdam, v. 162, n. 2, p. 1171-1177, Jun. 2008.

PINTO, A. R. A. G., *Fibra de Curauá e Sisal como Reforço em Matrizes de Solo*. Rio De 2008. 106 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2008.

PELED, A., BENTUR, A. *Geometrical Characteristics and Efficiency of Textile Fabrics for Reinforcing Cement Composites*, *Cement and Concrete Research*, v. 30, n.5, p. 781-790. May. 2000.

PELED, A., COHEN, Z., PASDER, Y., ROYE, A., GRIES, T. *Influences of Textile Characteristics on the Tensile Properties of Warp Knitted Cement Based Composites*, *Cement & Concrete Composites*, British Columbia, v. 30, n. 3, p. 174–183. Mar. 2008.

RODRIGUES, C. S., GHAVAMI, K., STROEVEN, P. *Rice Husk Ash as a Supplementary Raw Material for the Production of Cellulose–Cement Composites with Improved Performance*, *Waste Biomass Valorization*, v. 1, n. 2, p. 241–249. Apr. 2010.

RODRIGUES, F. *Estudo da influência de diferentes tratamentos (fibra-matriz) nas propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com fibra de malva*. 2015. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus. 2015.

SAVASTANO, Jr. et al. *Seleção de Resíduos de alguns tipos de fibras vegetal, para reforço de componentes de construção*. Apresentado ao: Encontro Nacional Sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis. Canela, 2000.

SAVASTANO JR. et al. *Fracture and Fatigue of Natural Fiber-Reinforced Cementitious Composites*, *Cement & Concrete Composites*, British Columbia, v. 31, n.4, p. 232–243. Apr. 2009.

SIERRA BELTRAN, M. G., 2011, *Ductile Cement-Based Composites with Wood Fibres*, Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Geociência) Technische Universiteit Delft, 2011. 170 f. Holanda, 2011.

SILVA, F. A., CHAWLA, N., TOLEDO FILHO, R. D. *Tensile Behavior of High Performance (sisal) Fibers*, *Composites Science and Technology*, New York, v. 68, n. 15-16, p. 3438-3443. Dec. 2008.

SILVA, F. A. *Durabilidade e Propriedades Mecânicas de Compósitos Cimentícios Reforçados por Fibras de Sisal*. 2009. 254 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), PEC/COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, F. A. et al. *Physical and Mechanical Properties of Durable Sisal Fiber–Cement Composites*, *Construction and Building Materials*, Guildford, v. 24, n.5, p. 777-785. May. 2010.

SORANAKOM, C., MOBASHER, B. *Geometrical and Mechanical Aspects of Fabric Bonding and Pullout in Cement Composites*, *Materials and Structures*, v. 42, p. 765 -777. Jul. 2009.

SOUZA, O.L. *Mecanismos de Fissuração e Autocicatrização de Compósitos Cimentícios Reforçados com Tecidos de Curauá*. 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Civil), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/PUC, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

TIRONI, Alejandra et al. Pozzolanic activity of calcined halloysite-rich kaolinitic clays. *Applied Clay Science*, [s.l.], v. 147, p.11-18, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2017.07.018>.

THOMAS, S. *Natural Fibres: Structure, Properties And Applications, in Cellulose Fibers: Bio and Nano Polymer Composites – Green Chemistry and Technology*. Springer-Verlag. Edited by: KALIA, S., KAITH, B. S., KAUR, I. 2011.

TOLEDO FILHO, R. D. *Materiais Compósitos Reforçados com Fibras Naturais: Caracterização Experimental*. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), DEC-PUC-Rio / DEC-Imperial College - Londres, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 1997.

TOLEDO FILHO, R. D. et al. *Development of Vegetable Fibre–Mortar Composites of Improved Durability, Cement & Concrete Composites*, *British Columbia*, v. 25, n. 2, p. 185–196. Feb. 2003.

TOLEDO FILHO, R. D., SILVA, F. A., FAIRBAIRN, E. M. R., MELO FILHO, J. A. *Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates*, *Construction and Building Materials*, Guildford, v. 23, n.6, p. 2409–2420. Jun. 2009.

TOMCZAK, F., SATYANARAYANA, G., SYDENSTRICKER, T. H. D. *Studies on lignocellulosic fibers of Brazil: Part III – Morphology and properties of Brazilian curauá fibers*, *Composites: Part A*, Kidlington, v. 38, n.10, p. 2227–2236. Oct. 2007.

TOMCZAK, F. *Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil*. Curitiba: UFPR, 2010. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2010.

TRIMURTININGRUM, L. *Influence of Legth Variation in Bamboo Fiber on Tensile Strength and Compressive Strength of Concrete*. Civil Engineering Universitas, Indonésia. 2019.

TONOLI, G. H. D. et al. *Impact of Bleaching Pine Fiber on the Fibre/Cement Interface*, *Journal of Materials Science*, v. 47, n.9, p. 4167-4177, May. 2012.

WEBER, M.A. *Viabilidade Técnica da Utilização de Fibra de Curauá como Reforço em Compósitos Cimentícios Laminados*. Curitiba: UTFPR, 2018. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2018.

ZHAO-TIE, L. et al. *A green route to prepare cellulose acetate particle from ramie fiber*, *Reactive and Functional Polymers*, v. 67, n.2, p. 104-112. Feb. 2007.