



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

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO CIMENTÍCIO
HÍBRIDO REFORÇADO COM FIBRAS CURTAS DE MALVA E RESÍDUOS
MADEIREIRO**

JAÍNE KÉSSIA LIRA GALVÃO

MANAUS-AM
2021

JAÍNE KÉSSIA LIRA GALVÃO

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO CIMENTÍCIO
HÍBRIDO REFORÇADO COM FIBRAS CURTAS DE MALVA E RESÍDUOS
MADEIREIRO**

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

Orientadora: Prof^a. Dr. Virginia Mansanares Giacon

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).

G182d Galvão, Jaíne Késsia Lira
Desenvolvimento e caracterização de compósito cimentício
híbrido reforçado com fibras curtas de Malva e resíduos madeireiro
/ Jaíne Késsia Lira Galvão . 2021
107 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Virgínia Mansanares Giacon
Coorientador: João de Almeida Melo Filho
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) -
Universidade Federal do Amazonas.

1. Cimento-madeira. 2. Flexão. 3. Inflamabilidade. 4.
Metacaulinita. 5. Tenacidade. I. Giacon, Virgínia Mansanares. II.
Universidade Federal do Amazonas III. Título

JAÍNE KÉSSIA LIRA GALVÃO

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO CIMENTÍCIO
HÍBRIDO REFORÇADO COM FIBRAS CURTAS DE MALVA E RESÍDUOS
MADEIREIRO**

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

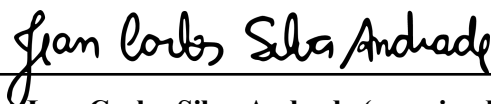
Aprovado em 15 de julho de 2021

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dr. Virgínia Mansanares Giacon (orientadora da banca)

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM)



Prof. Dr. Jean Carlos Silva Andrade (examinador interno)

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM)



Profa. Dr. Maria Gorett dos Santos Marques (examinador externo)

Universidade Federal do Estado do Amazonas (UFAM)

Dedico este trabalho ao meu Pai, meu amigo, meu guia, meu protetor, meu DEUS, sem ele eu não teria a oportunidade de viver, sair da zona de conforto e crescer. Dedico também aos meus pais, Valdelina Lira e João Galvão, meus maiores incentivadores e patrocinadores. A toda minha família, irmãs e amigos, por acreditarem sempre na minha força de vontade.

AGRADECIMENTOS

À Deus por sobreviver, junto aos meus, a pandemia mundial do COVID-19. Por me confiar a oportunidade de realizar todos os sonhos dos mais simples aos mais audaciosos. Por estar sempre do meu lado, mesmo quando eu erro, caio, machuco, choro e reconheço minha insignificância, e por não me permitir esmorecer diante das dificuldades. Agradeço também, pelas pessoas especiais que Ele colocou na minha vida.

Especialmente meus pais, Valdelina de Lira Galvão e João Magalhães Galvão que sempre me apoiaram e acreditaram nas minhas escolhas, estando sempre me ajudando e celebrando as minhas vitórias. E por toda a paciência, compreensão e investimento que fizeram em mim.

As minhas irmãs, Audeise de Souza Lira por me acolher, incentivar e apoiar. A Joélia de Lira Galvão, por cuidar de tudo na minha ausência, e ser tão presente.

A todos os meus amigos, que incentivaram quando o mundo parecia acabar, que compreenderão quando não estava presente, que mesmo com a distância física, estavam aquecendo meu coração solitário em outra cidade, vocês são a chave para a felicidade, o que seria uma vida sem amigos? Especialmente Maria Carolina Ferreira de Carvalho, Julie Anne Miranda e Lukas Brito Carneiro.

À querida orientadora DSc. Virginia Mansanares Giacon, pelo exemplo de mulher, de pesquisadora, de professora, de pessoa que é. Sempre terei como uma expiração. Obrigada pela dedicação, carinho, conhecimento, comprometimento, mas acima de tudo, pela amizade e pelas palavras de incentivo e apoio presentes durante todo o processo desta dissertação.

Ao querido orientador DSc. João de Almeida Melo Filho, por toda paz repassada em cada encontro, pela sabedoria e conhecimentos compartilhados, o Sr. é Luz!

A família LAMAC por todo apoio nesse processo. Conviver nesse ambiente harmonioso, com a comunhão entre amigos foi a melhor experiência da minha formação.

A todos que colocaram, literalmente, a mão na massa para auxiliar na concretização do presente trabalho, em especial os alunos de iniciação científica Matheus Rodrigues e Khalil Victor.

A todos que conheci durante o mestrado, em especial a amiga Gabrielle Machado, obrigada por todo incentivo e companheirismo, você é inspiração.

A minha amiga Shirley Solano, por suprir minha ausência no trabalho, quando precisava está no laboratório e por me apoiar sempre em continuar. Ao meu chefe Jorge Rufino, por ser exemplo e por entender a importância de finalizar essa dissertação.

A todos os professores e coordenadores, pelos ensinamentos, conhecimentos e experiências passados em sala de aula, contribuindo para minha formação profissional e também pessoal.

A FAPEAM pelo apoio financeiro.

Já dizia a canção: *“valeu a pena. Êh! Êh! Valeu a pena. Êh! Êh! Sou pescador de ilusões. Sou pescador de ilusões”* (O Rappa). Valeu a pena toda ausência, todo sofrimento, todas as renúncias... valeu apenas esperar... hoje colhendo o fruto de todo empenho! Por mais incentivo a educação!

Até aqui nos ajudou o Senhor (I Samuel 7: 12)

RESUMO

A presente pesquisa apresenta o desenvolvimento e caracterização de compósitos cimentícios híbrido reforçados com fibras de malva e resíduos da indústria madeireira. Para aumentar a durabilidade destes matérias foi utilizado uma matriz livre de hidróxido de cálcio, por meio da substituição parcial do cimento *Portland* por 40% de Metacaulinita industrial (MK), foi adicionado à mistura 15% de aditivo acelerador de pega (sobre o peso do cimento), com intuito de combater o retardamento e/ou inibição do tempo de endurecimento do cimento, ocasionado pela quantidade de polissacarídeos presentes na madeira. Foi utilizado fibras curtas de malva de 50 mm dispostas aleatoriamente no compósito, 4% em volume de fibras, e resíduos de madeira, com teor de 10%, dispersos aleatoriamente no compósito, cuja determinação foi realizada através de estudo prévio. Os compósitos foram caracterizados físico e mecanicamente, após envelhecimento natural de 236 dias, por meio dos ensaios de flexão em 4 pontos, permeabilidade dos compósitos, densidade aparente e resistência a propagação do fogo, com a caracterização desses compósitos após a incineração através do ensaio de flexão em 4 pontos. Já as fibras foram caracterizadas pela microscopia eletrônica de varredura e os resíduos de madeira foram caracterizados quimicamente para determinar a quantidade dos constituintes químicos de lignina, celulose, hemicelulose e material inorgânico. Os compósitos com tratamento (M1FM) apresentaram menor permeabilidade que os compósitos sem tratamento (M0FM), cerca de 15,39% mais permeáveis. Os resultados de flexão em 4 pontos indicaram que a substituição parcial do cimento por MK influenciou na capacidade de resistência quando fissurado, visto que os compósitos M1FM apresentaram zona de fissuração (figuras 40 e 41) e os compósitos M0FM demonstram no comportamento gráfico apenas a zona elástica. Os compósitos com adição de MK apresentaram resultados de resistência a tenacidade superiores de 18 MPa. Os resultados do teste de resistência ao fogo indicaram que os compósitos não propagaram chamas instantaneamente, porém, houve perda de 74,23% na resistência do material lignocelulósico, observada através do ensaio de flexão em 4 pontos.

Palavras-chaves: cimento-madeira flexão, fibramento, inflamabilidade, Metacaulinita, tenacidade.

ABSTRACT

This research presents the development and characterization of hybrid cementitious composites reinforced with mallow fibers and wood industry residues. To increase the durability of these materials, a matrix free of calcium hydroxide was used, through the partial replacement of Portland cement by 40% of industrial metakaolinite (MK), 15% of setting accelerator additive was added to the mixture (on the weight of the cement), in order to combat the delay and/or inhibition of the cement hardening time, caused by the amount of polysaccharides present in the wood. Short mallow fibers of 50 mm were used, randomly placed in the composite, 4% in fiber volume, and wood residues, with a 10% content, randomly dispersed in the composite, whose determination was carried out through a previous study. The composites were physically and mechanically characterized, after natural aging of 236 days, by means of 4-point bending tests, permeability of the composites, bulk density and fire propagation resistance, with the characterization of these composites after incineration through the test of 4-point bending. Fibers were characterized by scanning electron microscopy and wood residues were chemically characterized to determine the amount of chemical constituents of lignin, cellulose, hemicellulose and inorganic material. Composites with treatment (M1FM) had lower permeability than composites without treatment (M0FM), about 15.39% more permeable. The results of bending at 4 points indicated that the partial replacement of cement by MK influenced the resistance capacity when cracked, as the composites M1FM showed a cracking zone (figures 40 and 41) and the composites M0FM showed only the zone in the graphic behavior elastic. The composites with the addition of MK showed toughness resistance results higher than 18 MPa. The fire resistance test results indicated that the composites did not propagate flames instantly, however, there was a loss of 74.23% in the resistance of the lignocellulosic material, observed through the 4-point bending test.

Keywords: bending wood cement, fiber cement, flammability, metakaolin, toughness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – (a) fibras descontinuas unidimensionais, (b) fibras aleatoriamente distribuídas e (c) fibras contínuas unidimensionais	20
Figura 2 – Configuração para compósitos particulados	21
Figura 3 – Configuração de materiais laminados com diferentes materiais	21
Figura 4 – Afloramento de Caulim na Amazônia.....	29
Figura 5 – Esquema da química da madeira.....	30
Figura 6 – Estrutura de uma fibra vegetal: a) Desenho esquemático de uma fibra vegetal; b) Fibrocélulas; c) Fibrilas da parede celular e microfibrilas formadas por moléculas de celulose; d) Vista das microfibrilas	33
Figura 7 – Geradores de resíduos de madeira.....	35
Figura 8 – Esquema de classificação das fibras	37
Figura 9 – Malva roxa Amazônica	39
Figura 10 – Fibras de malva extraídas em secagem	40
Figura 11 – Escala da Produção de Malva	41
Figura 12 – Processo de obtenção da fibra de malva comercial.....	41
Figura 13 – Exemplos da empregabilidade das fibras naturais	42
Figura 14 – Modelo de construção seca	44
Figura 15 – Exemplos de utilização das placas de cimento	45
Figura 16 – Comportamento pós-fissuração de CCFV	47
Figura 17 – Aplicações de compósitos de fibrocimento.....	48
Figura 18 – Fibra de Malva amazônica lavada e seca	51
Figura 19 – Resíduos de Madeira separados nas granulometrias de 4,75 mm e 1,18 mm, respectivamente	52
Figura 20 – Fluxo-organograma das etapas do projeto	55
Figura 21 – Método de picnometria para determinação de massa específica da areia.....	56
Figura 22 – Processo de tratamento da fibra (a) Fibra Cortada, (b) Fibra desfibrilada.....	61
Figura 23 – Processo de tratamento dos resíduos madeireiros (a) Moinho de Facas e (b) Peneiramento dos resíduos	61
Figura 24 – Materiais pesados e separados, equipamento utilizado para mistura.....	62
Figura 25 – (a) Solubilização do aditivo, (b) Hidratação dos resíduos	62
Figura 26 – Mistura do resíduo de madeira até consistência pastosa.....	63
Figura 27 – Colocação das fibras no misturador até homogeneização	63

Figura 28 – Material sendo organizado na forma.....	64
Figura 29 – Fechamento da forma de acrílico com graxos metálicos	64
Figura 30 – Material em cura submerso em água.....	65
Figura 31 – Processo de corte das amostras	65
Figura 32 – amostras embaladas e guardadas.....	66
Figura 33 – Equipamento modelo AME-5kN marca Owvaldo Filizola, para ensaio de Flexão	66
Figura 34 – Configuração do ensaio de flexão em 4 pontos	67
Figura 35 – Amostras em processo de saturação.....	68
Figura 36 – parâmetros de distanciamento adotados em teste de resistência ao fogo.....	69
Figura 37 – Curva granulométrica da areia	70
Figura 38 – Análise de MEV das fibras de Malva	72
Figura 39 – Gráfico do teor de permeabilidade	73
Figura 40 – Gráfico tensão X deflexão: amostras M1FM.....	74
Figura 41 – Gráfico tensão X deflexão: amostras M0FM.....	75
Figura 42 – amostras após M1FM após ensaio de flexão	76
Figura 43 – Amostras M0FM após tempo de inércia e ensaio de flexão X deflexão.....	77
Figura 44 – amostra com tratamento após rompimento	77
Figura 45 – Amostra após 40 minutos de incineração.....	78
Figura 46 – Amostra após 140 minutos de incineração.....	79
Figura 47 – Parte traseira do ponto de incineração da amostra após 140 minutos.....	79
Figura 48 – visualização da queima do material lignocelulósico da amostra	80
Figura 49 – Demonstração das microfissuras aparentes da amostra pós ensaio	80
Figura 50 – Gráfico tensão X deflexão amostras M0FM e M1FM após queima.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais compostos do cimento <i>Portland</i>	23
Tabela 2 – Produção mundial de cimento (milhões de toneladas)	23
Tabela 3 – Impactos ambientais do processo produtivo do cimento	24
Tabela 4 – Composição Mineral de Cimento <i>Portland</i> e Metacaulinita	27
Tabela 5 – Produção mundial de caulim (milhões de toneladas)	28
Tabela 6 – Constituintes químicos da madeira e fibra de malva amazônica	32
Tabela 7 – Propriedades física e mecânicas da fibra de malva	39
Tabela 8 – Composição básica do cimento	49
Tabela 9 – Caracterização da Metacaulinita	50
Tabela 10 – Composição química da fibra de malva	51
Tabela 11 – Características do acelerador de pega	53
Tabela 13 – Referência para obtenção dos constituintes químicos	57
Tabela 14 – Nomenclatura dos compósitos	60
Tabela 15 – Caracterização da areia	71
Tabela 16 – Composição química da madeira	72
Tabela 17 - Massa específica dos CCM produzidos	74
Tabela 18 – Resultado tensão máxima e tensidade	76
Tabela 19 – Comparação resultados ensaio de tensão em amostras antes e posteriores a queima	81

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABNT: Associação brasileira de normas técnicas;

CCM: Compósitos cimento-madeira;

CCFV: Compósitos cimentícios de fibras vegetais;

C3S: Silicato tricálcico;

C2S: Silicato dicálcico;

CH: Hidróxido de Cálcio;

CO₂: dióxido de carbono;

C-S-H: Silicato de Cálcio Hidratado;

CRV: Coeficiente de Rendimento Volumétrico;

CPII Z 40 RS: Cimento *Portland* composto 40 MPa resistente a sulfatos;

COVID-19: Doença de coronavírus 2019;

DMC: Dimensão máxima característica;

INPA: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia;

LaMac: Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos;

LEM: Laboratório de Ensaio de Materiais;

PC: Cimento *Portland*;

MEV: Microscopia Eletrônica De Varredura;

MK: Metacaulinita;

Mt: Milhões de toneladas;

M0: Compósito de Cimento, areia e água;

M0FM: Compósito de Cimento, areia, água, fibra de malva e madeira;

M1FM: Compósito de Cimento, areia, água, Metacaulinita, fibras de malva e madeira;

NBR: Norma brasileira;

UFAM: Universidade Federal do Amazonas;

σ : Tensão máxima;

σ_u : Tensão última de ruptura;

ϵ_u : Deformação correspondente;

f_u : Última deflexão da trinca;

SUMÁRIO

1. Introdução.....	16
1.1. Objetivos.....	17
1.2. Objetivos específicos.....	17
1.3. Estrutura do trabalho.....	18
2. Revisão bibliográfica.....	19
2.1. Material Compósito: Contextualização.....	19
2.2. Matriz Cimentícia.....	22
2.3. Reações Pozolânicas.....	25
2.4. Metacaulinita: Considerações gerais.....	26
2.5. Materiais Lignocelulósicos: Contextualização.....	30
2.5.1. Resíduos Industriais.....	33
2.5.1.1. Resíduos de Madeira.....	34
2.5.2. Fibras.....	36
2.5.2.1. Fibras Vegetais.....	38
2.5.2.2. Fibras de Malva.....	38
2.6. Compósitos Reforçados Com Material Lignocelulósico.....	42
2.6.1. Compósitos cimento-madeira (CCM).....	44
2.6.2. Compósitos cimentícios de fibras vegetais (CCFV).....	46
3. Materiais e Métodos Experimentais.....	49
3.1. Materiais.....	49
3.1.1. Cimento.....	49
3.1.2. Areia.....	49
3.1.3. Metacaulinita.....	50
3.1.4. Fibras de Malva.....	51
3.1.5. Resíduos de Madeira.....	52
3.1.6. Aditivo Acelerador de Pega.....	52
3.2. Métodos Experimentais.....	53
3.2.1. Caracterização dos materiais.....	56
3.2.1.1. Massa específica da areia.....	56
3.2.1.2. Massa específica da fibra de malva e resíduos de madeira.....	56
3.2.1.3. Constituintes químicos.....	57
3.2.1.4 – Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV).....	57

3.2.2. Definição do Traço.....	58
3.2.2.1 Matriz	58
3.2.2.2 Quantidade de Metacaulinita.....	59
3.2.2.3 Quantidade de Fibras de Malva.....	59
3.2.2.4 Quantidade de Resíduos de madeira	59
3.2.3. Produção dos compósitos.....	60
3.2.4. Caracterização dos compósitos	66
3.2.4.1. Caracterização mecânica de Flexão em 4 pontos.....	66
3.2.4.2. Permeabilidade	68
3.2.4.3 Massa específica.....	68
3.2.4.4 Comportamento sob a ação do fogo.....	69
4. Resultados e Discursão.....	70
4.1. Caracterização dos materiais	70
4.1.1. Areia.....	70
4.1.2. Fibras de Malva.....	71
4.1.3. Resíduos de Madeira	72
4.2 Caracterização dos Compósitos.....	73
4.2.1. Permeabilidade.....	73
4.2.2. Massa específica.....	74
4.2.3. Caracterização mecânica de Flexão em 4 pontos.....	74
4.2.4. Teste de resistência ao fogo	78
4.2.5. Tensão em Flexão de 4 pontos amostras após teste de queima.....	80
5 - Conclusões	83
6 – Trabalhos Futuros	84
REFERÊNCIAS	85
ANEXO 1	98
ANEXO 2	105

1. Introdução

Problemas relacionados a questões ambientais têm motivado pesquisas extensas sobre materiais ecologicamente corretos. Particular interesse tem sido dado ao uso de fibras vegetais ou de celulose. Essas fibras apresentam muitas vantagens: baixa densidade, custo relativamente baixo, são renováveis, abrangem um mercado envolto a reciclagem, apresentam biodegradabilidade, são de natureza não perigosa e contêm propriedades físicas e mecânicas interessantes (SATYANARAYANA, 2009; ARIZAGA; WYPYCH, 2009; WAMBUA; IVENS; VERPOEST, 2003; ZIANE *et al.*, 2021).

As fibras vegetais podem ser aplicadas como reforço em compósitos de matriz cimentícia, melhorando a resistência a trincas e a tenacidade à fratura do material resultante (CHEN; ZHONG; ZHANG, 2020; LERCH *et al.*, 2018; BARBOSA DA SILVA JUNIOR; MARIA SILVA DE SOUZA; DE ANDRADE SILVA, 2021). A principal vantagem do reforço de fibras nesses materiais é o comportamento do compósito após o início da fissuração (AGOPYAN *et al.*, 2005; CHEN; ZHONG; ZHANG, 2020; LERCH *et al.*, 2018). A tenacidade pós-fissuração que as fibras produzem no material pode permitir o uso mais intensivo deste material para a indústria da construção.

No caso dos resíduos de madeira aplicados como agregado em compósitos de matriz cimentícia apresentam essencialmente o selo de sustentabilidade (HASAN; HORVÁTH; ALPÁR, 2021; FONSECA *et al.*, 2019; MÁRMOL; SAVASTANO, 2017; HOSSAIN *et al.*, 2018). As vantagens técnicas desse reforço o comportamento do compósito quando submetidos a temperaturas e ruídos elevados, limitando a propagação térmica e acústica. (MERABTI *et al.*, 2021; WEI; MA; THOMAS, 2016).

Apesar de todas as vantagens, o uso de material vegetal em compósitos à base de cimento é limitado pela falta de durabilidade desse material em uma matriz cimentícia e também pela compatibilidade entre as duas fases. O meio alcalino na matriz cimentícia, devido à presença do hidróxido de cálcio, degrada o material vegetal e pode estar associado à perda de durabilidade do compósito (AKINWANDE *et al.*, 2021; TOLÊDO FILHO *et al.*, 2000). Existem abordagens para melhorar a durabilidade dos compósitos, dentre elas a modificação da matriz. Essa modificação pode ocorrer através do desenvolvimento de matriz cimentícia isenta de hidrogênio e cálcio (AGOPYAN *et al.*, 2005; JR *et al.*, 2001; KAVITHA *et al.*, 2016; PRAKASH *et al.*, 2021). Além disso, os estudos para reduzir o efeito da alcalinidade, utilizando argila calcinada (Metacaulinita e tijolo de argila moída) (HE *et al.*, 2021; TOLEDO FILHO *et al.*, 2009), casca de arroz, sílica e *fly* sílica (WANG *et al.*, 2021a; WEI; MA; THOMAS, 2016),

ou escória de alto-forno (TAGBA *et al.*, 2021) também foram desenvolvidos.

Assim sendo, esta pesquisa teve como diferencial a análise da utilização conjunta de dois materiais naturais, resíduos de madeira e fibras de malva Amazônica (*Urena lobata Linn*) incrementados na matriz cimentícia tradicional (cimento, areia e água) e a modificada (adição de Metacaulinita industrial e aditivo acelerador de pega), considerando o peso específico dos materiais, e como objetivo geral, verificar a compatibilidade entre eles. A fibra de malva foi usada em dimensões curtas e o resíduo de madeira é oriundo de árvores Amazônicas regionais.

Para visualizar a relação dos materiais no pós-fissuração foi realizado testes através do ensaio mecânico de resistência a flexão. Houve alteração da matriz cimentícia, com a substituição de 40% do cimento por Metacaulinita e a incorporação de aditivo acelerador, devido a dificultando o processo de endurecimento do compósito, provavelmente devido a expressiva quantidade de açúcar presente na madeira.

As amostras foram submetidas ao envelhecimento natural (ocasionado pela paralisação total do campus em virtude da pandemia, conforme Portaria Nº 626, de 13 de março de 2020 - GR/UFAM e sequenciada pela DECISÃO *ad referendum* – CONSUNI 01/2020 de 26 de março de 2020) sendo, possível observar a degradação dos compósitos e a eficiência do tratamento.

Propriedades como massa específica, absorção de água, resistência a ruptura, capacidade de tenacidade e resistência ao fogo dos compósitos foram analisadas. Bem como, os materiais foram caracterizados através de ensaios de massa específica, granulometria, extrativos químicos, teores de lignina e celulose.

1.1. Objetivos

Avaliar o uso de material lignocelulósico incluindo fibra curta de malva e resíduo madeireiro como reforços em matriz cimentícia livre de hidróxido de cálcio.

1.2. Objetivos específicos

- Produzir compósitos reforçados com diferentes teores de fibra de malva em comprimentos variados de 25 e 50 mm, testa-los físico e mecanicamente, e verificar qual a melhor concentração do reforço para incrementarão nos compósitos híbridos.
- Confeccionar compósitos reforçados com diferentes teores de resíduo de madeira com granulometria retidas nas peneiras de 1,18 e 4,75 mm e através da avaliação de suas propriedades mecânicas, definir a melhor concentração deste material para os compósitos

híbridos.

- Fazer a caracterização dos componentes da matriz através de ensaios de massa específica, granulometria, extrativos químicos, teores de lignina e celulose e microscopia eletrônica de varredura.
- Analisar a influência do envelhecimento natural de 236 dias nas propriedades das amostras modificada pela substituição do cimento pela Metacaulinita.
- Verificar as propriedades como massa específica, absorção de água, resistência a ruptura, capacidade de tenacidade e resistência ao fogo dos compósitos dos compósitos.

1.3. Estrutura do trabalho

No presente **Capítulo 1** contém a introdução da pesquisa, especificando os principais motivos da realização desde estudo, enquadrando o diferencial do tema proposto diante de trabalhos já realizados na área, são apresentados os objetivos do trabalho e sua estruturação técnica.

O **Capítulo 2** contém a revisão bibliográfica acerca do tema, explorando as características, composições, dados técnicos de produtividade e problemáticas mundiais dos materiais que envolvem a matriz cimentícia, especialmente os reforços de fibras naturais de malva amazônica e resíduos da indústria madeireira. São apresentados os principais resultados de estudos envolvendo compósitos de fibra natural e cimento e compósitos de cimento madeira, suas características técnicas e problemáticas, além de trabalhos com a utilização de Metacaulinita no cimento.

O **Capítulo 3** apresenta os materiais empregados neste estudo, suas origens e composições, e os métodos utilizados de caracterização dos mesmos. É apresentado, também, a metodologia empregada no desenvolvimento e caracterização dos compósitos.

O **Capítulo 4** consta dos resultados alcançados nesta pesquisa com a incorporação dos dois tipos de materiais lignocelulósicos na matriz. São observados principalmente suas características mecânicas e físicas e os parâmetros normativos que envolvem o material proposto.

O **Capítulo 5** contém as conclusões obtidas nesse trabalho.

O **Capítulo 6** traz sugestões para trabalhos futuros envolvendo o tema aqui proposto.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Material Compósito: Contextualização

Os materiais compósitos, também conhecidos como materiais conjugados são projetados para unir características desejáveis de dois ou mais materiais distintos, surgindo assim, diferentes combinações entre metais, cerâmicas, polímeros e outros (ASTM D3878, 1995). As possíveis combinações dependem dos elementos e das condições de utilização dos mesmos: metodologia, processamento, quantidade e beneficiamento.

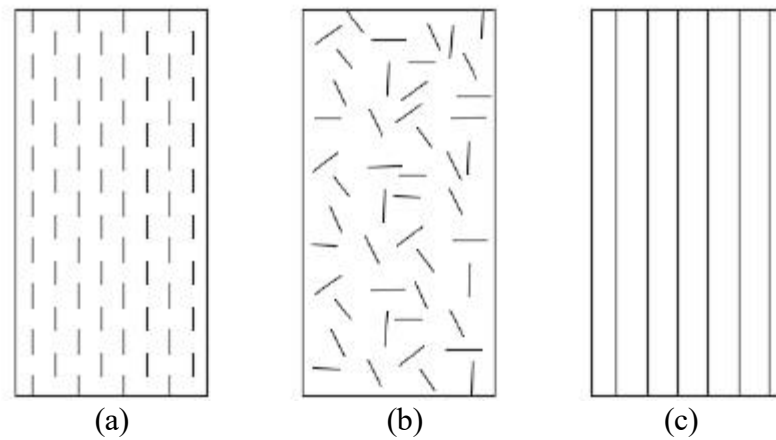
Geralmente, são formados por uma matriz que consiste em uma fase contínua com a função de envolver a fase dispersa, chamada de reforço. A união dessas fases tem como objetivo formar um novo material (compósito) com propriedades necessárias para executar determinadas tarefas, que necessitam de características específicas como maior resistência mecânica, menor peso, mais elasticidade, condutividade térmica, atratividade, durabilidade, rigidez, entre outras.

Essa possibilidade de agregar características pela junção de materiais é uma descoberta muito antiga. O seu preciso início é desconhecido, no entanto, históricos bíblicos e da civilização arcaicas registrarem algumas referências do seu uso – Êxodo 5:16-19. A madeira compensada foi usada pelos antigos Egípcios quando perceberam que a madeira poderia ser reorganizada (em camadas) para alcançar força e resistência conforme a necessidade (JONES, 2014).

Tais materiais podem ser classificados de diversas formas, uma delas é através do tipo de reforço, sendo dividido em compósitos:

□ Os compósitos fibrosos são reforçados com fibras, e subdivididos de acordo com a disposição e o tamanho do reforço na matriz. Essa divisão apresenta 3 principais categorias: fibras descontínuas unidimensionais ((Figura 1a), fibras aleatoriamente distribuídas (Figura 1b) e fibras contínuas unidimensionais (Figura 1c).

Figura 1 – (a) fibras descontinuas unidimensionais, (b) fibras aleatoriamente distribuídas e (c) fibras contínuas unidimensionais



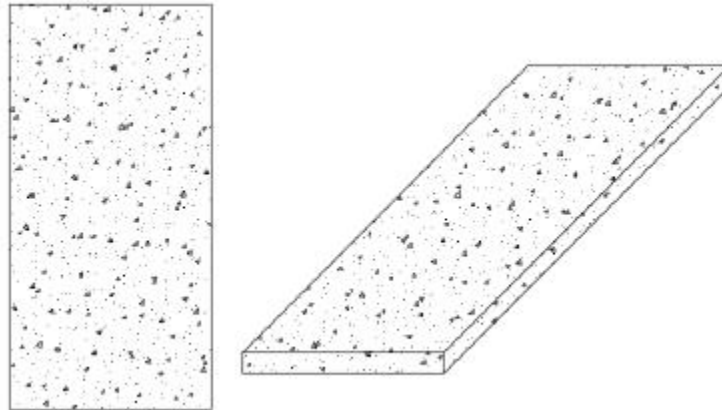
Fonte: Adaptado (CARVALHO *et al.*, 2013)

Quando as fibras são orientadas em uma direção o compósito tende a ser anisotrópico (propriedades físicas variam de acordo com a direção cristalográfica considerada), enquanto quando aleatórias é considerado quase-isotrópico (propriedades físicas constantes, independentemente da direção cristalográfica considerada) (CALLISTER JR., 2000); CARVALHO *et al.*, 2013).

Fibras quando longas são, consideradas, mais eficientes do ponto de vista da rigidez e resistência que as fibras curtas, devido ao aumento da resistência à tenacidade (MELO FILHO; SILVA; TOLEDO FILHO, 2013; ZHANG *et al.*, 2011). Nanocompósitos reforçados com nanotubos de carbono são exemplos desses compósitos. Por outro lado, as fibras longas aumentam a região de interface entre as fases, o que pode ocasionar vazios e prejudicar a agregação dos materiais (GUO *et al.*, 2010; SAVASTANO JR., 2000).

□ Os compósitos particulados (figura 2) consistem em partículas de vários tamanhos e formas aleatoriamente espalhados dentro da matriz (CARVALHO *et al.*, 2013). Devido à aleatoriedade da distribuição de partículas, esses compósitos podem ser considerados quase homogêneos e quase isotrópicos. São exemplos desses compósitos as matrizes de concreto, vidro reforçado com flocos de mica (TRAJANO; NETO, 2018), polímeros reforçados com partículas de borracha (EDWARDS, 1990; XIONG *et al.*, 2021), cerâmica reforçada com partículas cerâmicas (MARK, 1996; YANG *et al.*, 2010), partículas metálicas em não-metálicas (ROSSETTI; DI PALMA; MEDICI, 2006) e etc.

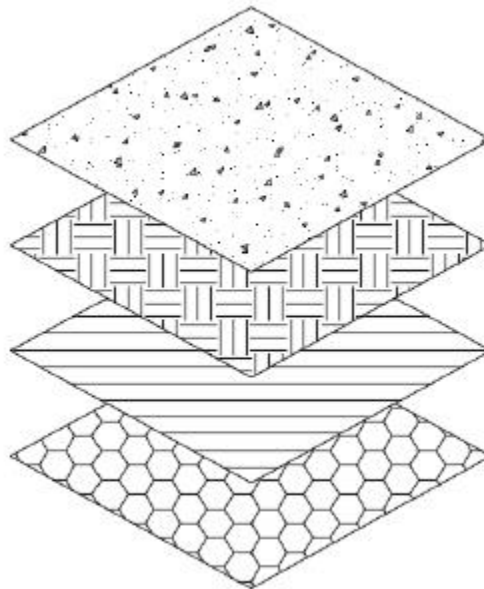
Figura 2 – Configuração para compósitos particulados



Fonte: Adaptado (CARVALHO *et al.*, 2013)

□ Os compósitos estruturais consistem na união de camadas heterogêneas de diferentes materiais, formando laminados e/ou painéis sanduiches, conforme configuração mostrada na figura 3.

Figura 3 – Configuração de materiais laminados com diferentes materiais



Fonte: Adaptado de Callister Jr. (2000)

Esses compostos contendo camadas de dois ou mais tipos diferentes de materiais são chamados de compósitos híbridos. Por exemplo, um composto laminado pode ser constituído por unidirecional vidro, epóxi, carbono, camadas de epóxi empilhadas, entre outros.

Para a completa funcionabilidade dos compósitos é necessário evitar falhas locais, como

falha de fibra (tração, flambagem, divisão), falha da matriz (tração, compressão, cisalhamento) e interface falha (descolagem).

2.2. Matriz Cimentícia

As matrizes cimentícias utilizadas na produção de compósitos são, geralmente, formadas por cimento *Portland*, agregados, água e aditivos químicos (superplastificantes, aceleradores de pega e etc) (MELO FILHO; SILVA; TOLEDO FILHO, 2013; TOLÊDO ROMILDO D. *et al.*, 2003).

Sendo o cimento o principal elemento da matriz, trata-se de um material de natureza simples e barata, podendo ser composto com diversos materiais, possibilita a moldagem de diferentes formas, através da utilização de equipamentos de fácil aquisição e simples manuseio e resultando em materiais com boas propriedades físicas e mecânicas (TOLÊDO ROMILDO D. *et al.*, 2003). Sua usabilidade é comum em habitações. Além disso sistemas de abastecimento de água potável, saneamento, transporte e energia normalmente dependem desse material, seja para infraestrutura e supraestrutura.

A palavra *cimento* é originada do latim *caementu*, que significava na velha Roma uma espécie de pedra natural de rochedos não quebrada. Em 1830 o inglês Joseph Aspdin patenteou uma metodologia de fabricação de um material ligante da mistura de calcário e argila que resultava em um pó que, por apresentar cor e características semelhantes a uma pedra muito conhecida na ilha de *Portland*, foi batizado de “cimento *Portland*” (SNIC, 2006).

Desde então, o processo de produção comercial consiste em: (i) extração da matéria-prima e (ii) beneficiamento por britagem, responsável por transformar a matéria-prima rochosa em grãos, (iii) moedura e mistura, formando o *clínquer*, que deverá ser (iv) queimado em uma temperatura de aproximados 1450°C, após o seu resfriamento é acrescentado uma quantidade de gipsita (sulfato de cálcio), (v) sendo novamente moído e originando o cimento comercial (KORONEOS; ROUMBAS; MOUSSIOPOULOS, 2005; LALANDE; TREMBLAY, 2005).

Nesse processo de mistura, ocorrem combinações químicas (Tabela 1), principalmente no estado sólido, que conduzem a formação dos seguintes compostos:

Tabela 1 - Principais compostos do cimento *Portland*

<u>Nome do Composto</u>	<u>Composição em óxidos</u>	<u>Abreviatura</u>
Silicato tricálcico	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato dicálcico	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroatuminato tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Fonte: Padilha (1997); Altwair; Kabir (2009); Maríngolo (2016)

O C₃S (Silicato tricálcico) é o maior responsável pela resistência em todas as idades, especialmente no primeiro mês e o C₂S (Silicato dicálcico) é responsável pelo processo de endurecimento e resistência em idades mais avançadas, ou seja, um ano ou mais. O C₃A (Aluminato tricálcico) contribui para a resistência, especialmente, no primeiro dia, através da liberação de calor e é responsável pela rapidez da pega (ALTWAIR;; KABIR,; 2009).

A produção mundial de cimento em 2019 totalizou 4.100 milhões de tonelada (Mt), conforme Tabela 2, uma elevação de 1,2% em relação ao ano anterior (4.050 Mt). A China produziu 2.200 Mt, quantidade que representa 53,6% de toda a produção mundial, enquanto a Índia, segundo maior produtor, produziu 300 Mt (7,3% da produção mundial). O Brasil permaneceu como o maior produtor da América Latina, com 55 Mt, representando 1,3% da produção global (NATIONAL MINERALS INFORMATION CENTER, 2020)

Tabela 2 – Produção mundial de cimento (milhões de toneladas)

	2018	2019	
China	2.200,0	2.200,0	54%
Índia	300,0	320,0	8%
Vietnã	90,2	95,0	2%
Estados Unidos (Inclui Porto Rico)	87,0	89,0	2%
Egito	81,2	76,0	2%
Indonésia	75,2	74,0	2%
Irã	58,0	60,0	1%
Rússia	53,7	57,0	1%
Brasil	53,0	55,0	1%
República da Coreia	57,5	55,0	1%
Japão	55,3	54,0	1%
Turquia	72,5	51,0	1%
Outros países	870,0	900,0	22%
Total mundial (arredondado)	4.050,000	4.100,000	

Fonte: Adaptada, (NATIONAL MINERALS INFORMATION CENTER, 2020)

As maiores restrições para a utilização na produção de cimento são as suas composições químicas e as distâncias entre as jazidas e os mercados consumidores. Por isso, mais de 90% do cimento no mundo é consumido no próprio país em que foi produzido (QUEIROZ FILHO; AMORIM NETO; DANTAS, 2017).

A grande produção e consumo desse material ocasiona impactos ambientais, estando alguns relacionados ao processo de produção (Tabela 3):

Tabela 3 – Impactos ambientais do processo produtivo do cimento

Processo de fabricação de cimento	Impactos ambientais do processo produtivo do cimento
Extração de Matéria Prima (argila, areia e calcário)	Poeira Ruídos Impactos na paisagem Vibrações do terreno Emissão de gases Desmoronamentos Erosões Contaminação de água Perturbação do habitat e redução de biodiversidade
Moagem de Calcário	Poeira Ruídos Eletricidade
Produção de <i>Clínquer</i>	Poeira Emissão de Dióxido de Carbono (CO ₂) Emissão de Enxofre (SO ₂) Monóxido de Carbono (CO) Micropoluentes Gases Oxidantes Óxidos Nitrogenados Compostos de chumbo Calor
Moagem do cimento	Poeira Ruídos Eletricidade Matérias-primas

Fonte: Adaptado de Maury e Blumenschein (2012)

Além desses, as 4 bilhões de toneladas produzidas de cimento representam cerca de 5-9% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) (GARSIDE, 2021; WOJTACHARYCHTER; KUCHARSKI; SMOLINSKI, 2021) e estima-se que a produção global de cimento deva aumentar para mais de 5 bilhões de toneladas por ano nos próximos 30 anos (a partir de 2018) (QUIROGA; MARZOCCHI; RINTOUL, 2016), atualmente são produzidos 4,1 bilhões de toneladas (GARSIDE, 2021). O grande consumo de cimento e estimativas da sua produção, aderidas aos impactos ambientais da fabricação e do pós-uso são os maiores geradores de interesse na utilização desse material agregado a outras tecnologias ecológicas.

2.3. Reações Pozolânicas

O cimento composto incrementa dois tipos de materiais principais: as escórias de alto forno, subproduto da fabricação do ferro, e os materiais pozolânicos, ambos com a função de melhorar as propriedades do cimento.

A adição pozolânica promove trabalhabilidade, diminuição da segregação, aumento da resistência à fissuração térmica por meio da redução do calor de hidratação, redução da permeabilidade, resistência superior ao ataque ácido, redução da porosidade e entre outros (CAVALCANTE *et al.*, 2018; MENDOZA REALES *et al.*, 2021; WEI; MA; THOMAS, 2016). Alguns materiais pozolânicos são produzidos e comercializados mundialmente, como por exemplo: resíduos de cinzas volantes (MARIETA; GUERRERO; LEON, 2021; RANGAN, 2008), cinzas de casca de arroz (GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2008; LO; LEE; LO, 2021) e sílica ativa (ABDEL RAHMAN *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2021b)

Para compósitos cimentícios reforçados com material lignocelulósico, a adição pozolânica é muito vantajosa, pois as reações pozolânica no cimento reagem com o Hidróxido de Cálcio (CH) formando Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H) em uma reação exotérmica, promovendo compostos estáveis de poder aglomerante, diminuindo a alcalinidade e, que não afetam a durabilidade do esforço vegetal adicionado a mistura (JONES, 2014; TOLEDO FILHO *et al.*, 2009). Se a pozolâna é composta principalmente por óxido de sílica, a Equação 2.1 da reação pode ser escrita:



Onde:

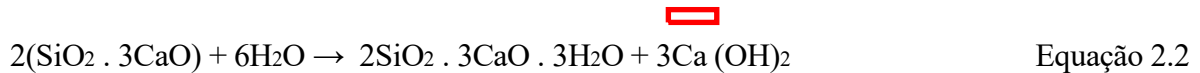
CH=Hidróxido de Cálcio do cimento *Portland*,

H = Água da mistura,

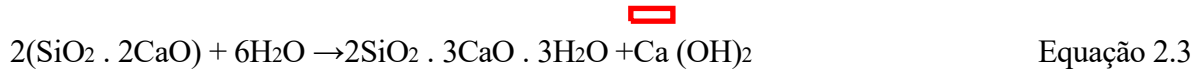
C-S-H = Silicato de Cálcio Hidratado e

C-A-H = Aluminato de Cálcio Hidratado

Quando os compostos do cimento entram em contato com a água (processo de hidratação do cimento) é formado cerca de 39% do seu próprio peso de CH (Equação 2.2), e permanecem presentes em seu estado maduro (quando a água evapora e cimento endurece) aproximados 18% (Equação 2.3) (SABIR; WILD; BAI, 2001).



Hidróxido de Cálcio (39%)



Hidróxido de Cálcio (18%)

Fonte: Lima, 2009; Kihara e Centurione, 2005 (adaptado)

O CH ocasiona alcalinidade e, portanto, perda de resistência mecânica em compósitos que envolvam materiais naturais, isso porquê a região em torno do material lignocelulósico (zona de transição fibra-matriz) é caracterizada pela elevada porosidade, facilitando a ação do hidróxido de cálcio na degradação do material (MENDOZA REALES *et al.*, 2021; SAVASTANO JUNIOR, 2007a).

O trabalho de Toledo Filho *et al.* (2009) indica que a degradação natural das fibras pode ser efetivamente maximizada pela produção de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), e que matriz de cimento livre de CH pode ser obtida através da substituição de alto volume de cimento por argila calcinada (Metacaulinita) e argila triturada de resíduos calcinada (tijolo). O autor adotou uma substituição parcial de 50% de cimento por material calcinado.

Wei *et al.* (2016) em seu estudo avaliou o comportamento de degradação de fibras com 4 tipos de materiais pozolânicos: Metacaulinita, casca de arroz, sílica ativa e cinza volante. Foram testadas diferentes quantidades de mistura, de acordo com composição química, tamanho de partícula e atividade pozolânica para garantir a mesma hidratação do cimento. Segundo o autor esses materiais aumentam a necessidade de água da mistura e auxiliam em manter a integridade da fibra.

2.4. Metacaulinita: Considerações gerais

Metacaulinita é um material manufaturado resultante da desidratação do caulim. A calcinação é feita com o objetivo de alterar a estrutura cristalina do caulim, tornando-a amorfa e passível de reação com o hidróxido de cálcio (CH) produzido durante a hidratação do cimento *Portland*. A conversão do caulim em Metacaulinita, com perda da água estrutural, ocorre a partir de aproximadamente 500 °C, e o grau de amorfização depende da taxa de aquecimento, da temperatura de queima, do tempo de residência e da composição química do caulim (SABIR; WILD; BAI, 2001)

O uso de Metacaulinita (MK) como substituto parcial do cimento tem sido amplamente estudado nos anos recentes, devido, principalmente, ser uma argila pozolânica calcinada que

contém sílica e alumina em uma forma ativa que reage com o CH podendo removê-lo do concreto. As principais vantagens dessa substituição são:

- Aumenta propriedades básicas como compressão, flexão, divisão de forças, forças elásticas etc.
- Reduz a eflorescência, que ocorre quando o cálcio é transportado pela água para a superfície e reage com dióxido de carbono da atmosfera produzindo carbonato de cálcio, que precipita como um resíduo branco.
- Aumenta a resistência ao ataque químico como sulfatos, cloretos, carbonatação e reduz a reatividade alcalina da sílica, que causa patologias como corrosão e degradação.
- Melhora a trabalhabilidade e o acabamento do concreto.
- Reduz o encolhimento devido ao empacotamento de partículas.
- Pode ser usado na formação de concreto de alto desempenho, alta resistência e leveza. Em pré-moldados, produtos de fibra e ferro, concreto reforçado com fibra de vidro, bancadas, esculturas de arte, argamassa e etc (LOTHENBACH *et al.*, 2008; SABIR; WILD; BAI, 2001; SAWANT; GHUGAL, 2015).

A composição mineral e as principais funções do cimento e do Metacaulinita se assemelham bastante, como mostrado na Tabela 4:

Tabela 4 – Composição Mineral de Cimento *Portland* e Metacaulinita

Minerais principais	Abreviação	Cimento (%)	Metacaulinita (%)	Função de Minerais
Óxido de cálcio	CaO	60,2-66,3	2	Controla a força e a solidez
Sílica	SiO ₂	18,6-23,4	51,52	Dá força, quantidade excessiva causa lenta configuração
Alumina	Al ₂ O ₃	2,4-6,3	40,18	Configuração rápida, pressão reduz a força
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	1,3-6,1	1,23	Dá cor
Óxido de magnésio	MgO	6-4,8	0,12	Cor e excesso causam rachaduras
Óxido de sódio	Na ₂ O	0,5-1,2	0,08	Controla resíduos, causa excesso de craqueamento
Óxido Sulfúrico	SO ₃	1,7-4,6	0	Torna o cimento doentio

Fonte: Sawant & Ghugal (2015)

O MK pode ser produzido a partir de uma variedade de fontes contendo caulinita. A caulinita se torna Metacaulinita devido a ordem bidimensional na estrutura cristalina, que quando superaquecido (500-800 °C) transforma-se em um material amorfo, altamente pozolânico (SAWANT; GHUGAL, 2015).

Uma das principais fontes de MK é a rocha de caulim, minério abundante no território brasileira, cujo beneficiamento em 2020 foi de 1,7 Mt (NATIONAL MINERALS INFORMATION CENTER, 2021) de toneladas, tornando o Brasil um dos maiores produtores de caulim, conforme observado na Tabela 5:

Tabela 5 – Produção mundial de caulim (milhões de toneladas)

	2018	2019	2020
Estados Unidos	5,53	5,5	4,6
Alemanha	4,3	4,3	5,2
Índia	4,0	4,0	4,0
República Tcheca	3,62	3,6	3,4
China	3,2	3,2	5,0
Ucrânia	2,4	2,4	1,8
Brasil	1,8	1,8	1,7
Turquia	1,4	1,4	1,5
Reino Unido	1,0	1,0	-
Irã	0,79	0,79	0,79
Espanha	0,45	0,45	0,45
México	0,33	0,33	0,14
Outros países	13,4	13,0	11,0
Total mundial (arredondado)	42,2	42,0	44,0

Fonte: (NATIONAL MINERALS INFORMATION CENTER, 2021)

O que torna o país o 7º maior beneficiador desse material é a dimensão das suas reservas, a figura 4 mostra uma reserva amazônica, localizada no estado do Amazonas, BR 174.

Figura 4 – Afloramento de Caulim na Amazônia



Fonte: Neves & Melo Filho (2017)

O caulim é beneficiado e utilizado, principalmente, na produção de papel e alumínio (PRASAD; REID; MURRAY, 1991). Barata (BARATA; DAL MOLIN, 2002) aponta que o resíduo da fabricação de papel é constituído essencialmente de caulinita, nenhuma aplicação comercial, podendo ser matéria-prima para a produção de Metacaulinita. Rejeitos de alumínio foram utilizados no projeto de Lima (LIMA, 2004) para produção de Metacaulinita que foi aplicada, em proporção de 30%, em compósitos reforçados com fibra de sisal, obtendo resultados positivos na eliminação do CH e nas propriedades mecânicas no compósito.

Pavankumar & Krishnamurthy (PAVANKUMAR; KRISHNAMURTHY, 2015) estudaram as propriedades mecânicas de compósitos de fibras de aço com substituição parcial do cimento por MK em 10%, 20%, 40% e 50%. Segundo os autores a substituição de até 40% promove maior resistência do compósito, acima desse índice, os compósitos apresentam menor resistência.

Ramirez *et al.* (2020) avaliou compósitos de matriz cimentícia duráveis à base de cimento de aluminato de cálcio, reforçado com fibra vegetal de linho, não têxtil, e adicionou 0 a 50% do peso do cimento em MK, os resultados mostram que há baixa degradação das fibras naturais na matriz com MK e essa degradação foi menor para maior teor de MK. Os compósitos desenvolvidos apresentaram comportamento dúctil e alta resistência à tração e mantiveram esse desempenho após serem submetidos a 250 ciclos de envelhecimento acelerado.

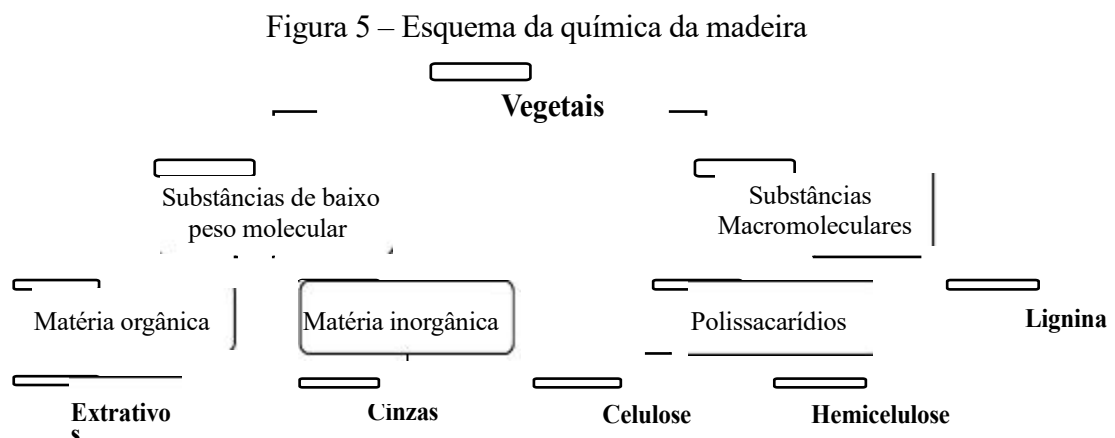
Estudos sobre a quantidade de MK necessária para remover completamente o CH variam. Os resultados de Kostuch *et al.* (KOSTUCH; WALTERS; JONES, 2000) mostram que é necessária uma substituição de 20% do cimento por MK para remover todo o CH no concreto aos 28 dias, enquanto Oriol *et al.* (ORIOLO; PERA, 1995) relatam que entre 30% e 40%,

Cavalcante *et al.* (CAVALCANTE *et al.*, 2018) determina 40%, Wei *et al.* (WEI; MA; THOMAS, 2016) utilizou 30% e obteve a remoção total do CH. Essas variações, como informado por (SABIR; WILD; BAI, 2001), não são surpreendentes, pois as reações pozolânicas dependem da composição do cimento *Portland* (PC), da pureza do MK e da proporção de água/cimento que irá determinar a diluição do CH no concreto.

Existe atualmente, um mercado crescente de produção de Metacaulinita industrial (MORE, 2021; RAMIREZ *et al.*, 2020) e para garantir a qualidade do produto para o consumidor, os parâmetros do produto devem atender a norma técnica NBR 15894 (Metacaulinita para uso com cimento *Portland* em concreto, argamassa e pasta – partes 1, 2 e 3) (ABNT, 2010d, 2010e, 2010f) que especifica a quantidade máxima de elementos químicos, índices de desempenho e atividade pozolânica, embalagens e armazenamento para uso junto com cimento.

2.5. Materiais Lignocelulósicos: Contextualização

Materiais lignocelulósicos são matérias orgânicas renováveis, geralmente disponíveis abundantemente em várias matérias-primas, como resíduos agroflorestais e resíduos urbanos, (MCKENDRY, 2002). A composição química desses materiais é constituída por componentes macromoleculares de lignina, celulose e hemicelulose (polioses), além de conter substâncias eventuais extraíveis, denominadas de extrativos, e também de uma pequena fração de inorgânicos (minerais) distribuídos nas diversas camadas que compõem o material (Figura 5).



Fonte: KLOCK *et al.*, (2005)

Conforme observado na distribuição dos componentes dos materiais lignocelulósicos,

tem-se que a resistência mecânica e rigidez das fibras é influenciada diretamente pela sua composição química (celulose, lignina e hemiceluloses), os ângulos formados entre as microfibrilas e o eixo da fibra (ângulos microfibrilares) e a organização das cadeias poliméricas (estrutura do polímero) (VASCONCELOS; VASCONCELOS, 2017).

Por sua vez, a celulose (alfa celulose) é o mais abundante composto orgânico de alguns desses materiais, e trata-se de um polissacarídeo composto por uma cadeia linear de unidades de glicose. Devido à estrutura polissacarídica, existe uma grande quantidade de grupos hidroxila ao longo do esqueleto da celulose. Esses grupos hidroxila podem formar redes de ligação de hidrogênio bem ordenadas, resultando em uma estrutura cristalina compacta. Além disso, cadeias parciais de celulose são dispostas irregularmente, resultando na região amorfa da celulose (SUN *et al.*, 2016). Atua, especialmente, na resistência da parede celular das células vegetais e também é uma fonte de carboidratos para os ruminantes (bovinos, veados, entre outros). Após a extração, ela pode ser empregada na indústria têxtil, moveleira, alimentícia, farmacêutica, construção civil e na manufatura de papéis (LI; YUAN; YANG, 2009; SILVA *et al.*, 2005; TONY, 2021).

A hemicelulose é uma mistura de polissacarídeos, composta quase inteiramente por açúcares como *glicose, manose, xilose e arabinose e ácidos metilglucurônico e galaturônico*, ao contrário da celulose, a hemicelulose é um polissacarídeo ramificado heterogêneo que se liga firmemente à superfície de cada microfibrila de celulose. Comumente empregada na produção de gomas vegetais para a produção de adesivos, emulsificantes, estabilizantes e outros produtos químicos (MCKENDRY, 2002).

Os Extrativos são compostos não pertencentes a parede celular do vegetal, apresentam baixa ou média massa molecular, e trata-se de grande variedade de moléculas distintas como: alguns sais, açúcares e polissacarídeos (solúveis em água), ácidos, ceras, resinas, esteroides, e compostos fenólicos e glicosídeos (solúveis em solventes orgânicos) (KLOCK *et al.*, 2005; PINO *et al.*, 2007). Suas principais funções fisiológicas incluem o acúmulo de nutrientes, e a preservação contra ataques de bactérias, fungos e cupins, e contra a formação de cor e de aromas (PINO *et al.*, 2007; TONY, 2021; ZHANG *et al.*, 2007).

Os materiais inorgânicos presentes nas amostras lignocelulósicas são minerais presentes em diversas camadas do vegetal e quantificados a partir da combustão, com a geração de cinzas. O teor de cinzas promove a formação de gases (RAO; XIANG, 2009) e a consequente eliminação de carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e enxofre da amostra, permanecendo apenas os minerais como sódio, potássio, cálcio, magnésio, ferro, zinco e outros.

Nesta pesquisa foram utilizados materiais lignocelulósicos em forma de resíduos variados

de madeira e fibras de malva. A composição química desses materiais é variável de acordo com a espécie, não sendo possível inferir um único valor, no entanto, a tabela 6 mostra alguns exemplos dessa composição.

Tabela 6 – Constituintes químicos da madeira e fibra de malva amazônica

Constituinte	Madeira ¹		Fibra de Malva Amazônica (%) ²
	Coníferas (%)	Folhosas (%)	
Celulose	42 ± 2	45 ± 2	69 ± 0,3
Hemicelulose	27 ± 2	30 ± 5	21 ± 0,2
Lignina	28 ± 2	20 ± 4	13 ± 0,5
Extrativos	5 ± 3	3 ± 2	7 ± 0,5
Cinzas	0,2 - 0,5		-

Fonte: ¹KLOCK *et al.*,(2005); ²Oliveira (2013)

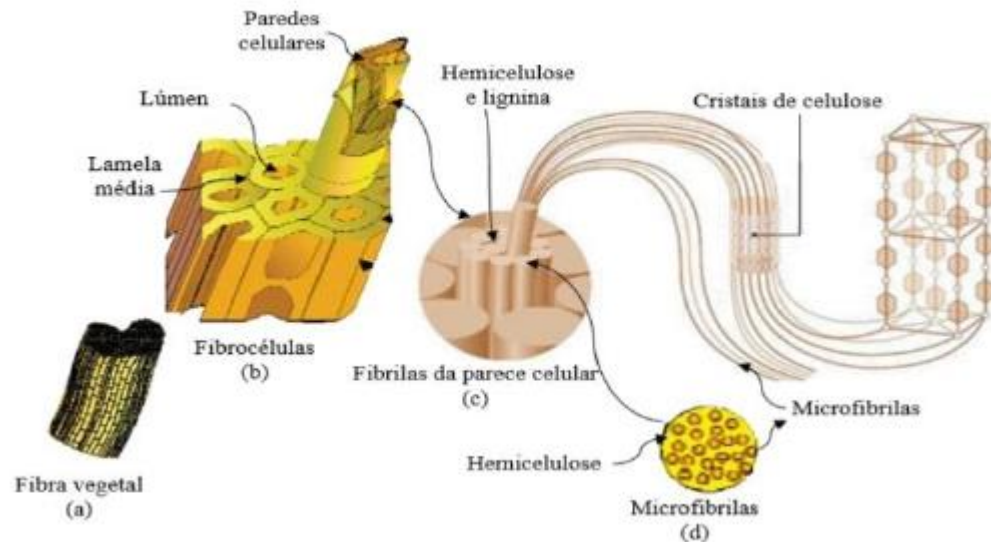
2.5.1. Lignina

As paredes das células dos materiais lignocelulósicos são compostos organizados que contêm muitos polissacarídeos e lignina. Estudos do comportamento do arranjo químico de interação dessas substâncias mostram uma estrutura complexa, que naturalmente, apresenta resistência a degradação, ou seja, são recalcitrantes (GINDL; GUPTA; GRÜNWALD, 2002; VASCONCELOS; VASCONCELOS, 2017; ZHANG *et al.*, 2013).

Neste contexto, a utilização em ambientes alcalinos, como da matriz cimentícia, trona-se mais próspera devido a presença de lignina, trata-se de um componente químico com características físicas e químicas que podem aumentar a resistência. No vegetal, é responsável pela rigidez da parede celular, tendo a capacidade de fortalecer uma célula na outra e aumentar sua resistência (WANG *et al.*, 2021c).

Zhang *et al.* (2013) concluiu em seus estudos que a degradação da lignina aumenta a resistência a tração das fibras naturais. Bem como, Gindl *et al.* (2002) observou que o aumento de lignina na composição química da madeira contribuiu diretamente para a dureza da parede celular na madeira e contribui para o aumento do módulo de elasticidade, devido ao preenchimento dos espaços com lignina e um aumento da densidade de empacotamento da parede celular durante o processo. Na Figura 6 observa-se a constituição da parede celular da fibra.

Figura 6 – Estrutura de uma fibra vegetal: a) Desenho esquemático de uma fibra vegetal; b) Fibrocélulas; c) Fibrilas da parede celular e microfibrilas formadas por moléculas de celulose; d) Vista das microfibrilas



Fonte: (VASCONCELOS; VASCONCELOS, 2017)

Conforme mostrado na figura 6, as paredes celulares das fibras são constituídas por fibrilas (Figura 6c) que são unidas por uma matriz de lignina e hemiceluloses. As fibrilas, por sua vez, são constituídas por microfibrilas que são unidas entre si por meio de hemiceluloses. Cada microfibrila é composta por cadeias moleculares de celulose (Figura 6c) que apresentam direções distintas umas das outras, em relação ao eixo da fibra e são compostas por um número que varia de 30 a 100 moléculas de celulose. (VASCONCELOS; VASCONCELOS, 2017).

2.5.1. Resíduos Industriais

Resíduo é todo material proveniente de sobras, sem valor comercial para o qual foi destinado e rotulado como lixo, potencializador de problemas ambientais (WANG *et al.*, 2016a). Os resíduos podem ser de diversas formas, a NBR 10004 (ABNT, 2004) considera 2 grupos principais: resíduos sólidos e semissólidos, trata-se daqueles que:

resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou

corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT/NBR 10004/2004).

Estes são classificados em:

- Classe I (perigosos) – apresentam periculosidade à saúde e ao meio ambiente, por possuírem propriedades de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, sendo necessário cuidados específicos e tratamento especiais. Ex: borra e latas de tinta, óleos minerais e lubrificantes, graxas ou produtos químicos e etc.
- Classe II A (não-inertes) – promovem riscos, porém menores que os da classe I, devido características como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. Ex: plásticos, garrafas PET, papel e etc.
- Classe II B (inertes) – não apresentam alterações em sua composição com mudanças de idade, temperatura ou quando em contato com a água. Ex: entulhos de demolição, madeiras, sucata, entre outros.

A disposição de resíduos está fortemente associada ao rápido crescimento econômico das cidades metropolitanas e países em desenvolvimento, em média são 1,4 bilhões de toneladas de resíduos produzidos anualmente no mundo, sendo que aproximadamente 50 % dos resíduos é gerado por menos de 30 países mais bem desenvolvidos do mundo. O Brasil, segundo o Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019, é responsável pela geração de 79 milhões de toneladas de resíduos, e dentre estes, estão os resíduos madeireiros (ABRELPE, 2018; SOUZA, 2019).

2.5.1.1. Resíduos de Madeira

A grande quantidade de resíduos madeireiros produzidos durante as operações de processamento e beneficiamento de madeira em muitos países oferece desafios de reutilização desse material. Geralmente, as indústrias florestais têm baixa rentabilidade e geram grande quantidade de resíduos, segundo a resolução CONAMA nº 474/ 2016 (em vigor) o Coeficiente de Rendimento Volumétrico (CRV) para transformações das matérias-primas tora em madeira serrada é de 35%, o restante é considerado material residual.

Dados internacionais de uma empresa especializada na indústria e beneficiamento de madeira, CONSUFOR, mostram que o rendimento da transformação em toras varia de acordo com o diâmetro das toras, sendo que a produtividade, na média, tende a crescer à medida que

se aumenta o diâmetro da tora, variando entre 50% a 65% (CONSUFOR, 2017).

Ao avaliar o rendimento da espécie tropical Ipê (*Handroanthus sp*) cultivada no estado do Pará, (PIOVESAN; REIS; SOUZA, 2013) obtiveram valores que variaram de 34,89% a 67,24%, tendo rendimento médio 49,91%.

Além da quantidade de resíduos geradas pelo beneficiamento da madeira em toras, outros valores são provenientes do pós-uso (construção civil, naval, móveis, palhetes, transporte e etc), como visto na Figura 7.

Figura 7 – Geradores de resíduos de madeira



Fonte: (a) (FRESH INTERNATIONAL, [s.d.]); (b) (POWER MAG, 2007); (c) (MARINO *et al.*, 2020)

Esse material se enquadra na classe II B (ABNT, 2004), considerado material inerte que não apresenta alteração em sua composição com mudanças de idade, temperatura ou em contato com a água. É apontado como recurso reciclável e renovável devido à sua alta durabilidade e resistência (HOSSAIN *et al.*, 2018).

No Brasil, são centenas de toneladas de resíduos descartados diariamente em aterros e/ou incinerados, cuja quantidade em parte, é proveniente do beneficiamento da madeira em toras, processo no qual o Brasil é um dos cinco maiores produtores, e que juntos somam 54% da produção mundial (GARCEZ *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2018). Geralmente, o material residual desse processo é disposto em aterros sanitários (a céu aberto ou enterrados), queimados para geração de energia ou reciclados. Dentre estas opções, o processo de reciclagem do material é o mais favorável.

Visto que, a disposição em aterros sanitários não é um processo sustentável, devido à ocupação de uma grande área e a ocorrência dos processos como lixiviação e fermentação, resultando na emissão gases (CO₂, metano e etc) e odores (HOSSAIN *et al.*, 2018). Estima-se que 80% do carbono da madeira não se biodegrada em um aterro anaeróbico, e provoca uma carga estimada de 19 kg de CO₂ e um megagrama de madeira enterrada em um aterro produz 54 m³ de metano em um período de 100 anos (MORRIS, 2017) ocasionando poluição ambiental.

Da mesma forma, a destinação através da incineração não é uma via completamente ecológica, mesmo o procedimento sendo satisfatório na geração de energia e diminuição da massa residual, esse processo gera resíduo em cinza e atua, expressivamente, na geração de gases que afetam o efeito estufa (HÖGLMEIER; WEBER-BLASCHKE; RICHTER, 2013; MORRIS, 2017), como umas das principais desvantagens desse sistema para o Brasil, temos:

“(a) alguns dos sistemas mais eficientes de geração de energia apresentados exigem investimentos elevados, tornando-se inviáveis para a maioria das empresas geradoras de resíduos (não capitalizadas); (b) Concentração de fabricantes de equipamentos nas regiões Sul e Sudeste, resultando em elevados custos de frete de equipamentos para comunidades de outras regiões do país; (c) A incineração a céu aberto é uma alternativa poluente; (d) É extremamente difícil a fiscalização da incineração, tanto em meio rural quanto urbano; (e) O processo gera resíduos em forma de cinzas.” (WIECHETECK, 2009).

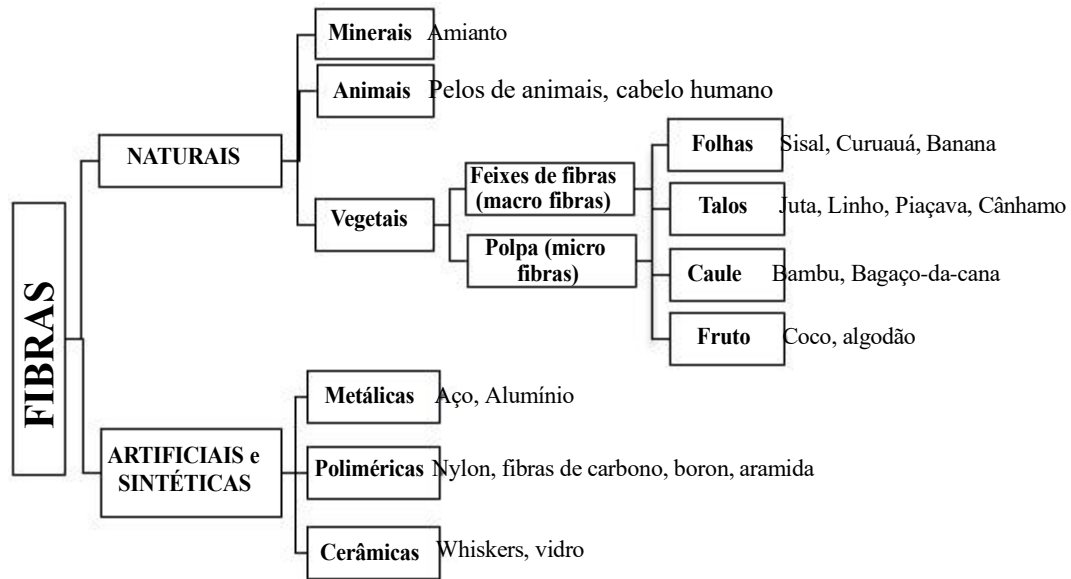
Considerando a grande quantidade de resíduos gerados (EPA, United States Environmental Protection Agency, 2021) faz-se necessário o desenvolvimento de tecnologia funcional e sustentável para agregar valor a esses resíduos. Sua reutilização é uma alternativa para o meio ambiente.

Principalmente, devido esse resíduo apresentar características físicas e químicas que agregam valor comercial ao compósito. Tais como: leveza, durabilidade e capacidade de usabilidade, resistência térmica e acústica. (HOSSAIN *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2016b).

2.5.2. Fibras

A fibra é qualquer estrutura filamentosa, podendo ser instituída como um corpo flexível, cilíndrico, pequeno, alongados de forma que a seção é muito menor que seu comprimento (BLEDZKI; REIHMANE; GASSAN, 1996; SATYANARAYANA; GUIMARÃES; WYPYCH, 2007). As fibras produzidas de forma natural, pela natureza e de forma artificial, pela indústria são classificadas conforme sua origem (Figura 8):

Figura 8 – Esquema de classificação das fibras



Fonte: Picanço (2005)

As fibras provenientes de processos químicos são produzidas e utilizadas na indústria devido suas características competitivas, tais como: resistência a esforços, deterioração, ao contato com água e outras substancias, além de possuir baixo custo de produção, devido à grande quantidade e à mecanização do processo. São divididas em fibras artificiais (produzidas a partir da celulose, como rayon viscoso e o rayon acetato ou vidro, entre outras) e sintéticas (originaria de resinas derivadas do petróleo, que são o acrílico, o náilon, o poliéster, o polipropileno e outras) (PEREPELKIN, 2011).

Dentre as fibras naturais, as fibras de origem mineral são provenientes das rochas, com sua composição essencialmente de silicato. Como exemplo tem-se as fibras de amianto/asbesto, uma das primeiras produzidas em escala industrial, compõe o compósito de cimento amianto, muito utilizado em telhas de fibrocimento e reservatórios, devido sua alta resistência mecânica, durabilidade, oferta e custo. Nos países industrializados, esse material é proibido devido a sua toxicidade, pessoas com maior exposição ao material podem desenvolver câncer e doenças pulmonares (CASTLEMAN; BERGER, 2005), mas ainda é consumido em países em desenvolvimento, principalmente devido ao seu baixo custo e bom desempenho mecânico, apesar dos elevados riscos à saúde humana e animal (AMARAL, 2019; LIMA; TOLEDO FILHO, 2008a).

Por sua vez, as fibras de origem animal, normalmente podem ser retiradas da secreção glandular de alguns insetos, por exemplo, a seda, e dos pelos dos animais, como as lãs, ambos muito utilizados na produção de tecido têxteis (AGUIAR, 2016).

Enquanto que as de origem vegetal, proveniente das plantas e vegetais são estruturas que possuem dois componentes fundamentais, a lignina e a celulose, por isso, são conhecidas como materiais lignocelulósicos (JOHN; ANANDJIWALA, 2008).

2.5.2.1. Fibras Vegetais

As fibras vegetais apresentam vantagens como, grande disponibilidade, qualidade, diversidade, fácil manufatura e aproveitamento de carácter ecológico com benefício ao meio ambiente.

Como base na classificação das fibras há dois eixos para as fibras vegetais: fibras de feixe (primárias, macro fibras) e polpa (secundárias, microfibras). As fibras primárias são as plantas cultivadas pelo conteúdo de suas fibras (juta, malva, cânhamo), enquanto que as secundárias são aquelas em que a fibra é produzida como um subproduto (óleo de palma e coco).

As fibras vegetais podem ser retiradas do:

Talo ou Tronco: fibras de malva, juta, cânhamo, linho, rami e kenaf;

Folhas: fibras de abacaxi, sisal, abacá;

Fibras do Caule/Núcleo: fibras de bambu e de cana-de-açúcar.

Fibras do Fruto/Semente: fibras de coco e algodão. (AGUIAR, 2016; STAIGER; TUCKER, 2008)

2.5.2.2. Fibras de Malva

A malva, nome popular da *Urena lobata linn*, é uma herbácea, identificada como uma fibra vegetal. O nome é originário do latim, significa suave e emoliente ao tato, popularmente conhecida no estado do Amazonas como malva roxa (Figura 9), pertencente ao reino *Plantae*, divisão *Magnoliophyta*, Classe *Magnoliopsida*, ordem Malvales e família Malvaceae (SILVA, 1989).

Figura 9 – Malva roxa Amazônica



Fonte: Margem *et al.* (2015)

É cultivada na região Amazônica, especialmente, por ser uma espécie com boa adaptação aos solos da área de várzea, desenvolvendo-se em climas quente e úmido com períodos alternados de sol e chuva, com poucas exigências nutricionais e sementes resistentes ao armazenamento. Suas fibras possuem alta resistência mecânica e baixa densidade, sobretudo, quando extraídas do troco, que quando rígidas e eretas podem alcançar 2,38 metros de comprimento (AGUIAR, 2016; SILVA *et al.*, 2018), conforme apresentadas na tabela 7 e visualizadas na figura 10.

Tabela 7 – Propriedades física e mecânicas da fibra de malva

Diâmetro (μm)	Comp. (mm)	Massa específica (Kg/cm^3)	Absorção Máxima (%)	Resistencia a tração (MPa)	Along. a ruptura (%)	Mód. de elasticidade (Gpa)
42,6	23,8	1409	182,2	160	5,2	17,4

Fonte: (SAVASTANO JR.; AGOPYAN, 1999)

Figura 10 – Fibras de malva extraídas em secagem



Fonte: Margem *et al.* (2015)

Com grande potencial industrial é uma planta com destaque no setor produtivo de fibras brasileiras, contribuindo fortemente para a economia nacional entre os anos de 1960 a 1980.

No estado do Amazonas o seu cultivo começou a se desenvolver a partir de 1971, atingindo o dobro da produção de, quando comparado a juta em 1978, desde então, começou a decrescer devido a implementação das fibras sintéticas no mercado (década de 60), a baixa rentabilidade das fibras naturais, que atua com beneficiamento carente, com mão-de-obra precária, limitações de produção em temporadas de cheia, e a falta de maquinários de apoio (HOMMA, 1995).

A produção atual pode ser observada na figura 11 e é quase exclusivamente oriunda dos Estados do Pará e Amazonas, com valor de mercado: de R\$/Kg 7,7033 estipulado pela portaria Nº 135, DE 12 DE JULHO DE 2019. A diminuição na produção de malva ainda é procedente da falta de investimentos no setor, com a implantação de máquinas que auxiliem no beneficiamento do produto de forma rápida e maior. Da mesma forma, há pouco incentivo a utilização do material natural em virtude do material sintético (AGUIAR, 2016; SILVA, 1989). Isto posto, há uma carência mundial no estudo e desenvolvimento de materiais sustentáveis, que vinculem e auxiliem na reversão do declínio mostrado na figura 11, promovendo assim, expectativa para os microagricultores da Amazônia que ainda vivem da produção da fibra de malva.

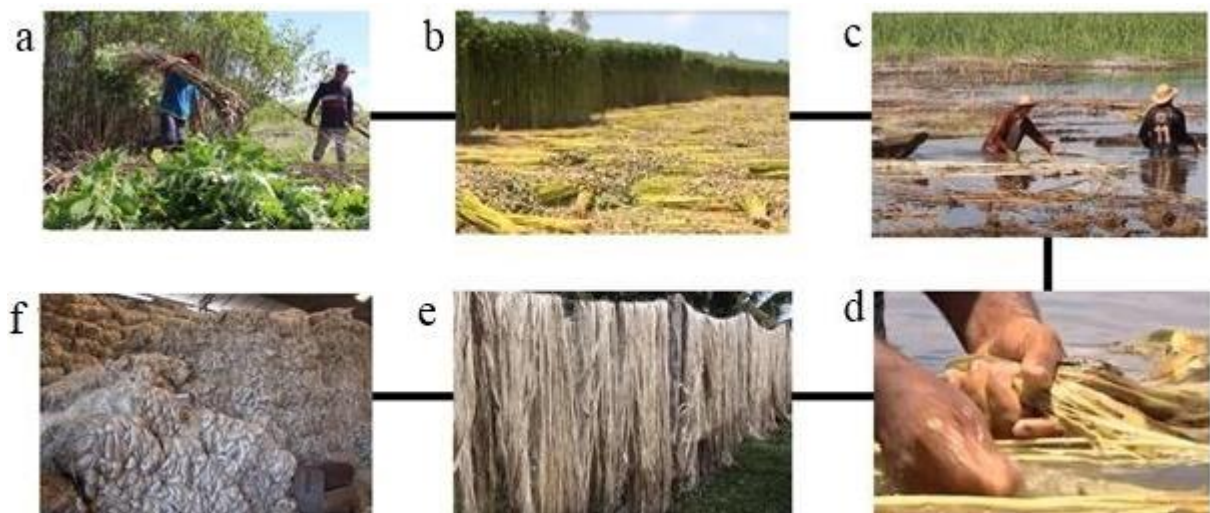
Figura 11 – Escala da Produção de Malva



Fonte: CONAB, 2021

A figura 12 mostra o processo de obtenção da fibra na região Amazônica, município de Manacapuru/AM.

Figura 12 – Processo de obtenção da fibra de malva comercial



Fonte: G1/Globo Rural (2014); ICAN (2012)

A fibra é cultivada das semestres da planta, e quando maduras são cortadas (Figura 12a), separadas em blocos e depositados no chão para secagem das folhas, processo de 8 a 10 dias (Figura 12b), posteriormente os feixes de caule ficam submersos de 8 a 20 dias em água parada

ou correte (Figura 12c), para liberação do tecido da malva, os feixes são submetidos ao processo conhecido por maceração ainda em água (Figura 12d), e, após completar a maceração, as fibras são lavadas em água limpa e postas para secar, normalmente ao sol (Figura 12e) e em seguida enroladas em blocos para comercialização (Figura 12f).

Após a secagem, as fibras passam por máquinas específicas para eliminar os resíduos vegetais ainda presentes, pontas endurecidas ou partes mal maceradas, com o intuito de torná-las mais macias. Em seguida, são organizadas em fardos não trançados, variando de 10 a 15 cm de diâmetro, de acordo com seu comprimento, cor e brilho (AGUIAR, 2016).

A cadeia produtiva de malva tornou-se um importante segmento da economia social nesse estado, considerando que sua produção contribui na geração de renda para comunidades com precariedade econômica. A empregabilidade da fibra é, sobretudo na confecção de sacaria (para acondicionar produtos como açúcar, café, frutas etc), também é usada na fabricação de papel, vestuário, tecidos para estofados e tapetes, como mostrados na Figura 13 (SAVASTANO; WARDEN; COUTTS, 2000; SAVASTANO JR., 2000).

Figura 13 – Exemplos da empregabilidade das fibras naturais



Fonte: www.cafesdobrasilclub.com.br

Considerando suas propriedades físicas, mecânicas e químicas, as fibras vegetais de malva podem ser utilizadas como reforços em painéis de fibrocimento. Propriedades da fibra como resistência a tração, elasticidade, comprimento médio elevado e leveza agregariam qualidades ao compósito. Bem como, a sua aplicação agrega valor à fibra, que atualmente, apresenta declínio de produção.

2.6. Compósitos Reforçados Com Material Lignocelulósico

Manter a durabilidade dos materiais lignocelulósicos no compósito é uma das maiores dificuldades relatada pelos pesquisadores da área (ADESINA, 2021; LIMA; TOLEDO FILHO, 2008b), mas também, é uma característica de suma importância, uma vez que esses materiais

necessitam apresentar vida longa, principalmente, quando incorporados na indústria de construção. A durabilidade é um dos motivos, pelo qual, a utilização de fibras naturais representa um mercado pequeno quando comparado com as fibras sintéticas (WEI; MEYER, 2015).

Especificamente, a produção de fibrocimento iniciou-se na década de 1970 nos países de Guatemala, Colômbia e Nicarágua através da produção de telhas de cimento-sisal, que, nas condições ambientais desses países, apresentaram vida útil entre 2 e 4 anos (AGOPYAN, 1991).

Estudos sobre o desempenho mecânico de compósitos à base de cimento reforçado com fibra natural (AHMAD; KHAN; SMARZEWSKI, 2021; KAPLAN; SALEM ELMEKAHAL, 2021; WEI; MEYER, 2015), a durabilidade do compósito natural de fibrocimento em diferentes condições de envelhecimento e métodos de tratamento para melhorar sua durabilidade foram realizados nos últimos anos (AGUIAR, 2016; RAMLI; KWAN; ABAS, 2013; WEI; MEYER, 2015).

Melo Filho *et al* (2013) destaca que para um estudo de durabilidade, de compósitos reforçados com fibra, é necessário que (i) haja, primeiramente, identificação das características exigidas pelo produto final, das funções que ele deverá exercer e das condições de exposição, (ii) detectar os principais agentes causadores da degradação do produto e seus mecanismos de deterioração, (iii) quantificação do dano observado devido à degradação e (iv) por fim, propor uma adaptação ao material e avaliar a viabilidade de inserção no mercado consumidor.

Syed *et al.* (2020) avaliou o papel da fibra de coco no concreto, sendo uma fibra natural abundante e que apresenta boas características de resistência. Foram feitos concretos com diferentes teores de fibra, avaliando com concreto convencional e o concreto protendido e diferentes parâmetros de resistência como flexão, compressão e resistência à tração da fibra de coco. Resultados mostram que a resistência à compressão diminui quando adicionado fibras. Deve ser devido ao fato de que, quando as fibras são adicionadas, microprocessos finos entram nos poros superficiais das fibras interferido na ligação entre as fibras e a mistura, por outro lado aumenta a resistência a flexão do compósito em 5%.

Em geral, os materiais cimentícios possuem baixa tenacidade, o que leva à rachadura e/ou fratura do compósito quando a força é aplicada (NASSAR; SOROUSHIAN, 2012; SYED; NERELLA; MADDURU, 2020; WEI; MEYER, 2015). Por isso, são reforçados com fibras, quando ocorre a degradação desse material, devido a alcalinidade do cimento (formação de hidróxido de cálcio) e as características químicas da fibra (teores desvantajosos de lignina e hemicelulose), o reforço é inválido. Desde modo, é aplicável tratamentos para maximizar a durabilidade da fibra na matriz.

2.6.1. Compósitos cimento-madeira (CCM)

Os CCM podem apresentar características como leveza, esbeltes, estabilidade dimensional e estrutural, isolamento térmico e acústico, resistência ao fogo e versatilidade (QUIROGA; MARZOCCHI; RINTOUL, 2016). Muito populares em países desenvolvidos, são normalmente empregados em construções secas (*steel frame*), que envolvem, basicamente, a estrutura em aço e as divisórias em painéis particulados, como observados na Figura 14.

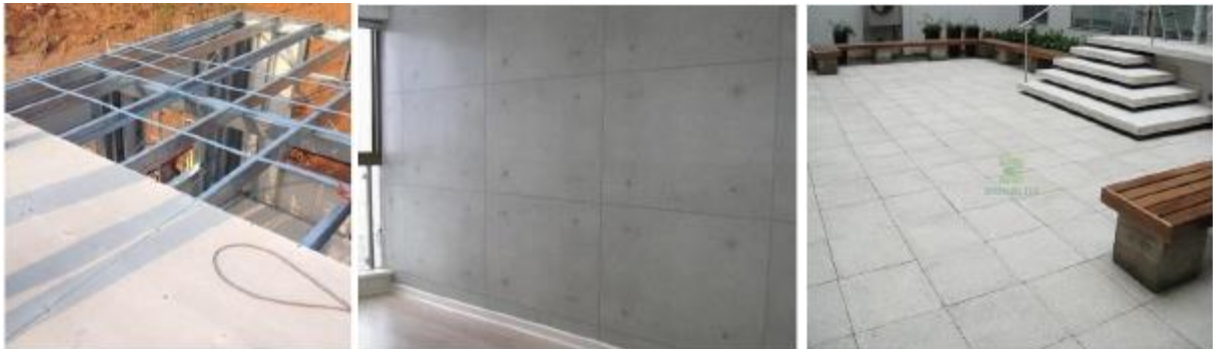
Figura 14 – Modelo de construção seca



Fonte: (SANTOS, 2016)

São empregados também em tetos, como telhas e forros (Figura 15a), barreiras acústicas e térmicas, através de elementos de vedação e blocos não estruturais (Figura 15b), bem como podem ser usados em pisos e acabamentos (Figura 15c) (KARADE, 2010; PIMENTEL; BERALDO, 2003; QUIROGA; MARZOCCHI; RINTOUL, 2016), alguns exemplos de sua utilização são mostrados abaixo:

Figura 15 – Exemplos de utilização das placas de cimento



(a)

(b)

(c)

Fonte: (a) (ALIBABA, [s.d.]); (b) (FERNANDA, 2019); (c) (DRENALTEC, [s.d.])

Apesar das vantagens do compósito, a possível incompatibilidade de madeira com o cimento pode ocasionar o retardamento de pega – efeito da reação do cimento com a água que provoca endurecimento – diminuindo o seu uso, ocasionado pela presença de polissacarídeos na madeira, pela quantidade de partículas usadas nos CCM e pela geometria da madeira (QUIROGA; MARZOCCHI; RINTOUL, 2016).

A geometria das partículas maiores é recomendada por alguns autores, pois partículas em pó podem afetar a viabilidade econômica do produto, devido ao custo para redução e com maior área superficial, é necessária uma quantidade maior de cimento (AZAMBUJA *et al.*, 2017; TOLÊDO ROMILDO D. *et al.*, 2003).

Da mesma forma, a quantidade dos resíduos de madeira utilizados na produção de CCM está diretamente relacionado a incorporação pelo cimento. O cimento quando hidratado, agrega-se entre suas partículas promovendo reações de endurecimento, o incremento de resíduos de madeira na pasta cimentícia atua como uma barreira a esse processo, dificultando-o (WANG *et al.*, 2016b).

Esse processo de retardamento e/ou inibição do tempo de pega (reações químicas do cimento para endurecimento e cura) é proveniente da quantidade de açúcar presente na madeira. Esses açúcares, em forma de polissacarídeos são carboidratos que desempenham funções como fonte e reserva de energia e atuam como elementos estruturais na parede celular de plantas, sendo a madeira constituída de cerca de 65 a 75 % de polissacarídeos (ARANTES *et al.*, 2011).

O incremento de materiais aceleradores atua em contrapartida ao processo inibidor da madeira, possibilitando a produção dos CCM. Wei *et al.* (WEI; ZHOU; TOMITA, 2000) indicam aceleradores como o cloreto de cálcio e sulfato de alumínio para impedir que os extrativos da madeira comprometam a hidratação do cimento.

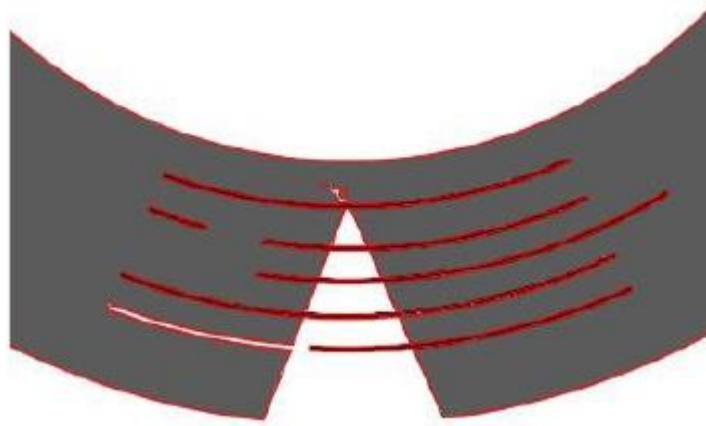
Wang (WANG *et al.*, 2016b) desenvolveu painéis de partículas de madeira recicladas ligados a cimento para verificar as propriedades como isolante térmico, o estudo analisou dosagens de 30%, 40%, 50%, 60% e 70% de madeira. Obtendo melhores resultados para isolamento com proporções mais elevadas da matéria, atendendo os padrões internacionais de resistência a flexão (9Mpa) e permitindo sua utilização como estrutura leve.

Ince *et al.* (INCE; TAYANÇLI; DEROGAR, 2021) em seu estudo sobre a “reciclagem de resíduos de madeira em argamassas de cimento para a regeneração de um ambiente sustentável”, constatou que esses materiais atuam diretamente como uma alternativa mais ecológica para a reciclagem de resíduos de entulhos industriais, bem como economiza recursos naturais e o CO₂ de emissões necessárias para produzir as matérias-primas para a fabricação de cimento. É ressaltado que o tempo de pega tende a aumentar quando os resíduos de madeira são utilizados como substitutos do cimento. E que há reduções na resistência à compressão do compósito.

2.6.2. Compósitos cimentícios de fibras vegetais (CCFV)

A principal benefício do incremento de fibras em painéis cimentícios é o seu comportamento após o início da fissuração, o que chamamos de tenacidade, uma propriedade do material referente a energia total absorvida quando o mesmo se encontra fissurado (AGOPYAN *et al.*, 2005; BARBOSA DA SILVA JUNIOR; MARIA SILVA DE SOUZA; DE ANDRADE SILVA, 2021; SADROLODABAE *et al.*, 2021). As fibras funcionam como uma barreira para trincas e pós-trincas no compósito (Figura 16), resultando em um menos quebradiço e com uso mais duradouro. Os CCFV também apresentam como características a capacidade de flexão, ductibilidade, resistência a esforços de tração e entre outras (AGUIAR, 2016; MELO FILHO; SILVA; TOLEDO FILHO, 2013; MOHR; NANKO; KURTIS, 2005).

Figura 16 – Comportamento pós-fissuração de CCFV



Fonte: Aatoria própria (2020)

Savastano Jr. (SAVASTANO JUNIOR, 2007a) atribui essas características ao compósito devido a uma maior aderência fibra-matriz, que é obtida através da melhor interação na zona de transição, fazendo com que as duas fases (fibra e matriz) trabalhem em conjunto efetivamente. O autor define zona de transição como a região cimentícia próximo à fibra, com espessura de 10 mm a 100 mm, e que apresenta propriedades distintas do restante da matriz, quanto mais espessa essa zona de transição, menor resistência mecânica apresenta no compósito.

Há dois, principais, incentivos para o desenvolvimento de novos compósitos em fibrocimento com fibras naturais. O primeiro é eliminar a utilização de componentes de amianto (asbesto) na produção de chapas fibrocimento, sendo este um processo industrial de grande escala que comporta danos à saúde humana, como câncer e outras doenças. O segundo consiste em produzir compósitos que sejam úteis em diferentes componentes da construção, como pré-moldadas (paredes, telhas e placas de teto e piso, que tenha resistência e economia (AGOPYAN *et al.*, 2005).

Outro estímulo na utilização de fibras naturais em compósitos cimentícios é a inclusão do material aos parâmetros de sustentabilidade, visto que é um material natural, amplamente disponível, de baixo custo, que não é perigoso e que atua na diminuição do uso de fibras químicas (sintéticas e artificiais), reduzindo a energia necessária para processamento do material. Além disso, seu cultivo estimula o agronegócio, através do fomento de plantações que ajudam no desenvolvimento da zona rural.

Figura 17 – Aplicações de compósitos de fibrocimento



(a)

(b)

Fonte: (a) (SAVASTANO JUNIOR, 2007b); (b) (BERNARDES; MARIA S. B. DE BARROS, 2010)

Foi desenvolvido por Oliveira (OLIVEIRA, 2013) compósitos cimentícios reforçados com fibras longas de juta e de malva, no teor de 8%. Os principais resultados indicaram que os compósitos reforçados com ambas as fibras, apresentaram propriedades mecânicas adequadas para peças semiestruturais e estruturais, sendo os compósitos reforçados com fibras de malva superior aos dos compósitos reforçados com fibras de juta (cerca de 20% na tração à flexão e 10% na tração direta).

Lima (LIMA, 2004) fez uma análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal, no teor de 3% a 6%. Resultados principais indicaram que a adição de fibras curtas aumenta a tenacidade da matriz de cimento, bem como, quando as fibras são longas e com substituição parcial de cimento por Metacaulinita é obtido compósitos duráveis, tenazes e com elevada resistência a tração e flexão.

Silva Junior *et al.* (BARBOSA DA SILVA JUNIOR; MARIA SILVA DE SOUZA; DE ANDRADE SILVA, 2021), fabricaram compósitos a partir de uma matriz cimentícia com baixo teor de hidróxido de cálcio, obtida pela substituição parcial do cimento por cinza volante e Metacaulinita. Foram desenvolvidos dois tipos de compósitos, cada um com três camadas de fibras longas e unidirecionais de sisal, variando a condição das fibras em saturadas com água e com umidade natural. O comportamento mecânico foi avaliado por meio de ensaios de tração direta e flexão em quatro pontos. Os compósitos reforçados com fibras saturadas apresentaram maior capacidade de deformação em tração devido às propriedades da interface fibra-matriz e menor resistência à flexão.

3. Materiais e Métodos Experimentais

3.1. Materiais

3.1.1. Cimento

Foi utilizada nesta pesquisa o cimento *Portland* composto 40 MPa resistente a sulfatos (CPII Z 40 RS), obedecendo os parâmetros da NBR 16697 (ABNT, 2018). Esse material foi selecionado, principalmente, por conter adição pozzolânica na mistura (6 a 14%), proporcionando maior durabilidade do material lignocelulósico dentro do compósito (CAVALCANTE *et al.*, 2018). Além disso, é um cimento resistente a sulfatos que contém elevada resistência inicial. Ademais, é um material fabricado e comercializado no estado do Amazonas, concedido pela empresa MIZU Cimentos Especiais, situada na Vila Buriti, Manaus/AM, localização 3°08'51.9"S 59°58'10.7"W.

A composição química do material é apresentada na tabela 8 e a massa específica utilizada para quantitativo dos protótipos é $3,07 \pm 0,00 \text{ g/cm}^3$, fornecida pelo fabricante.

Tabela 8 – Composição básica do cimento

Componentes	Faixa de concentração (%)
Silicato tricálcico	20 – 70
Silicato dicálcico	10 – 60
Ferro-aluminato de cálcio	5 – 15
Aluminato tricálcico	1 – 15
Sulfato de cálcio	2 – 10
Carbonato de cálcio	0 – 5
Óxido de magnésio	0 – 8
Óxido de cálcio	0 – 2

Fonte: Mizu Cimentos Especiais, 2018

3.1.2. Areia

A areia utilizada foi adquirida no comércio local da cidade de Manaus. É uma areia comumente aplicada para uso em conjunto com o cimento e que obedece aos parâmetros das normas NBR 248 – Agregados: determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003). Após a aquisição o material foi seco em estufa ($105 \pm 3^\circ\text{C}$) até umidade inferior a 3%. O material foi peneirado na malha de 1,7 mm para retirada de pedregulhos e

fragas.

Wei *et al.* (2016) em seus estudos com compósitos de cimento reforçados com fibras utilizando areia e Metacaulinita no traço, apresentou agregado miúdo com densidade específica de 2.6 g/cm³ e módulo de finura de 2.8, (KUTANAEI; CHOBBASTI, 2016) utilizam uma areia natural com gravidade específica de 2.78 g/cm³ e DMC de mínimo de 0.221 mm.

3.1.3. Metacaulinita

O Metacaulinita utilizado foi cedido pela empresa Metacaulinita do Brasil Indústria e Comércio Ltda, situada na cidade de Jundiaí/SP, localização 23°09'00.5"S 46°49'34.5"W. Comercializado com o nome de Metacaulinita HP ULTRA, indicado para aumento de resistência mecânica e a ataque de sulfatos, redução e controle das reatividades álcali-agregado, diminuição da porosidade e calor e entre outros. O material atende os parâmetros e requisitos da NBR 15894 – parte 1, 2 e 3 – que tratam do uso de Metacaulinita com cimento *Portland* em concreto, argamassa e pasta (ABNT, 2010d, 2010e, 2010f; HELENE, 2003).

Possuem composição química de no máximo 65% de elementos de SiO₂ (óxidos de silício) bem como 70% no mínimo contabilizando a soma da média dos seguintes elementos: Al₂O₃ + Fe₂O₃ + SiO₂ (óxidos de alumínio, de ferro e de silício), teor de umidade ≤ 2% e perda ao fogo ≤ 4%.

Com as propriedades apresentadas na tabela 9, a Metacaulinita industrial utilizada atende os parâmetros normativos.

Tabela 9 – Caracterização da Metacaulinita

Propriedades Fisico-Químicas	Valores Típicos	Valores limites (NBR 15.894)
SiO ₂	57%	44% a 65%
Al ₂ O ₃	34%	32% a 46%
CaO + MgO	< 0,1%	< 1,5%
SO ₃	< 0,1%	< 1%
Na ₂ O	< 0,1%	< 0,5%
Eq.Alcalino Na ₂ O	< 1,5%	< 1,5%
Fe ₂ O ₃	2%	-
TiO ₂	1,50%	-
Umidade	0,50%	< 2%
Perda ao Fogo	3%	< 4%

Resíduo #325	6%	< 10%
Desempenho com Cimento (7 dias)	115%	> 105%
Atividade Pozolânica Chapelle	880mg Ca(OH) ₂ /g	> 750mg Ca(OH) ₂ /g
Área Específica BET	230.000cm ² /g	150.000cm ² /g
Massa Específica	2,56 kg/dm ³	-

Fonte: Metacaulinita do Brasil, 2021

3.1.4. Fibras de Malva

As fibras de malva (*Urena Lobata Linn*) foram adquiridas da empresa COOPERFIBRAS (Cooperativa dos Juticultores, Pescadores e Produtores Extrativistas do Amazonas) com sede na cidade de Manacapuru, Região Metropolitana de Manaus/AM, localização 3°17'43.6"S 60°36'57.5"W, conforme observados na figura 18.

Figura 18 – Fibra de Malva amazônica lavada e seca



A composição química da malva amazônica é apresentada por (OLIVEIRA, 2013), conforme tabela 10:

Tabela 10 – Composição química da fibra de malva

Extrativos	Celulose	Hemicelulose	Lignina
$7,55 \pm 0,0636$	$69,36 \pm 0,0013$	21,28	$13,55 \pm 0,0064$

Fonte: Oliveira (2013)

3.1.5. Resíduos de Madeira

Os resíduos de madeira foram cedidos pela empresa Mil Madeiras Preciosas LTDA, situada no município de Itacoatiara/AM, localização 3°03'06.4"S 58°43'40.1"W. São resíduos de madeira de espécies variadas (Angeim vermelho, Ipê, Itaúba, Mogno Brasileiro e etc), que foram secos e triturados até a granulometria 4,75 mm a 1,18 mm para utilização, observados na figura 19. Essas granulometrias foram selecionadas devido os materiais retidos na peneira de 4,75 mm serem classificados como agregados graúdos e os materiais passantes na peneira de 4,75 e retidos na peneira de 1,18 mm serem dispostos como agregados miúdo pela NBR 7211 (ABNT, 2009a), e neste estudo buscou-se uma a melhor composição entre agregado graúdo e miúdo dos resíduos de madeira.

Figura 19 – Resíduos de Madeira separados nas granulometrias de 4,75 mm e 1,18 mm, respectivamente



3.1.6. Aditivo Acelerador de Pega

Foi utilizado nos compósitos que continham resíduos de madeira aditivo acelerador de pega. Como relatado (item 2.5), os polissacarídeos presentes na madeira atuam inibindo a pega do cimento. Esse aditivo é utilizado como contrapartida, fazendo que o compósito obtenha propriedades de endurecimento e possa ser desmoldado. Foi utilizado o aditivo Vedacit Rapidíssimo, devido ser um aditivo comumente encontrado no mercado de construção civil e mostra-se eficiente em pré-testes, recomendado pelo fabricante dosagem de 3 a 15% do material sobre o peso do cimento, adotou-se a dosagem máxima recomendada, os dados técnicos são apresentados na tabela 11.

Tabela 11 – Características do acelerador de pega

Característica	Valor	Observações
Densidade	1,27 g/cm ³	
Dosagem Recomendada	3% a 15%	Sobre a massa do cimento
Composição básica	Silicatos	

Fonte: Vedacit Impermeabilizantes (2019)

3.2. Métodos Experimentais

Para a elaboração dos procedimentos experimentais, o trabalho foi dividido em quatro etapas, conforme figura 20.

A 1ª etapa consiste na caracterização dos componentes do compósito, e acordo com a necessidade. Para o agregado miúdo (areia) foi determinado a massa específica e granulometria. Para a fibra de malva foi determinado da massa específica. Para os resíduos de madeira foi determinação da massa específica, granulometria e composição química.

Na 2ª etapa foram realizados testes para definição da melhor quantidade de material lignocelulósico adicionado ao compósito. Foram moldados placas de 280 x 280 x 10 mm, com teores 2%, 4% e 6% do volume total do compósito foram substituídos por fibras de malva, no traço de 1:1:0,4, baseados em (AGUIAR, 2016; MELO FILHO; SILVA; TOLEDO FILHO, 2013; SAVASTANO; WARDEN; COUTTS, 2000), comprimentos de fibra de 25 mm e 50 mm. Após 7 dias de cura, os compósitos foram testados em flexão de 4 pontos na máquina universal de ensaios Oswaldo Filizola modelo AME-5kN, no qual foram observados valores de resistência máxima e tenacidade, os melhores resultados foram determinantes na continuação da pesquisa.

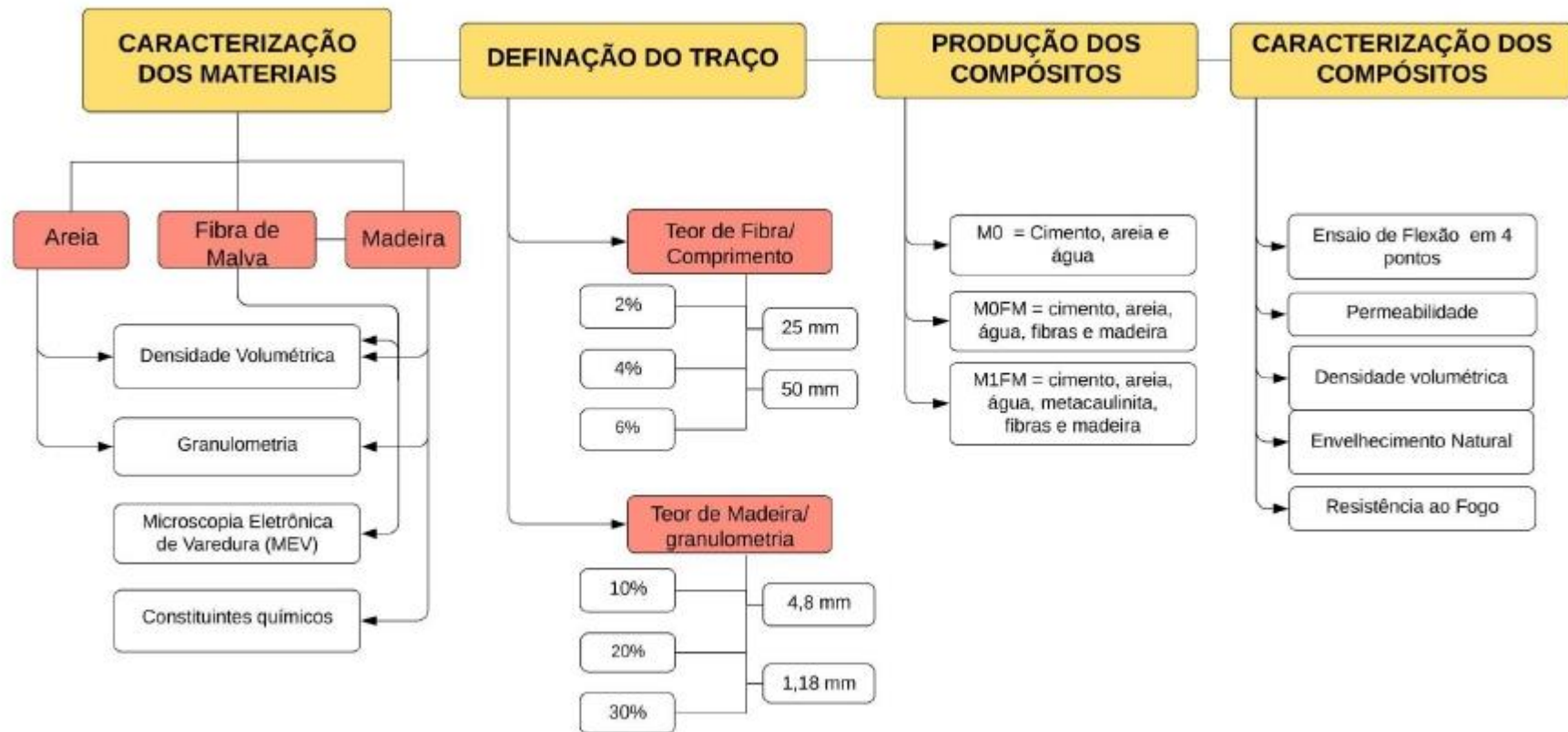
Da mesma forma, teores de 10%, 20% e 30% do volume total do compósito foram substituídos por resíduos de madeira (WANG *et al.*, 2016b) (AL RIM *et al.*, 1999). Foram verificados duas granulometrias para os particulados de madeira, uma de materiais graúdos retidos na peneira de 4,75 mm e outra de materiais miúdos (sem pó) passantes na peneira de 4,75 mm e retidos na peneira de 1,18 mm.

Após a determinação do teor ótimo de material lignocelulósico para os compósitos iniciou-se a 3ª etapa, que consiste na produção dos compósitos para realização dos ensaios propostos na 4ª etapa.

Após o ciclo completo de cura dos compósitos, teve um tempo de paralisação devido a pandemia do coronavírus, declarada em 30 de janeiro de 2020 pela Organização Mundial da Saúde (OMS) (MACEDO; ORNELLAS; DO BOMFIM, 2020). Posteriormente, foi realizado ensaios de flexão em 4 pontos nas amostras com e sem tratamento (M0FM e M1FM, respectivamente) da incrementação do Metacaulinita, foi realizado o mesmo ensaio em amostras de placas cimentícias comerciais como pareamento de comparação. As amostras com tratamento foram submetidas ao teste de resistência ao fogo, seguido do ensaio de flexão em 4 pontos com o intuito de verificar a resistência a propagação de chamas e a perda de resistência de ruptura e tenacidade após a incineração.

As propriedades físicas (absorção de água e aumento de espessura) do compósito foram testadas após 24 h de imersão em água, com o objetivo principal de investigar o ganho de peso após a imersão em água.

Figura 20 – Fluxo-organograma das etapas do projeto

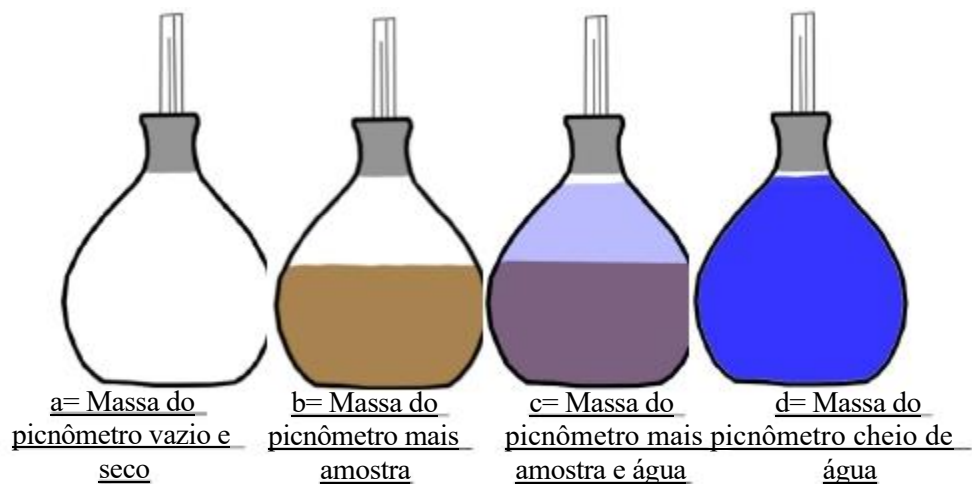


3.2.1. Caracterização dos materiais

3.2.1.1. Massa específica da areia

A massa específica foi determinada pelo método de picnometria de acordo com a norma técnica DNER-ME 084/95 para determinação da densidade real de agregado miúdo. O experimento consiste na obtenção de 4 massas do picnômetro, conforme figura 21:

Figura 21 – Método de picnometria para determinação de massa específica da areia



Posteriormente, essas massas são aplicadas na equação 3.1 onde D é o resultado é a densidade real do agregado.

$$D = \frac{b - a}{(d - a) - (c - b)} \quad \text{Equação 3.1}$$

3.2.1.2. Massa específica da fibra de malva e resíduos de madeira

Para determinação da massa específica da fibra de malva e dos resíduos de madeira será empregado o método de Leão (LEÃO, 2008) e a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1997), respectivamente.

Consiste em cortar as fibras em comprimentos médios de 30 mm (para os resíduos de madeira não será necessário o corte) visando melhor introdução no recipiente. Será cortado e separado 5,0 g do material, postos para secagem em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até a constância de massa (quando duas pesagens consecutivas, espaçadas de 2 horas não exibissem variação de massa

superior a 0,1% para as fibras e 0,5% para a madeira).

Um recipiente graduado (ex.: proveta) deverá ser preenchido com o material e um volume de água conhecido, o material ficará em decantação por 24 horas, para obter valores de variação sob o volume de água, admitindo, assim, que os vazios foram ocupados pela água. Com os valores de massa e volume é aplicado a equação 3.2:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

ρ = densidade básica

m= massa constante

v = volume

3.2.1.3. Constituintes químicos

Os constituintes químicos analisados referentes aos resíduos de madeira e os procedimentos adotados para obtenção dos dados são mostrados na tabela 9 com algumas adaptações baseadas na ISSN 0103-0205.

Tabela 13 – Referência para obtenção dos constituintes químicos

Análises	Referência bibliográfica
Extrativos Solventes	TAPPI 204 cm-97 / NBR 14853
Teor de Lignina	TAPPI 222 om-02 / NBR 7989
Teor de Celulose	NBR 14032
Teor de Cinzas	TAPPI 211 om-02
Hemicelulose	Determinada pela diferença

*(ABNT, 2010a, 2010b, 2015a; TAPPI, 1997, 2002a, 2002b)

3.2.1.4 – Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV)

Para a realização do MEV nas fibras de malva foi utilizado o equipamento de microscopia eletrônica de varredura de bancada da marca ORFORD INSTRUMENTS X-ACT, *PentalFET precision*, modelo: 51-ADD0007, resolução: 5,9 keV, do LTMOE - Laboratório Temático de Microscopia Óptica e Eletrônica, do Instituto Nacional De Pesquisas da Amazônia (INPA).

Inicialmente, as amostras dos compósitos foram cortadas em de 2,5 cm, com o auxílio de uma lamina de aço inoxidável. Antes do corte as fibras foram imersas em água por um período de 10 minutos, pois tal procedimento minimiza o esmagamento das fibras.

Posteriormente, posicionou-se as fibras na vertical com o auxílio de um suporte de madeira, de modo a facilitar a visualização de todas as superfícies.

3.2.2. Definição do Traço

3.2.2.1 Matriz

Nesta pesquisa foi utilizado o traço 1:1:0,8 (aglomerante, areia, água) visto que:

- Melo Filho (2013), Savastano Jr. (2007a) e outros pesquisadores recomendam a utilização de um traço autoadensante na produção de compósitos com fibras naturais. A matriz autoadensante tem como função, sobretudo, preencher os vazios do compósito com o próprio peso, dispensando o adensamento manual e/ou mecânico. Para obter essa característica é necessário que a matriz possua elevado abatimento (seja plástica), portanto esses autores fazem uso do traço 1:1:0,4 com adição de aditivo plastificante.
- Nesta pesquisa, o objetivo foi confeccionar um compósito de fibra-madeira-cimento. A madeira atua como inibidor das propriedades de endurecimento do cimento, sendo imprescindível o uso de aditivo acelerador de pega. E visando a utilização de apenas um aditivo, dispensa-se o uso do aditivo plastificante, aumentando o consumo de água para manter o auto adensamento da matriz.
- O uso de material pozolânico aumenta a necessidade de água na mistura (KAVITHA *et al.*, 2016; ORIOL; PERA, 1995; RIBEIRO; DE VASCONCELOS, 2018)

Esclarecendo, assim, o consumo de água maior, quando comparado aos valores utilizados nas referências (AGUIAR, 2016; MELO FILHO; SILVA; TOLEDO FILHO, 2013) para a fabricação do compósito.

3.2.2.2 Quantidade de Metacaulinita

Estudos sobre a quantidade de MK necessária para remover completamente o CH do cimento são variáveis, tendo como faixa de utilização a substituição de 20% a 40% do cimento em volume. (CAVALCANTE *et al.*, 2018; KAVITHA *et al.*, 2016; KOSTUCH; WALTERS; JONES, 2000; ORIOL; PERA, 1995; SABIR; WILD; BAI, 2001)

Essas variações dependem da composição da pozolâna, da pureza do MK e da proporção de água/cimento que irá determinar a diluição do CH no concreto. Dito isto e visando a excisão completa do CH no concreto após a cura, para este estudo fez-se o uso de 40% de MK em substituição ao cimento.

3.2.2.3 Quantidade de Fibras de Malva

Foi realizado estudos prévios para a determinação da quantidade de fibra de malva e resíduos de madeira que melhor se adequavam a composição da matriz, esclarecidos com detalhes no ANEXO 1.

Foram testados teores de fibra de 2, 4 e 6 (%) no comprimento de 25 e 50 mm, sendo confeccionados 6 placas com dimensão de 280x280x10 mm cada. Considerando os valores de densidade volumétrica de 0,76 g/cm³ para fibra e de 2,6 g/cm³ para o agregado, cujos valores foram obtidos através de métodos de (LEÃO, 2008) e (NBR 5738, 2015b), respectivamente.

A fim de melhor trabalhabilidade da mistura foi diluído em água aditivo plastificante a mistura, o tempo de cura foi de 7 dias e o teste de definição foi a flexão de 4 pontos na máquina universal de ensaios mecânicos modelo AME-5kN marca Owvaldo Filizola, localizada no Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LaMAC)

Os resultados mostraram que os protótipos produzidos com fibras de 50 mm possuem resultados mecânicos mais expressivos, cerca 13% superior quando comparados aos protótipos com fibras de 25 mm.

Também, foi observado que concentração de 4% de fibra curta de Malva obteve os maiores valores para resistência de tensão (4,66 MPa e 4,14 MPa). Logo, como definição do traço será empregado 4% de fibra de Malva com 50 mm de comprimento.

3.2.2.4 Quantidade de Resíduos de madeira

Da mesma forma, foi realizado estudos prévios para a determinação da quantidade de

resíduos de madeira que melhor enquadravam-se no compósito proposto, os resultados são apresentados no ANEXO 2.

Foram produzidas 6 placas retangulares de 280x280 mm e 100 mm de espessura. O traço da matriz cimentícia foi 1:1:0,4 (cimento:areia:água), os materiais foram separados em massa considerando suas densidades. A substituição da matriz em resíduos de madeira foi de 10%, 20% e 30% sobre o volume da placa.

A amostra com 30% de resíduo apresentou desagregação entre a matriz e o reforço, ocasionando perda de material e baixa resistência a ruptura

As amostras com 10% de resíduos apresentaram-se mais resistentes a absorção de água, diferença de cerca de 17,55%, bem como, apresentaram melhores dados de tensão máxima de ruptura, sendo superior em cerca de 33,8% e 79,9% quando comparados aos resultados dos protótipos de 20 e 30% de resíduos, respectivamente. Estes também apresentam resultados mais expressivos para de elasticidade e tenacidade ($T=1,825\text{MPa}$).

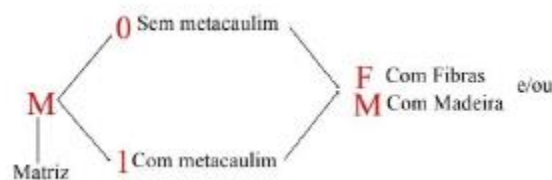
Nos compósitos de 10% de madeira a granulometria mais indicada é de 1,18 mm, devido apresentar resistência superior de 20,3% quando comparada aos compósitos de 4,75 mm.

Logo, como definição do traço será empregado 10% de resíduos de madeira, passantes na peneira de 4,75 mm e retidos na peneira de 1,18 mm.

3.2.3. Produção dos compósitos

Foram produzidos os seguintes compósitos, conforme tabela 14.

Tabela 14 – Nomenclatura dos compósitos



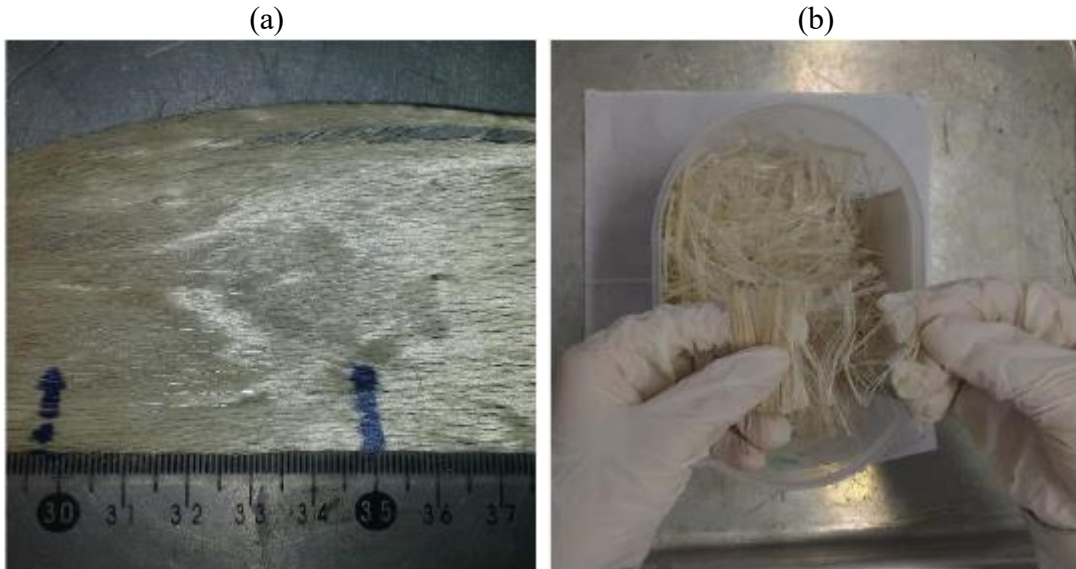
Sigla	Composição
M0	Cimento, areia e água
M0FM	Cimento, areia, água, fibra de malva e madeira
M1FM	Cimento, areia, água, Metacaulinita, fibras de malva e madeira

A produção dos compósitos obedeceu as seguintes etapas:

Passo 1 - A fibra foi cortada em porções de 50 mm e desfibrilada – a Figura 22a mostra

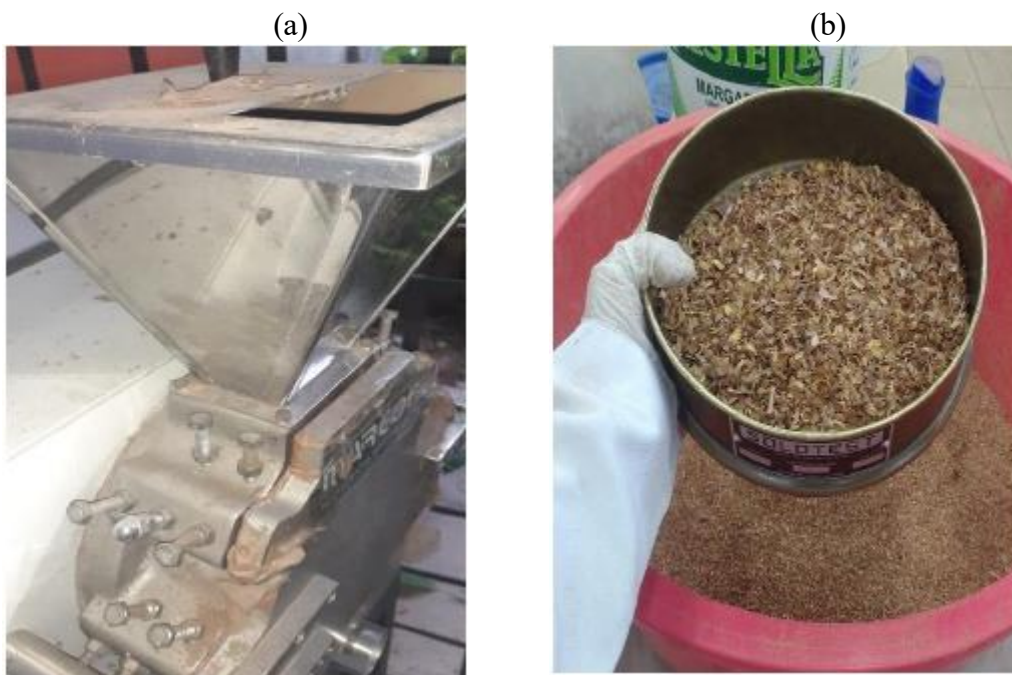
as fibras unidas, a Figura 22b mostra o processo de separação, deixando as fibras soltas e facilitando o processo de mistura e moldagem.

Figura 22 – Processo de tratamento da fibra (a) Fibra Cortada, (b) Fibra desfibrilada



Passo 2 – O resíduo de madeira foi particulado no moinho de facas tipo multiprocessador, marca Marconi do Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da UFAM (Figura 23a) e peneirado para separação da granulometria entre 4,75 mm e 1,18 mm (Figura 23b).

Figura 23 – Processo de tratamento dos resíduos madeireiros (a) Moinho de Facas e (b) Peneiramento dos resíduos



Passo 3 – De acordo com o volume total do painel, os materiais foram secos e separados respeitando o cálculo volumétrico de densidade por massa. Em seguida, misturou-se a areia e o cimento por 2 minutos na batedeira Planetária de 12 Litros Modelo BP 12 S1 marca GASTROMAQ/FIOCHI do LaMAC, UFAM.

Figura 24 – Materiais pesados e separados, equipamento utilizado para mistura



Passo 4 – O aditivo acelerador de pega foi solubilizado em água (Figura 25a) e, posteriormente, misturado com os resíduos de madeira para a ocorrência da hidratação do material (Figura 25b), deixando-as saturadas para receber o cimento. Procedimento dispensado nos CCFV.

Figura 25 – (a) Solubilização do aditivo, (b) Hidratação dos resíduos



Passo 5 – O resíduo de madeira hidratado foi adicionado na batedeira e misturou-se com a areia, cimento e água por 3 a 5 minutos, até consistência pastosa.

Figura 26 – Mistura do resíduo de madeira até consistência pastosa



Passo 6 – Acrescentou-se, lentamente, a mistura a porção de fibras de malva e misturou-se até a completa homogeneização da massa.

Figura 27 – Colocação das fibras no misturador até homogeneização



Passo 7 – Untou-se a forma com óleo desmoldante. Colocou-se porções pequenas de massa homogênea na forma untada, evitando a aglomeração de fibras em uma única região e proporcionando melhor distribuição das fibras na matriz (esse processo funcionou como adensamento). Foi utilizado espátula e colher de pedreiro para garantir a uniformidade na forma.

Figura 28 – Material sendo organizado na forma



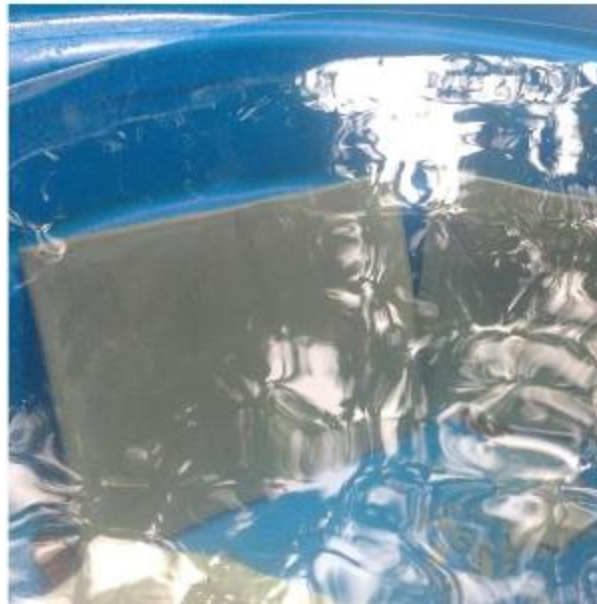
Passo 8 – Fez-se o fechamento da forma através de graxos metálicos para a melhor acomodação das fibras de malva e garantir a espessura do compósito.

Figura 29 – Fechamento da forma de acrílico com graxos metálicos



Passo 9 – Deixou-se as formas em descanso por 24 horas e desenformou o compósito nomeando-o e submergindo em água para cura de 34 ± 4 dias.

Figura 30 – Material em cura submerso em água



Passo 10 – Os compósitos foram cortados para atender as especificações dos ensaios, através de uma máquina de corte de mesa, com disco de corte cerâmico. Foi seguido o esquadro nesta etapa, evitando desperdício de material.

Figura 31 – Processo de corte das amostras



Passo 11 - As amostras foram envolvidas no filme pvc, para garantir sua umidade e para proteger sua integridade física, durante o tempo de repouso ocasionado pela suspensão das atividades acadêmicas, diante da pandemia do COVID-19.

Figura 32 – amostras embaladas e guardadas



3.2.4. Caracterização dos compósitos

3.2.4.1. Caracterização mecânica de Flexão em 4 pontos

Foi utilizado o equipamento modelo AME-5kN marca Owvaldo Filizola, com célula de carga de 500 kN (figura 33).

Figura 33 – Equipamento modelo AME-5kN marca Owvaldo Filizola, para ensaio de Flexão

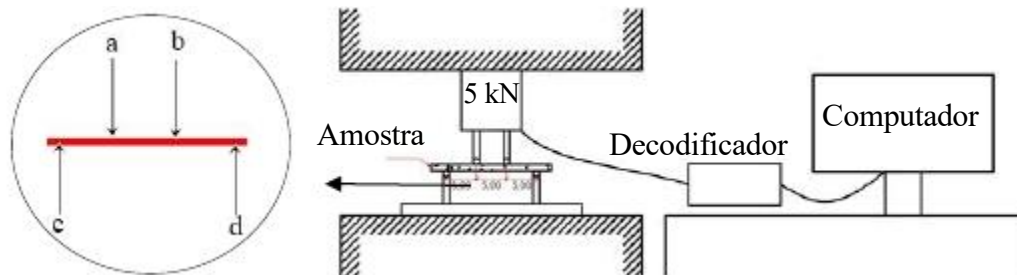


O objetivo desse ensaio é verificar se o material lignocelulósico apresentou função de reforço na matriz, principalmente nas propriedades do pós-fissuração das amostras, dentre elas

a tensão e deflexão máxima de ruptura, os módulos de ruptura e tenacidade.

Na figura 34 ilustra a configuração do ensaio de flexão em 4 pontos, que consiste na aplicação de uma carga crescente distribuída nos pontos *a* e *b* sobre o material, e uma reação através dos pontos *c* e *d*. É monitorado a deformação ocasionada pela carga aplicada.

Figura 34 – Configuração do ensaio de flexão em 4 pontos



Este ensaio foi realizado conforme NBR 15498 (ABNT, 2016) e NBR 12142 (ABNT, 2010c). As placas foram cortadas em retângulos de 50 mm x 200 mm x 10 mm, o espaçamento entre os apoios foi de 180 mm e a velocidade padronizada de 5 N/mim. Foram produzidas 5 amostras de cada modelo para execução do ensaio, as dimensões são especificadas na figura 34, as amostras foram pintadas com tinta acrílica branca para melhor visualização das fissuras.

O gráfico resultante do ensaio é expresso em força (N) versus deformação (mm), para determinação das tensões será empregado à equação 3.4, e para determinação da tenacidade será empregado à equação 3.5.

$$\sigma = \frac{3PL}{bh^2} \quad \text{Equação 3.4}$$

$$T = \frac{A}{bh} \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

σ = tensão de tração na flexão;

P = carga aplicada na flexão;

L = distância entre os apoios;

h = espessura da amostra;

b = largura da amostra;

T = energia absorvida;

A = área do gráfico.

3.2.4.2. Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade é um processo que visa determinar a porcentagem que um corpo sólido tende a ser preenchido por poros permeáveis, geralmente devido à penetração de água em seu estado seco. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009b) e NBR 15498 (ABNT, 2016).

Foram produzidas 10 amostras de cada tipo, para cada ensaio, com dimensões de 50 mm x 50 mm. Os corpos de prova foram secos em estufa 100 ± 5 °C por 24 horas e, posteriormente, submersos em água por um período de 72 horas, conforme figura 35.

Figura 35 – Amostras em processo de saturação



3.2.4.3 Massa específica

A massa específica (densidade aparente) é dada pela equação, de acordo com a NBR 15498 (ABNT, 2016):

$$\rho = \frac{mf}{v}$$

Onde:

ρ é a densidade aparente, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);

mf é a massa do corpo de prova após secagem, expressa em gramas (g);

v é o volume do corpo de prova, expresso em centímetros cúbicos (cm³).

3.2.4.4 Comportamento sob a ação do fogo

É atribuído características de resistência ao fogo para os compósitos cimentícios (QUIROGA; MARZOCCHI; RINTOUL, 2016). Porém, não há uma norma científica brasileira que especifique os parâmetros dos ensaios envolvendo esses compósitos. No comércio, algumas empresas executam testes com metodologias próprias. Esse ensaio foi baseado nos métodos da empresa PlacLux¹.

As placas caracterizadas foram as denominadas M1FM devido apresentarem maior presença do material lignocelulósico após envelhecimento natural. As amostras foram secas em estufa a $60 \pm 5^\circ$ para remover qualquer umidade presente por 5 horas, essa medida foi adotada porque os materiais estavam a 236 dias embalados em plástico e armazenados em local fechado. Em intervalos de 30 minutos, as amostras foram retiradas da estufa para controle de umidade, quando a variação da umidade se apresentou inferior a 0,5% em três medidas consecutivas, as amostras foram submetidas ao teste de queima.

Com o auxílio de um maçarico contendo a mistura de gás e oxigênio, as amostras foram submetidas a 40 segundos de queima, conforme referência. Neste ensaio adotou-se o distanciamento de 10 cm entre o maçarico e a amostra, e conseqüentemente a distância de 5 cm entre o fogo e a amostra (Figura 36).

Figura 36 – parâmetros de distanciamento adotados em teste de resistência ao fogo



¹ Empresa que atua no mercado nacional desde 2007 e tem como seu principal produto a Chapa Cimentícia ProFort Next, site: <https://www.placlux.com/>

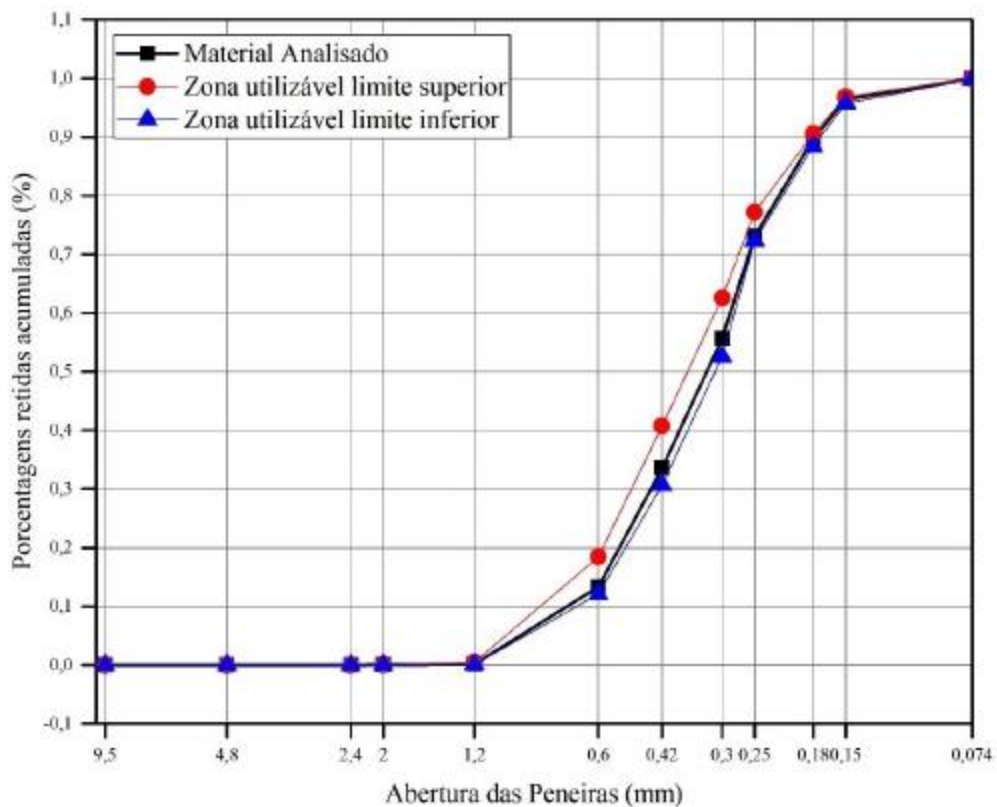
4. Resultados e Discussão

4.1. Caracterização dos materiais

4.1.1. Areia

A figura 37 ilustra a distribuição do tamanho de grãos e na Tabela 15 são apresentadas as propriedades físicas da areia usada neste estudo, classificada como areia média natural quartzosa segundo a NBR 7211.

Figura 37 – Curva granulométrica da areia



Comparando-se a faixa granulométrica do material em estudo com as especificações da norma, observa-se que a mesma se situa em intervalo na faixa ótima de utilização, sendo considerada uma areia natural média (NBR 7211, 2009a). A tabela 15 mostra os resultados técnicos da areia, o módulo de finura para o agregado apresentou índice de $2,15 \pm 0,090$ mm e dimensão máxima característica (DMC) de 1,2 mm. A umidade natural da areia determinada foi de $5,73\% \pm 0,068$, após o procedimento de secagem, a umidade utilizada nos CCM foi $0,14\% \pm 0,035$, esse controle de umidade sobre o agregado miúdo, evita modificações no fator água/cimento da matriz.

Tabela 15 – Caracterização da areia

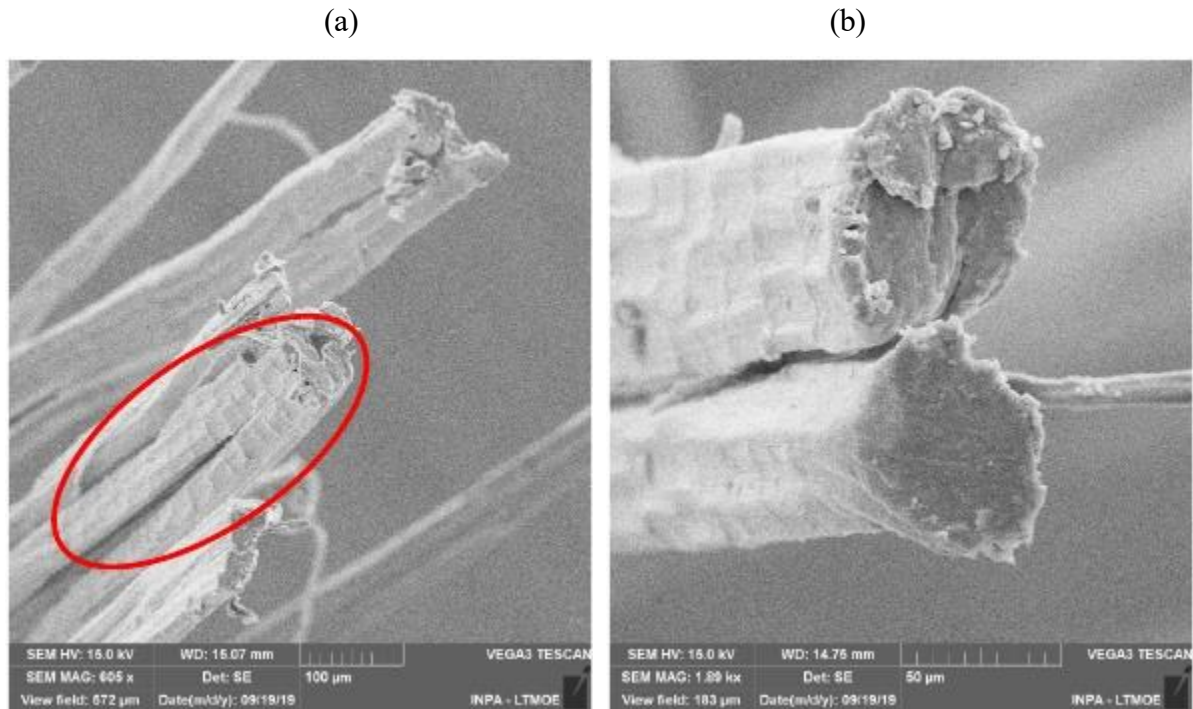
Módulo de Finura	2,15 mm \pm 0,09
Dimensão máx. característica	1,2 mm
Umidade Seco	0,14 % \pm 0,035
Umidade Natural	5,73 % \pm 0,068
Densidade específica	2,6 \pm 0,45 g/cm ³
Teor de Material Pulverulento	1,9 % \pm 0,23

Atenta-se que a quantidade de 2% em material pulverulento atribuído ao agregado baixa concentração por argila na composição, conferindo o uso de material arenoso legítimo e a baixa umidade em estado seco, não influenciando a relação água/cimento do compósito (AGUIAR, 2016; TOLÊDO; FARIAS, 2021).

4.1.2. Fibras de Malva

A Figura 38 mostra uma ampliação da estrutura das fibras de malva obtidas a partir da análise de MEV que ilustra formas angulares e sub-angulares com uma superfície rugosa organizada linearmente durante o comprimento longitudinal fibra. Conforme a figura 38a, observa-se como as fibras de malva se acomodam em grupos, enquanto que a figura 38b exibe, com nitidez, a superfície delinear da amostra, essas pequenas elevações na haste da fibra. ALIREZAZADEH *et al.*, (2018) sugere que superfícies delineares pode aumentar a força de atrito entre os materiais compósitos. Os ensaios de densidade da fibra apresentaram média de $1,271 \pm 0,04$ g/cm³ para as amostras utilizadas na pesquisa.

Figura 38 – Análise de MEV das fibras de Malva



4.1.3. Resíduos de Madeira

A tabela 16 mostra a composição química do resíduo de madeira utilizado nesta pesquisa. Observa-se que na composição do material utilizado nesta pesquisa, teores expressivos de Lignina, isto atribuem aos resíduos maior resistência estrutural e química (PÉREZ *et al.*, 2002), características importante quando o material é adicionado ao ambiente alcalino da matriz cimentícia. Da mesma forma, a concentração de polissacarídeos ($\cong 59\%$) é considerável, este fato prejudica o processo de cura do cimento, por conta disso, é recomendável a utilização máxima do aditivo acelerador de pega.

Tabela 16 – Composição química da madeira

Extrativos	Cinzas	Celulose	Hemiceluloses	Lignina
3,71 ± 0,08	1,00 ± 0,11	40,95 ± 1,58	18,39 ± 4,62	40,64 ± 3,04

O resíduo apresentou concentração padrão de material orgânico (extrativos), podendo ser atribuído a madeira de primeira utilização, com quantidade estável de óleos e resinas, que não interfere na agregação de fibra e matriz (KWON *et al.*, 2021; PEREIRA; CARNEIRO, 2013;).

Conforme apresentado na tabela 16, há uma concentração relevante de resíduos inorgânicos (cinzas), esse material residual quando em processo de decomposição ocasiona

formação de gases como carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e enxofre (RAO; XIANG, 2009), sendo prejudicial ao meio ambiente. Em virtude desse resultado, é amplíavel evitar a reutilização desse material cujo no beneficiamento aconteça o processo de queima.

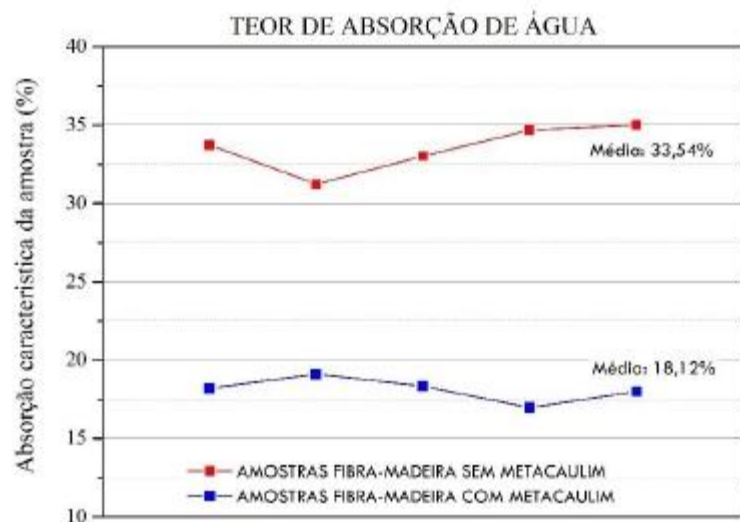
A massa específica dos resíduos de madeira utilizados, considerando a média, é de $0,80 \pm 0,06 \text{ g/cm}^3$.

4.2 Caracterização dos Compósitos

4.2.1. Permeabilidade

Os resultados obtidos neste ensaio são apresentados no gráfico da figura 39.

Figura 39 – Gráfico do teor de permeabilidade



Para a absorção de água os compósitos com Metacaulinita mostraram-se mais favoráveis quando comparada aos compósitos sem Metacaulinita, como esperado. Dado que, as propriedades químicas da Metacaulinita mantiveram a integridade do compósito, não degradando inteiramente a parte lignocelulósica do compósito, e minimizando o desenvolvimento de vazios, provavelmente ocasionados pela degradação das fibras, que facilita a permeabilidade da água.

Os compósitos M1FM apresentaram média de absorção de água de $18,12\% \pm 4,25\%$, enquanto, os compósitos M0FM apresentaram-se superiores em $15,39\%$, com a média de $33,54\% \pm 4,49\%$.

Lima & Iwakiri (2014) em testes de compósito cimentício com adição de resíduos madeiros substituiu teores entre 20 e 100% do agregado miúdo. Nesses testes houve significativa influência dos resíduos no aumento da absorção de água, quanto mais resíduos adicionados, maior a absorção de água. Da mesma forma, Ribeiro & Vasconcelos (2018) produziu compósitos com substituição de agregado miúdo por 2,5%; 5%; e 7,5%, os compósitos com maior adição apresentaram maior taxa de absorção ($15,94 \pm 4,54$).

4.2.2. Massa específica

A Tabela 17 apresenta os resultados para massa específica dos compósitos. Não houve diferença entre os compósitos M0FM e M1FM, assim sendo, a adição do Metacaulinita não interferiu no peso do material. Quando comparado as amostras isentas de material lignocelulósicos (M0) observa-se que uma diferença de 8,05%, sendo a amostra com material lignocelulósica com menor densidade.

Tabela 17 - Massa específica dos CCM produzidos

Massa	M0	M0FM	M1FM
Específica (g/cm ³)	$1,74 \pm 0,081$	$1,59 \pm 0,172$	$1,60 \pm 0,139$

4.2.3. Caracterização mecânica de Flexão em 4 pontos

As curvas tensão X deflexão das figuras 40 e 41 foram separadas por regiões (MELO FILHO; SILVA; TOLEDO FILHO, 2013; OLIVEIRA, 2013). A região I correspondente ao trecho de limite elástico (σ_e) e é nesta região que se obtêm a primeira tensão de fissura (σ_{1f}) e a primeira deflexão de fissura (d_{1f}). A região II é caracterizada pela formação de múltiplas fissuras. Nessa região observam-se os valores de tensão máxima (σ). A região III apresenta a abertura progressiva das fissuras, com os valores de tensão última de ruptura (σ_u) e a sua deformação correspondente (ϵ_u). A região II é caracterizada pela máxima tensão pós-trinca e termina quando a capacidade de suporte do compósito (σ_u) e a última deflexão da trinca (f_u) são atingidas. A partir deste ponto inicia-se a região IV, caracterizada pelo rompimento do compósito

Figura 40 – Gráfico tensão X deflexão: amostras M1FM

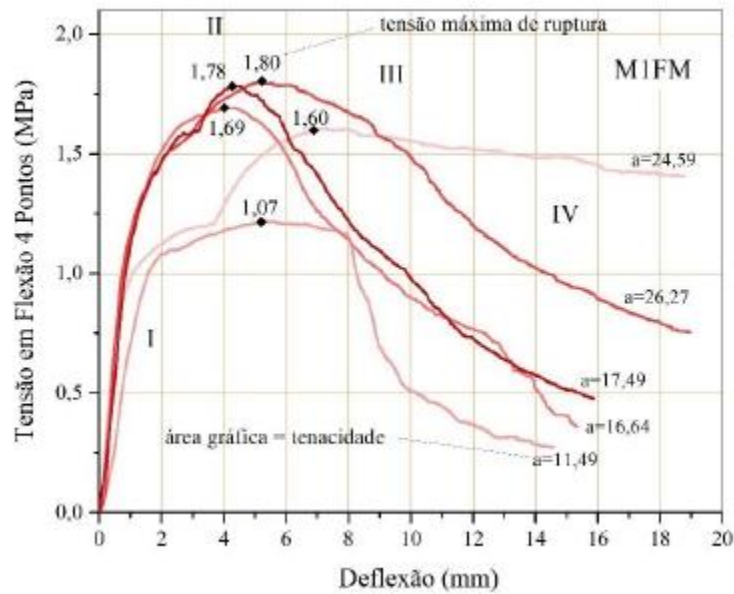
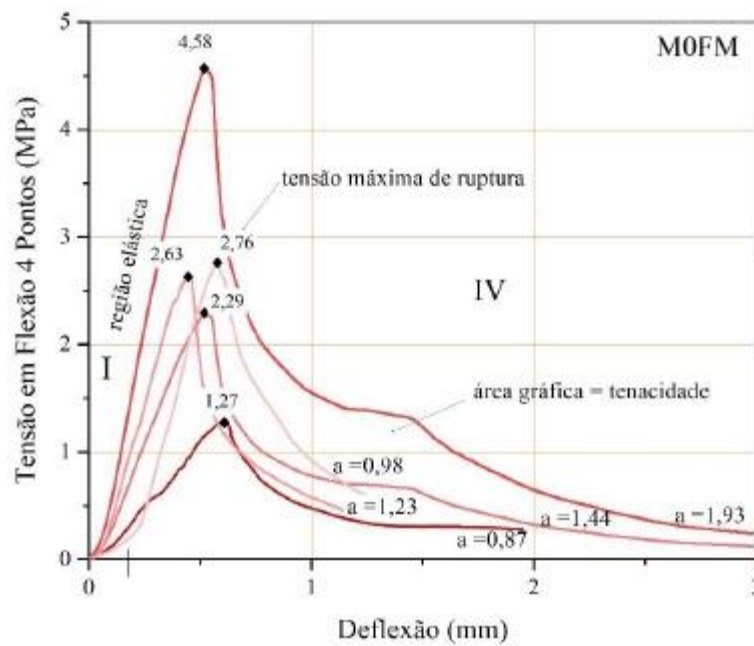


Figura 41 – Gráfico tensão X deflexão: amostras M0FM



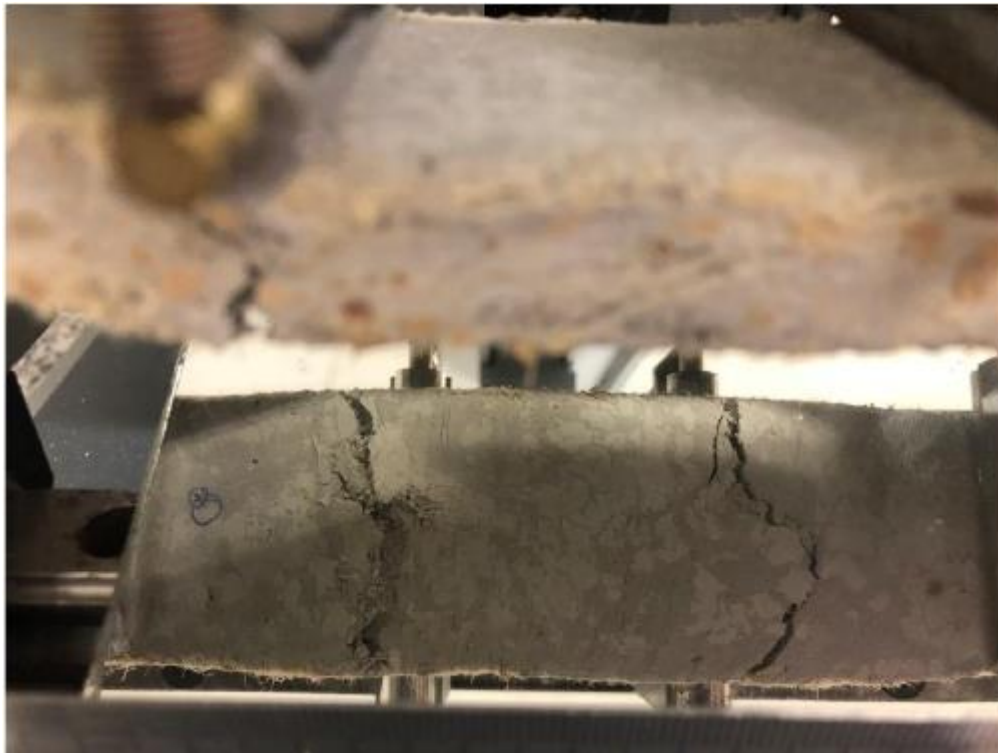
Na região I nota-se que não há variação nos resultados entre as amostras com e sem tratamento, considerando os desvios-padrão.

Na região II, a σ_u da amostra com tratamento apresentou um valor superior de aproximadamente 39,86%, considerando a média obtida. Isso possivelmente se deve ao tratamento realizado com 40% de Metacaulinita, que manteve as fibras parcialmente conservadas após período de envelhecimento natural de 236 dias (ocasionado pela paralização das atividades acadêmicas da UFAM em virtude do coronavírus). As amostras sem tratamento

não apresentaram região II, provavelmente devido a degradação do material lignocelulósicos ocasionada pela hidratação do cimento (SABIR; WILD; BAI, 2001; WEI; MA; THOMAS, 2016).

A Figura 42 mostra imagens das amostras após o teste de flexão. Observa-se a presença de microfissuras visíveis nos corpos de prova enquanto a carga era exercida pelo equipamento.

Figura 42 – amostras após MIFM após ensaio de flexão



A tabelas 18 mostra o resultado do comportamento das amostras para o ensaio de tensão X deflexão, considerando a média amostral. As amostras com Metacaulinita apresentaram maiores deflexões com menores tensões (conforme tabela 18), portanto a resistência à tenacidade, que é a dificuldade de romper a amostra, ocorreu de forma mais expressiva que quando comparada as amostras sem tratamento.

Tabela 18 – Resultado tensão máxima e tenacidade

	Tensão máxima de ruptura	Tenacidade em 3 mm de deflexão
M0FM	$2,71 \pm 0,443$	$1,290 \pm 0,324$

M1FM	$1,590 \pm 0,192$	$19,298 \pm 0,315$
-------------	-------------------	--------------------

A figura 43 exibe uma amostra sem tratamento, após o ensaio de flexão, observa-se que as fibras apresentam uma característica envelhecida, provavelmente ocasionada pela desagregação do material (TOLEDO FILHO *et al.*, 2009; WEI; ZHOU; TOMITA, 2000). A degradação da fibra, possivelmente, ocasionou a propagação de vazios no compósito, acarretando na redução da resistência mecânica dessa estrutura e a vida útil quando utilizada como elemento na construção civil, por isso, a inexistência da zona II, onde deviriam ocorrer as fissurações da amostra (SAVASTANO *et al.*, 2009)

Figura 43 – Amostras M0FM após tempo de inércia e ensaio de flexão X deflexão



A figura 44 exibe uma amostra com tratamento, após rompimento do ensaio de tensão X deflexão. Observa-se uma presença maior do material lignocelulósico, quando comparada as amostras M0FM, provavelmente devido a eficiência do tratamento com Metacaulinita.

Figura 44 – amostra com tratamento após rompimento



4.2.4. Teste de resistência ao fogo

A figura 45 representa o estado físico das amostras após 40 minutos de incineração. Conforme observado não houve alastramento da chama na região de incineração, com abertura de raio da chama $5,93 \pm 0,04$ cm e sem proliferação da chama para a parte traseira da amostra.

Figura 45 – Amostra após 40 minutos de incineração



Diante desse comportamento submeteu-se a amostra ao tempo de 140 minutos (totalizando o tempo de 3 minutos de incidência ao fogo). As amostras apresentaram maior propagação da chama na região de incineração, mantendo a abertura de raio da chama, com média de $6,01 \pm 0,07$ cm (figura 46), da mesma forma, não houve alastramento da chama para a parte traseira do ponto de incineração da amostra (figura 47).

Figura 46 – Amostra após 140 minutos de incineração



Figura 47 – Parte traseira do ponto de incineração da amostra após 140 minutos



Após a finalização do tempo de incineração, algumas amostras apresentaram chamas internas (figura 48). As chamas eram aparentes na amostra, por meio da abertura de fissura, observa-se a retenção do fogo acontecendo na parte interna da amostra. Devido a facilidade de combustão do material orgânico (CHENG *et al.*, 2021; DEROSA; LITTON, 1992) no processo de queima do compósito como um todo, houve a queima do material lignocelulósico. Com a queima das fibras e a desidratação da amostra cerâmica observa-se a abertura de fissuras em torno da região de incineração (figura 49), deixando a amostra enfraquecida (MIRANDA; MIRANDA, 2001; PEREIRA; BATISTA, 2021)

Figura 48 – visualização da queima do material lignocelulósico da amostra

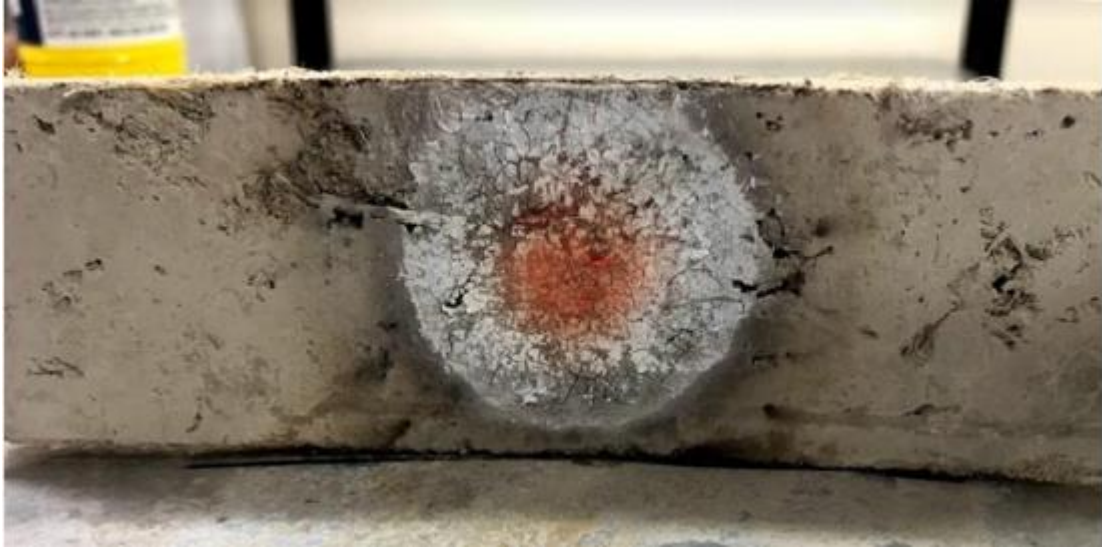


Figura 49 – Demonstração das microfissuras aparentes da amostra pós ensaio



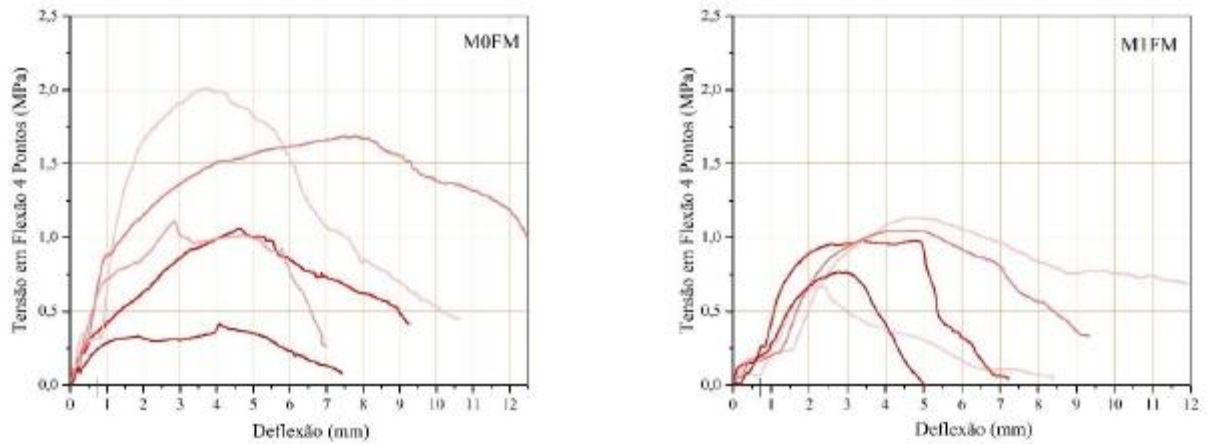
A placa não exibiu danos maiores e a não propagação ao fogo é um parâmetro de resistência (JOO; DUNCAN; CICCARELLI, 2006; ZHANG *et al.*, 2011)

4.2.5. Tensão em Flexão de 4 pontos amostras após teste de queima

Com as amostras oriundas do teste de resistência ao fogo, foi realizado o ensaio de flexão

em 4 pontos. Os resultados são apresentados na figura 50.

Figura 50 – Gráfico tensão X deflexão amostras M0FM e M1FM após queima



A proposta desses resultados é uma comparação com as amostras ílesas ao processo de queima e verificar dos danos ocasionados na resistência do compósito a deflexão. A tabela 19 mostra um comparativo entre as amostras, ressalta-se esse ensaio aconteceu em comparação com as amostras com Metacaulinita.

Tabela 19 – Comparação resultados ensaio de tensão em amostras antes e posteriores a queima

	Tensão máxima de ruptura	Tenacidade em 3 mm de deflexão
Pré queima	1,590 ± 0,192	19,298 ± 0,315
Pós Queima	1,256 ± 0,489	4,973 ± 0,592

O percentual de perda da tensão máxima de ruptura não foi significativo, conforme indicado na tabela 18, a amostra M1FM no pré queima apresenta média de σ_t de $1,590 \pm 0,192$ MPa, enquanto que a amostra no pós queima, apresenta, σ_t de $1,256 \pm 0,489$ MPa, considerando o coeficiente de variação, as amostras apresentam resultados similares. Contudo, seu comportamento após o início da fissuração, a energia total absorvida quando o mesmo se encontra fissurado teve uma diferença de 74,23 % beneficiando a amostra no pré queima. A

tenacidade é uma das principais vantagens no uso de fibras em painéis cimentícios. (AGOPYAN *et al.*, 2005), com a queima do material lignocelulósico houve a perda dessa capacidade do material de resistência quando fissurado, o que sugere que a incidência ao fogo não ocasiona propagação, porém interfere na resistência do compósito.

5 - Conclusões

Os compósitos M1FM apresentaram menor permeabilidade que os compósitos M0FM, cerca de 15,39% mais permeáveis, indicando a eficiência do tratamento da matriz com Metacaulinita, provavelmente devido o tratamento manter a integridade das fibras no meio alcalino após o envelhecimento natural de 236 dias.

A massa específica dos compósitos sem material lignocelulósico é 8% mais densa que a massa específica dos compósitos M1FM e M0FM, porém, a diferença não é significativa.

O ensaio de flexão em 4 pontos nas amostras M1FM e M0FM, constata-se que não foi observado diferença significativa para tensão máxima de ruptura ($1,590 \pm 0,192$ MPa e $2,020 \pm 0,378$ MPa respectivamente) porém observou-se que a tenacidade maior em amostras com Metacaulinita ($19,298 \pm 0,315$ MPa, sem MK $1,290 \pm 0,324$ MPa).

Após as amostras M1FM e M0FM serem submetidas ao fogo, observou-se a resistência a propagação de chamas, o desgaste do material lignocelulósico e propagação de fissuras, ocasionando uma perda de 74,23% na capacidade do material de resistência quando fissurado.

Assim, pode-se concluir, que no final desta pesquisa, desenvolveu-se um compósito promissor produzido com o traço 1:1:0,6, com 4% de fibras de malva e 10% de resíduos de madeira, 40% de Metacaulinita industrial, que mesmo após o tempo de repouso, apresentou resistência mecânicas observadas em ensaios de flexão em quatro pontos, para sua aplicabilidade na construção secas, uso em forro, divisórias, pisos e etc.

6 – Trabalhos Futuros

O compósito híbrido com a união de fibras vegetais e resíduos de madeira possui uma possibilidade grandiosa de exploração científica, tais como:

1. Estudar a possibilidade de outros tratamentos pozolânicos para diminuir a alcalinidade do compósito cimentício, uma alternativa é a Metacaulinita amazônico, pode ser feito um comparativo da quantidade de resíduo pozolânico do material, as reações químicas quando adicionados a matriz e a quantidades que eliminariam o hidróxido de cálcio da mistura de forma mais instantânea.
2. Verificar a interface entre material vegetal e a matriz por meio de análises microscópicas antes e após o envelhecimento, que também pode ser estudado de uma forma acelerada, conforme abrangente na NBR 15498 (ABNT, 2016).
3. Submeter esses compósitos a ensaios de compressão e tração. O primeiro para verificar a interferência do material lignocelulósico em uma propriedade física do concreto consolidada como resistente. A tração direta para complementar a verificação do comportamento da fibra.
4. Estudar os materiais presentes nesse compósito isoladamente, realizando ensaios de Florescência de Raio X, constituintes químicos da fibra, granulometria a laser, queima e etc.
5. Avaliar o desempenho acústico e térmico, visando o seu uso na construção civil.

REFERÊNCIAS

ABDEL RAHMAN, A. et al. Characteristics of Portland blast-furnace slag cement containing cement kiln dust and active silica. *Arabian Journal of Chemistry*, v. 9, p. S138–S143, 1 set. 2016.

ABNT, A. B. DE N. T.-. **NBR 7211/2009 - Agregados para concreto – Especificação**. [s.l: s.n.].

ABNT, A. B. DE N. T.-. **NBR 7989/2010 - Pasta celulósica e madeira — Determinação de lignina insolúvel em ácido** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010a.

ABNT, A. B. DE N. T. **NBR 9778/2009 - Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009b.

ABNT, A. B. DE N. T. **NBR 14853/2010 - Madeira — Determinação do material solúvel em etanol-tolueno, em diclorometano e em acetona** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010b.

ABNT, A. B. DE N. T. **NBR 12142/2010 - Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010c.

ABNT, A. B. DE N. T. **NBR 14032 - Pastas celulósicas — Determinação de alfa, beta e gama celuloses** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015a.

ABNT, A. B. DE N. T. **NBR 5738 - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto** 2015, 2015b.

ABNT, N. 10004. **Resíduos sólidos – Classificação** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ABNT, N. 15498. **Placa de fibrocimento sem amianto — Requisitos e métodos de ensaio** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

ABNT, N. 15894-1. **Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010d.

ABNT, N. 15894-2. **Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 2: Determinação do índice de desempenho com cimento aos sete dias** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010e.

ABNT, N. 15894-3. **Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, v. 1, p. 3, 2010f.

ABNT, N. 16697. **Cimento Portland — Requisitos Cimento Portland – Requisitos. Norma Brasileira**, 2018.

ABNT, N. N. 248. **Agregados - Determinação da composição granulométrica Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2003.

ABRELPE, A. B. DE E. DE L. P. E R. E. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/>>. Acesso em: 4 mar. 2020.

ADESINA, A. **Performance of cementitious composites reinforced with chopped basalt fibres – An overview Construction and Building Materials Elsevier Ltd**, , 10 jan. 2021.

AGOPYAN, V. et al. **Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: An overview**. *Cement and Concrete Composites. Anais...Elsevier*, 1 maio 2005

AGUIAR, A. S. DE. Estudos das propriedades físicas e mecânicas de placas cimentícias reforçadas com fibras longas de malva. **Dissertação (mestrado) UFAM - Raimundo Pereira de Vasconcelos**, 23 jun. 2016.

AHMAD, W.; KHAN, M.; SMARZEWSKI, P. Effect of Short Fiber Reinforcements on Fracture Performance of Cement-Based Materials: A Systematic Review Approach Use of coconut fiber in high strength concrete for improving ductility View project Effect of Short Fiber Reinforcements on Fracture Performance of Cement-Based Materials: A Systematic Review Approach. **Materials**, v. 14, p. 1745, 2021.

AKINWANDE, A. A. et al. Assessment of alkaline treatment of palm kernel fiber and curing duration on selected properties of cement-paper composite boards. **Cogent Engineering**, v. 8, n. 1, 2021.

AL RIM, K. et al. Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 21, n. 4, p. 269–276, 1 ago. 1999.

ALIBABA. **Factory Supplier Newest Simple Design Fiber Cement Board 18mm**. Disponível em: <https://www.alibaba.com/product-detail/Factory-supplier-newest-simple-design-fiber_60306857418.html>. Acesso em: 1 maio. 2020.

ALIREZAZADEH, A. et al. Fiber-on-fiber friction measurement using hanging fiber method. **The Journal of The Textile Institute**, v. 109, n. 5, p. 636–646, 4 maio 2018.

ALTWAIR, N. M.; KABIR, S. **A Comparative Study on the Effect of Cement Source on Engineering Properties of Concrete**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/305929635_A_Comparative_Study_on_the_Effect_of_Cement_Source_on_Engineering_Properties_of_Concrete>. Acesso em: 7 jun. 2021.

AMARAL, A. P. Com o peito cheio de pó: uma etnografia sobre a negação do adoecimento de trabalhadores do amianto na cidade de Minaçu (GO). **Tese de Doutorado UFG, Mônica Thereza Soares Pechincha**, 2019.

ARANTES, V. et al. Lignocellulosic polysaccharides and lignin degradation by wood decay fungi: The relevance of nonenzymatic Fenton-based reactions. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 38, n. 4, p. 541–555, 14 abr. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7190/1997 - Projeto de estruturas de madeira. **Book**, p. 107, 1997.

ASTM D3878. **Standard terminology of high - modulus reinforcing fibers and their composites**, 1995.

AZAMBUJA, R. et al. Particle size and lime addition on properties of wood-cement composites produced by the method of densification by vibro compaction. **Ciência Rural**, v. 47, n. 7, 2017.

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

BARBOSA DA SILVA JUNIOR, I.; MARIA SILVA DE SOUZA, L.; DE ANDRADE SILVA, F. Creep of pre-cracked sisal fiber reinforced cement based composites. **Construction and Building Materials**, v. 293, p. 123511, 26 jul. 2021.

BERNARDES, M.; MARIA S. B. DE BARROS, M. The contribution of the pedestal paving system to building maintainability. **Proceedings: CIB W070 2010**, 2010.

BLEDZKI, A. K.; REIHMANE, S.; GASSAN, J. Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 59, p. 1329–1336, 1996.

CALLISTER JR.; WILLIAM D. **CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS: UMA INTRODUÇÃO**. 5. ed. [s.l: s.n.].

CARVALHO, L. H. et al. Moisture Transport Process in Vegetable Fiber Composites: Theory and Analysis for Technological Applications. In: **Advanced Structured Materials**. [s.l.] Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2013. v. 36p. 37–62.

CASTLEMAN, B. I.; BERGER, S. L. Asbestos: Medical and Legal Aspects. In: PUBLISHERS, A. (Ed.). **Aspen Publishers**. Aspen Publ ed. [s.l: s.n.].

CAVALCANTE, D. G. et al. Influence of the levels of replacement of portland cement by metakaolin and silica extracted from rice husk ash in the physical and mechanical characteristics of cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 94, p. 296–306, 1 nov. 2018.

CHEN, M.; ZHONG, H.; ZHANG, M. Flexural fatigue behaviour of recycled tyre polymer fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 105, p. 103441, 1 jan. 2020.

CHENG, J. et al. The effect of pyrolysis temperature on the characteristics of biochar, pyrolygneous acids, and gas prepared from cotton stalk through a polygeneration process.

Industrial Crops and Products, v. 170, p. 113690, 15 out. 2021.

CHINDAPRASIRT, P. et al. Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 6, p. 1356–1361, 1 jun. 2007.

CONSUFOR. **Rendimento na Conversão de Tora em Madeira Serrada: Simulações em Função do Diâmetro de Corte**. Disponível em: <<https://consufor.com/rendimento-na-conersao-de-tora-em-madeira-serrada-simulacoes-em-funcao-do-diametro-de-corte/>>. Acesso em: 2 maio. 2020.

DEROSA, M. I.; LITTON, C. D. **Predicting materials' ease of combustion**, 1 jan. 1992.

DRENALTEC. **Fábrica De Placa Cimentícia**. Disponível em: <<https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/instrumentacao/drenaltec/produtos/construcao/fabrica-de-placa-cimenticia>>. Acesso em: 1 maio. 2020.

EDWARDS, D. C. **Polymer-filler interactions in rubber reinforcement** *Journal of Materials Science* Kluwer Academic Publishers, , out. 1990. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/BF00581070>>. Acesso em: 7 jun. 2021

EPA, U. S. E. P. A. Wood: Material-Specific Data. 2021.

FERNANDA, D. . **PAREDES DE PLACA CIMENTÍCIA AO INVÉS DE TIJOLOS**. Disponível em: <<https://dicasdearquitetura.com.br/paredes-de-placa-cimenticia-ao-inves-de-tijolos/>>. Acesso em: 1 maio. 2020.

FONSECA, C. S. et al. Jute fibers and micro/nanofibrils as reinforcement in extruded fiber-cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 517–527, 30 jun. 2019.

FRESH INTERNATIONAL. **Global Top 3 Wood Products Company | Fresh**. Disponível em: <<https://www.freshinternational.com/global-top-3-wood-products-company>>. Acesso em: 1 maio. 2020.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 8, p. 1675–1683, 1 ago. 2008.

GARCEZ, M. R. et al. Cement-Wood Composites: Effects of Wood Species, Particle Treatments and Mix Proportion. **International Journal of Composite Materials**, v. 6, n. 1, p. 1–8, 1 fev. 2016.

GARSIDE, M. **Cement production in the United States and worldwide from 2010 to 2020**. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/219343/cement-production-worldwide/>>. Acesso em: 20 jun. 2021.

GINDL, W.; GUPTA, H. S.; GRÜNWARD, C. Lignification of spruce tracheid secondary cell walls related to longitudinal hardness and modulus of elasticity using nano-indentation. <https://doi.org/10.1139/b02-091>, v. 80, n. 10, p. 1029–1033, 2002.

GUO, Q. et al. Performance of long Canadian natural fibers as reinforcements in polymers.

Journal of Reinforced Plastics and Composites, v. 29, n. 21, p. 3197–3207, 9 nov. 2010.

HASAN, K. M. F.; HORVÁTH, P. G.; ALPÁR, T. Development of lignocellulosic fiber reinforced cement composite panels using semi-dry technology. **Cellulose**, v. 28, n. 6, p. 3631–3645, 1 abr. 2021.

HE, Z. et al. Research progress on recycled clay brick waste as an alternative to cement for sustainable construction materials. **Construction and Building Materials**, v. 274, p. 122113, 8 mar. 2021.

HELENE, P. **Estudo da influência do MetacaulimHP como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland**. São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <www.poli.usp.br>. Acesso em: 4 mar. 2020.

HÖGLMEIER, K.; WEBER-BLASCHKE, G.; RICHTER, K. Potentials for cascading of recovered wood from building deconstruction - A case study for south-east Germany. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 78, p. 81–91, 1 set. 2013.

HOMMA, A. K. O. A civilização da juta na Amazônia - expansão e declínio. - Portal Embrapa. **Embrapa Amazônia Oriental**, p. 509–525, 1995.

HOSSAIN, M. U. et al. Environmental and technical feasibility study of upcycling wood waste into cement-bonded particleboard. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 474–480, 10 jun. 2018.

INCE, C.; TAYANÇLI, S.; DEROGAR, S. Recycling waste wood in cement mortars towards the regeneration of sustainable environment. **Construction and Building Materials**, v. 299, p. 123891, 13 set. 2021.

JOHN, M. J.; ANANDJIWALA, R. D. Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites. **Polymer Composites**, v. 29, n. 2, p. 187–207, fev. 2008.

JONES, R. M. **Mechanics of composite materials**. CRC press, 2014.

JOO, H. I.; DUNCAN, K.; CICCARELLI, G. **Flame-quenching performance of ceramic foam**. Combustion Science and Technology. **Anais...** Taylor & Francis Group, 1 dez. 2006 Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00102200600788692>>. Acesso em: 4 jun. 2021

JR, H. S. et al. Effect of carbonation on blast furnace slag based cement reinforced with cellulose fibre. **Proceedings of the International Conference on Composites in Construction**, v. CCC2001 Li, p. 299- 302., 2001.

KAPLAN, G.; SALEM ELMEKHAL, M. A. Microstructure and durability properties of lightweight and high-performance sustainable cement-based composites with rice husk ash. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1–27, 21 maio 2021.

KARADE, S. R. **Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes** **Construction and Building Materials** Elsevier, , 1 ago. 2010.

KAVITHA, O. R. et al. Microstructural studies on eco-friendly and durable Self-compacting concrete blended with metakaolin. **Applied Clay Science**, v. 124–125, p. 143–149, 1 maio 2016.

KLOCK, U. et al. QUÍMICA DA MADEIRA. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**, v. 1, p. 86, 2005.

KORONEOS, C.; ROUMBAS, G.; MOUSSIOPOULOS, N. Exergy analysis of cement production. **Int. J. Exergy**, v. 2, n. 1, p. 55, 2005.

KOSTUCH, J. .; WALTERS, G. .; JONES, T. . High performance concretes incorporating metakaolin: a review. **Concrete**, v. 2, n. 1993, p. 1799–811, 2000.

KUTANAELI, S. S.; CHOBBASTI, A. J. Triaxial behavior of fiber-reinforced cemented sand. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 30, n. 6, p. 579–593, 18 mar. 2016.

KWON, S. et al. Effect of lignocellulosic fiber composition on the aquatic biodegradation of wood pulps and the isolated cellulose, hemicellulose and lignin components: kinetic modelling of the biodegradation process. **Cellulose**, v. 28, n. 5, p. 2863–2877, 1 mar. 2021.

LALANDE, J.-M.; TREMBLAY, A. **Process and a plant for the production of Portland cement clinker**, 12 abr. 2005. Disponível em: <www.portcement.org/in>. Acesso em: 3 mar. 2020

LEÃO, M. A. **Fibras de Lucuri: um reforço alternativo de compósitos poliméricos**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

LERCH, J. O. et al. The effect of mixing on the performance of macro synthetic fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 103, p. 130–139, 1 jan. 2018.

LI, J.; YUAN, H.; YANG, J. Bacteria and lignin degradation. **Frontiers of Biology in China**, v. 4, n. 1, p. 29–38, 5 mar. 2009.

LIMA, P. R. L. **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ, 2004.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D. Uso de metacaulinita para incremento da durabilidade de compósitos à base de cimento reforçados com fibras de sisal . **Ambiente Construído**, v. 8, n. 4, p. 7–19, 2008a.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D. Uso de metacaulinita para incremento da durabilidade de compósitos à base de cimento reforçados com fibras de sisal. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 4, p. 7–19, 2008b.

LO, F. C.; LEE, M. G.; LO, S. L. Effect of coal ash and rice husk ash partial replacement in ordinary Portland cement on pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 286, p. 122947, 7 jun. 2021.

LOTHENBACH, B. et al. Influence of limestone on the hydration of Portland cements. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 6, p. 848–860, 1 jun. 2008.

MARIETA, C.; GUERRERO, A.; LEON, I. Municipal solid waste incineration fly ash to produce eco-friendly binders for sustainable building construction. **Waste Management**, v. 120, p. 114–124, 1 fev. 2021.

MARÍNGOLO, V. **Clínquer Coprocessado: Produto de Tecnologia Integrada para Sustentabilidade e Competitividade da Indústria de Cimento**. São Paulo: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 8 ago. 2016.

MARINO, A. A. F. G. L. R. **A quem serve simplificar o debate sobre o mercado irregular de imóveis?** Disponível em: <<https://caosplanejado.com/a-quem-serve-simplificar-o-debate-sobre-os-mercados-irregulares-de-imoveis/>>. Acesso em: 1 maio. 2020.

MARK, J. E. Ceramic-reinforced polymers and polymer-modified ceramics. **Polymer Engineering and Science**, v. 36, n. 24, p. 2905–2920, 1 dez. 1996.

MÁRMOL, G.; SAVASTANO, H. Study of the degradation of non-conventional MgO-SiO₂ cement reinforced with lignocellulosic fibers. **Cement and Concrete Composites**, v. 80, p. 258–267, 1 jul. 2017.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 37–46, 1 maio 2002.

MELO FILHO, J. D. A.; SILVA, F. D. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems. **Cement and Concrete Composites**, v. 40, p. 30–39, 1 jul. 2013.

MENDOZA REALES, O. A. et al. Effect of pozzolanic micro and nanoparticles as secondary fillers in carbon nanotubes/cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 281, p. 122603, 26 abr. 2021.

MERABTI, S. et al. Thermo-mechanical and physical properties of waste granular cork composite with slag cement. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 121923, 22 fev. 2021.

MIRANDA, F. S.; MIRANDA, F. DE S. Estudo da expansão por umidade e da resistência mecânica dos tijolos do edifício Aquarela, Jaboatão dos Guararapes-PE. 2001.

MOHR, B. J.; NANKO, H.; KURTIS, K. E. Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 4, p. 435–448, 1 abr. 2005.

MORE, A. **Metakaolin Market Size is Estimated to Grow with a CAGR of 4.9% - WBOC TV**. Disponível em: <<https://www.wboc.com/story/44038326/metakaolin-market-size-is-estimated-to-grow-with-a-cagr-of-49-during-2021-2026-with-top-countries-data>>. Acesso em: 7 jun. 2021.

MORRIS, J. Recycle, Bury, or Burn Wood Waste Biomass?: LCA Answer Depends on Carbon Accounting, Emissions Controls, Displaced Fuels, and Impact Costs. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 4, p. 844–856, 1 ago. 2017.

NASSAR, R. U. D.; SOROUSHIAN, P. Strength and durability of recycled aggregate

concrete containing milled glass as partial replacement for cement. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 368–377, 1 abr. 2012.

NATIONAL MINERALS INFORMATION CENTER, U. Mineral Commodity Summaries 2020. p. 1–204, 2020.

NATIONAL MINERALS INFORMATION CENTER, U. MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2021. p. 204, 2021.

OLIVEIRA, I. R. C. **Propriedades mecânicas, físicas e químicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras longas de juta e de malva. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, Manaus.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://200.129.163.131:8080/handle/tede/3477>>. Acesso em: 13 fev. 2020.

ORIOU, M.; PERA, J. Pozzolanic activity of metakaolin under microwave treatment. **Cement and Concrete**, v. 25, n. 2, p. 265–270, 1995.

PAVANKUMAR, V.; KRISHNAMURTHY, G. R. **Experimental Study on Replacement of Cement with Metakaolin Using M-Sand with Steel Fiber of M70 Grade of Concrete** *International Journal of Science and Research*. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.ijsr.net>. Acesso em: 6 mar. 2020.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. DE C. O. **Influence of Chemical Composition of Eucalyptus Wood on Gravimetric Yield and Charcoal Properties | Pereira | BioResources.** Disponível em: <<https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/3908>>. Acesso em: 10 jun. 2021.

PEREIRA, I. DA C.; BATISTA, T. DE O. **PATOLOGIAS CAUSADAS PELA UMIDADE-ESTUDO DE CASO EM UMA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL NO MUNICÍPIO DE SÃO PEDRO DA ALDEIA/RJ** Ingrid da Costa Pereira¹, Tauana de Oliveira Batista² *Anais do Seminário Científico do UNIFACIG*. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://pensaracademico.unifacig.edu.br/index.php/semiariocientifico/article/view/2281>>. Acesso em: 4 jun. 2021.

PEREPELKIN, K. E. Chemical Fibers with Specific Properties for Industrial Application and Personnel Protection*. **JOURNAL OF INDUSTRIAL TEXTILES**, v. 31, n. 2, p. 87–102, 2011.

PÉREZ, J. et al. **Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: An overview** *International Microbiology* Sociedad Espanola de Microbiologia, , 27 abr. 2002.

PIMENTEL, L. L.; BERALDO, A. L. Argamassa com adição de resíduo de Pinus caribea e tratada com aditivos. **Brazilian Symposium on Mortar Technology**, 2003.

PINO, V. et al. Determination of the alkyl- and methoxy-phenolic content in wood extractives by micellar solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry. **Talanta**, v. 73, n. 3, p. 505–513, 30 set. 2007.

PIOVESAN, P. R. R.; REIS, A. R. S.; SOUZA, D. V. RENDIMENTO NA PRODUÇÃO DE MADEIRA SERRADA DE IPÊ (*Handroanthus* sp). **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer, Goiania.**, v. 9, n. 17, p. 2315–2329, 2013.

POWER MAG. **Experts ponder future of biomass industry.** Disponível em: <<https://www.powermag.com/experts-ponder-future-of-biomass-industry/>>. Acesso em: 1 maio. 2020.

PRAKASH, R. et al. Fresh and mechanical characteristics of roselle fibre reinforced self-compacting concrete incorporating fly ash and metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 290, p. 123209, 5 jul. 2021.

PRASAD, M. S.; REID, K. J.; MURRAY, H. H. Kaolin: processing, properties and applications. **Applied Clay Science**, v. 6, n. 2, p. 87–119, 1 set. 1991.

QUEIROZ FILHO, A. DE A.; AMORIM NETO, A. A.; DANTAS, J. O. C. CIMENTO. **Agência Nacional de Mineração Brasil**, p. 2, 2017.

QUIROGA, A.; MARZOCCHI, V.; RINTOUL, I. Influence of wood treatments on mechanical properties of wood-cement composites and of *Populus Euroamericana* wood fibers. **Composites Part B: Engineering**, v. 84, p. 25–32, 15 jan. 2016.

RAMIREZ, M. et al. Evaluation of the mechanical performance and durability of binary blended CAC-MK/natural fiber composites. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 118919, 10 ago. 2020.

RAMLII, M.; KWAN, W. H.; ABAS, N. F. Strength and durability of coconut-fiber-reinforced concrete in aggressive environments. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 554–566, 1 jan. 2013.

RANGAN, B. V. FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE . p. 44, 2008.

RAO, Y.; XIANG, B. Determination of Total Ash and Acid-insoluble Ash of Chinese Herbal Medicine *Prunellae Spica* by Near Infrared Spectroscopy. **YAKUGAKU ZASSHI**, v. 129, n. 7, p. 881–886, 1 jul. 2009.

RIBEIRO, U. G.; DE VASCONCELOS, R. P. Study of thermal and mechanical properties of cementitious composites produced with residues from porto velho timber industry. **Revista Materia**, v. 23, n. 4, 2018.

ROSSETTI, V. A.; DI PALMA, L.; MEDICI, F. Production of aggregate from non-metallic automotive shredder residues. **Journal of Hazardous Materials**, v. 137, n. 2, p. 1089–1095, 21 set. 2006.

SABIR, B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 6, p. 441–454, 1 dez. 2001.

SADROLODABAEI, P. et al. Mechanical and durability characterization of a new textile waste micro-fiber reinforced cement composite for building applications. **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, p. e00492, 1 jun. 2021.

SANTOS, C. M. M. DOS et al. TEORES DE UMIDADE DE RESÍDUOS MADEIREIROS UTILIZADOS COMO BIOCOMBUSTÍVEL EM INDÚSTRIA DE PAINÉIS LAMINADOS. IX Seminário de Pós-Graduação e Pesquisa & II Simpósio de Inovação, Propriedade Intelectual e Tecnologia, 8 maio 2018.

SANTOS, L. **Mas afinal, o que é construção seca?** Disponível em: <<https://www.planiconstrucao.com/single-post/2016/10/19/Mas-afinal-o-que-é-construção-seca>>. Acesso em: 20 mar. 2020.

SATYANARAYANA, K. G.; ARIZAGA, G. G. C.; WYPYCH, F. **Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers-An overview** *Progress in Polymer Science (Oxford)*, set. 2009.

SATYANARAYANA, K. G.; GUIMARÃES, J. L.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 7, p. 1694–1709, 1 jul. 2007.

SAVASTANO, H. et al. Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 4, p. 232–243, 1 abr. 2009.

SAVASTANO, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 5, p. 379–384, 1 out. 2000.

SAVASTANO JR., H. **Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo.** São Paulo: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 8 out. 2000.

SAVASTANO JR., H.; AGOPYAN, V. Transition zone studies of vegetable fibre-cement paste composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 21, n. 1, p. 49–57, 1999.

SAVASTANO JUNIOR, H. **Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo.** São Paulo: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 8 out. 2007a.

SAVASTANO JUNIOR, H. **Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo.** São Paulo: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 8 out. 2007b.

SAWANT, R. M.; GHUGAL, Y. M. Recent trend: Use of metakaolin as admixture: A review. **American Journal of Engineering Research (AJER)**, v. 4, p. 8–14, 2015.

SILVA, J. F. DA. Malva: Informações básicas para seu cultivo. **EMBRAPA-UEPAE**, p. 20, 1989.

SILVA, J. et al. Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 455–460, 2005.

SILVA, M. R. et al. Hybrid sandwich particleboard made with sugarcane, pínus taeda thermally treated and malva fibre from amazon. **Materials Research**, v. 21, n. 1, p. 20170724, 18 dez. 2018.

SNIC, S. N. DA I. DE C. **SNIC 50 ANOS: História**. Disponível em: <<http://snic.org.br/historia.php>>. Acesso em: 31 jan. 2019.

SOUZA, L. **Brasil gera 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano | Agência Brasil**. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-11/brasil-gera-79-milhoes-de-toneladas-de-residuos-solidos-por-ano>>. Acesso em: 4 mar. 2020.

STAIGER, M. P.; TUCKER, N. Natural-fibre composites in structural applications. In: **Properties and Performance of Natural-Fibre Composites**. [s.l.] Elsevier Inc., 2008. p. 269–300.

STAMM, A. J. Wood and cellulose science. **Wood and cellulose science**, 1964.

SUN, S. et al. **The role of pretreatment in improving the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials** *Bioresource Technology* Elsevier Ltd, , 1 jan. 2016.

SYED, H.; NERELLA, R.; MADDURU, S. R. C. **Role of coconut coir fiber in concrete**. *Materials Today: Proceedings*. **Anais...** Elsevier Ltd, 1 jan. 2020

TAGBA, M. et al. Performance Evaluation of Cementitious Composites Containing Granulated Rubber Wastes, Silica Fume, and Blast Furnace Slag. **Crystals**, v. 11, n. 6, p. 632, 1 jun. 2021.

TAPPI, T. A. OF THE P. AND P. I. **TAPPI 204 cm-97 - Solvent extractives of wood and pulp (Proposed revision of T 204 cm-97)** *Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, 1997.

TAPPI, T. A. OF THE P. AND P. I. **T 222 om-02 - Acid-insoluble lignin in wood and pulp** *Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, 2002a.

TAPPI, T. A. OF THE P. AND P. I. **TAPPI 211 om-02 - Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C** *Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, 2002b.

TOLEDO FILHO, R. D. et al. Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 6, p. 2409–2420, 1 jun. 2009.

TOLÊDO FILHO, R. D. et al. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 2, p. 127–143, 1 abr. 2000.

TOLÊDO, G.; FARIAS, D. E. **INFLUÊNCIA DO GRAU DE MATURAÇÃO DE FOLHAS DE BAMBU NA PRODUÇÃO DE CINZAS POZOLÂNICAS E SEUS EFEITOS NA HIDRATAÇÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PASTAS DE CIMENTO**. [s.l: s.n.].

TOLÊDO ROMILDO D., F. D. et al. Development of vegetable fibre-mortar composites of

improved durability. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 2, p. 185–196, 1 fev. 2003.

TONY, M. A. An industrial ecology approach: green cellulose-based bio-adsorbent from sugar industry residue for treating textile industry wastewater effluent. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, v. 101, n. 2, p. 167–183, 2021.

TRAJANO, J.; NETO, S. **COMPÓSITO CIMENTÍCIO REFORÇADO COM FIBRAS POLIMÉRICAS DE ALTA RESISTÊNCIA MECÂNICA**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/10626>>. Acesso em: 7 jun. 2021.

VASCONCELOS, D. G.; VASCONCELOS, R. P. DE. **Estudo das características física, mecânica e química de compósitos cimentícios reforçados com tecido de juta e malva tratado e adição de materiais pozolânicos**. Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2017.

WAMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics? **Composites Science and Technology**, v. 63, n. 9, p. 1259–1264, 2003.

WANG, J. et al. **Action mechanism of rice husk ash and the effect on main performances of cement-based materials: A review** *Construction and Building Materials* Elsevier Ltd, , 21 jun. 2021a.

WANG, L. et al. Value-added recycling of construction waste wood into noise and thermal insulating cement-bonded particleboards. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 316–325, 30 out. 2016a.

WANG, L. et al. Recycling contaminated wood into eco-friendly particleboard using green cement and carbon dioxide curing. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 861–870, 20 nov. 2016b.

WANG, L. et al. Hydration, shrinkage, pore structure and fractal dimension of silica fume modified low heat Portland cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 121952, 22 fev. 2021b.

WANG, S. et al. Lignin-based carbon fibers: Formation, modification and potential applications. **Green Energy & Environment**, 8 abr. 2021c.

WEI, J.; MA, S.; THOMAS, D. G. Correlation between hydration of cement and durability of natural fiber-reinforced cement composites. **Corrosion Science**, v. 106, p. 1–15, 1 maio 2016.

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

WEI, Y. M.; ZHOU, Y. G.; TOMITA, B. Study of hydration behavior of wood cement-based composite II: Effect of chemical additives on the hydration characteristics and strengths of wood-cement composites. **Journal of Wood Science**, v. 46, n. 6, p. 444–451, 1 dez. 2000.

WIECHETECK, M. Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos. **Projeto PNUD BRA 00/20-Apoio às Políticas Públicas na Área de Gestão e Controle**

Ambienta, p. 40, 2009.

WOJTACHA-RYCHTER, K.; KUCHARSKI, P.; SMOLINSKI, A. Conventional and Alternative Sources of Thermal Energy in the Production of Cement—An Impact on CO₂ Emission. **Energies**, v. 14, n. 6, p. 1539, 11 mar. 2021.

XIONG, C. et al. Sustainable use of recycled carbon fiber reinforced polymer and crumb rubber in concrete: mechanical properties and ecological evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123624, 10 jan. 2021.

YANG, M. et al. **Fabrication of AA6061/Al₂O₃ nano ceramic particle reinforced composite coating by using friction stir processing**. *Journal of Materials Science. Anais...Springer*, 29 ago. 2010Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-010-4525-1>>. Acesso em: 7 jun. 2021

ZHANG, D. et al. **Preliminary research on porous foam ceramics against gas explosions in goaf**. *Procedia Engineering. Anais...Elsevier*, 1 jan. 2011

ZHANG, S.-Y. et al. Mechanical Function of Lignin and Hemicelluloses in Wood Cell Wall Revealed with Microtension of Single Wood Fiber | Zhang | *BioResources. BioResources*, 2013.

ZHANG, X. et al. Degradation of wood extractives in thermo-mechanical pulp by soybean lipoxygenase. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 40, n. 4, p. 866–873, 5 mar. 2007.

ZIANE, S. et al. CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING REPORTS
EXPERIMENTAL STUDY ON THE DURABILITY CHARACTERISTICS OF SEVERAL
VEGETABLE FIBER REINFORCED CONCRETES EXPOSED TO SODIUM SULFATE.
Civil and Environmental Engineering Reports, v. Vol. 31, n. no.1, 2021.

ANEXO 1

DEFINIÇÃO DO TRAÇO – TEOR DE RESÍDUOS DE MADEIRA

1. Materiais e métodos

1.1 Cimento *Portland*

O cimento *Portland* selecionado foi o CP II Z 40 RS, produzido na empresa Mizu Cimentos Especiais - Unidade Manaus. Selecionado devido apresentar em sua composição materiais pozolânicos (6 a 14%) que auxiliam na durabilidade dos CCM.

1.2 Resíduos de Madeira (RM)

Os resíduos foram triturados no moinho de facas para diminuição das partículas, sendo usados nos experimentos agregados miúdos (grãos passante na peneira 4,8 mm e retido na peneira 1,18 mm) e agregado graúdo (retidos na peneira de 4,8 mm), de acordo com NBR 7211. Para determinação da massa específica empregou-se o procedimento padronizado na NBR 7190, procedendo-se o cálculo pela diferença da massa seca (em estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3$ até constância) pelo volume saturado (imerso em água por 24h).

1.3 Aditivo acelerador de Pega

Foi utilizado o aditivo acelerador do tempo de pega Vedacit Rapidissimo, comercializado pela empresa Vedacid Impermeabilizantes. Segundo os fabricantes a composição básica é silicatos, sendo recomendado dosagem de 3 a 15% do material sobre o peso do cimento, adotou-se a dosagem máxima recomendada.

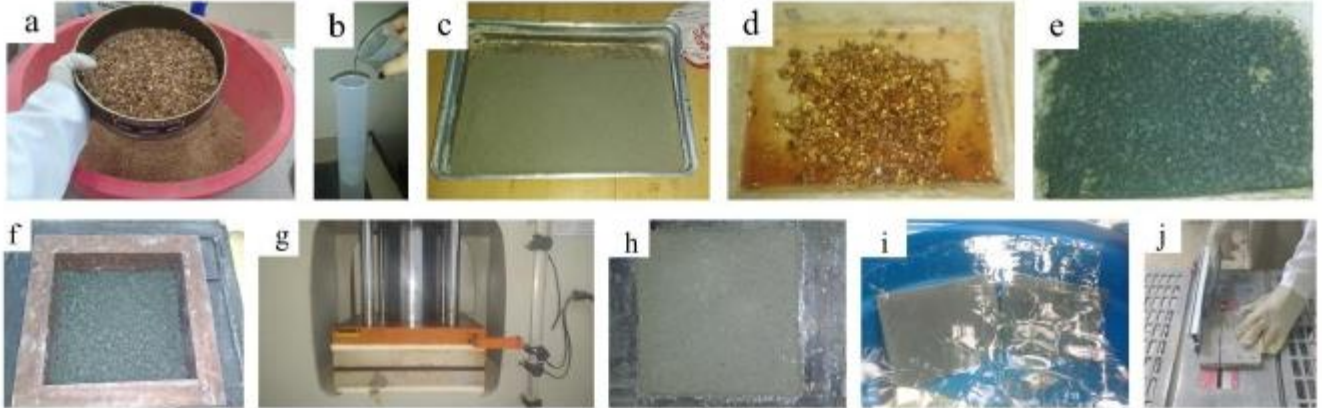
1.4 Produção dos CCM.

Foram produzidas placas retangulares de 28x28 cm e 1 cm de espessura. O traço da matriz cimentícia foi 1:1:0,4 (cimento:areia:água), os materiais foram separados em massa considerando suas densidades. A substituição da matriz em 10, 20 e 30% foi sobre o volume da placa.

O processo de confecção dos WCC foi adaptado da metodologia de, visualizado na Figura 1: (a) na preparação dos materiais, (b) diluição do aditivo em água, (c) mistura do cimento e areia, (d) hidratação das fibras até saturação, (e) mistura das fibras com cimento e areia, (f) formação de colchão, (g) prensagem a 100 psi, (h) desforma após 24 horas, (i) cura em água de 7 dias e

(j) corte das placas para ensaios.

Figura 1 - Processo de confecção dos WCC



1.5 Desempenho mecânico

Para avaliação do desempenho mecânico, os compósitos foram caracterizados através do ensaio de flexão em 4 pontos. Calculou-se a tensão máxima de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE), de acordo com a NBR 15498/16. Foram analisadas 5 amostras de 20x5x1 cm, e os resultados foram obtidos utilizando as equações 3.1 e 3.2, descritas abaixo:

$$MOR (\sigma) = \frac{3PL}{bh^2} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde,

σ = resistência à flexão a 4 pontos, em Megapascals (MPa).

P = carga máxima aplicadas, em Newton (N).

L = distância entre os apoios, em milímetros (mm).

b = largura média do corpo de prova, em milímetros (mm).

h = espessura média do corpo de prova, em milímetros (mm).

$$MOE = \frac{FL^3}{48fl} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde,

F – Força máxima aplicada no corpo-de-prova (N)

f – Flecha máxima ou deflexão correspondente a carga F

I – Momento de Inércia

L – Comprimento do corpo de prova (mm)

O Momento de Inércia (I) foi calculado pela Equação (3.3), de acordo com a largura (b) e altura (h) da seção transversal do corpo de prova.

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad \text{Equação 3.3}$$

1.6 Índices Físicos

Os ensaios para caracterização física foram realizados com base na NBR 9778/09, sendo ensaio de absorção de água e massa específica e teor de umidade.

2. Resultados e Discursão

A adição de 30% do volume total em resíduos de madeira apresentou desagregação do compósito (Figura 2), resultando em perda de material, portanto não se considerou a porcentagem de 30% para os ensaios físicos, separaram-se as amostras centrais da placa (descartando as bordas) para os ensaios mecânicos.

Figura 2 – Compósitos de 30% de adição de resíduos de material



Os WCC estudados são denominados de acordo com a Tabela 1

Tabela 1 - Nomeação dos compósitos

Nome	Composição/granulometria
10RM118	10% de RM, passantes na malha de 4,8 mm e retidos na malha de 1,18 mm
10RM480	10% de RM, retidos na malha de 4,8 mm
20RM118	20% de RM, passantes na malha de 4,8 mm e retidos na malha de 1,18 mm

20RM480	20% de RM, retidos na malha de 4,8 mm
30RM118	30% de RM, passantes na malha de 4,8 mm e retidos na malha de 1,18 mm
30RM480	30% de RM, retidos na malha de 4,8 mm

A umidade natural da areia determinada foi de $5,73\% \pm 0,068$, após o procedimento de secagem, a umidade utilizada nos WCC foi $0,14\% \pm 0,035$, esse controle de umidade sobre o agregado miúdo, evita modificações no fator água/cimento da matriz.

O índice de massa específica dos materiais estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Massa específica dos materiais utilizados na produção dos WCC

MATERIAIS	ρ (g/cm ³)	MÉTODO/FONTE
Cimento	$3,07 \pm 0,030$	Mizu Cimentos Especiais
Areia	$2,65 \pm 0,066$	DNER-ME 084/95
Madeira	$0,65 \pm 0,021$	NBR 7190/97

2.1 Análise dos índices físicos.

A Tabela 3 apresenta os resultados para massa específica dos WCC. O melhor resultado (o compósito mais leve) foi com a adição dos resíduos em maior teor (20%), que sofreu uma redução de cerca de 19% em relação ao traço de 10% de adição (T1).

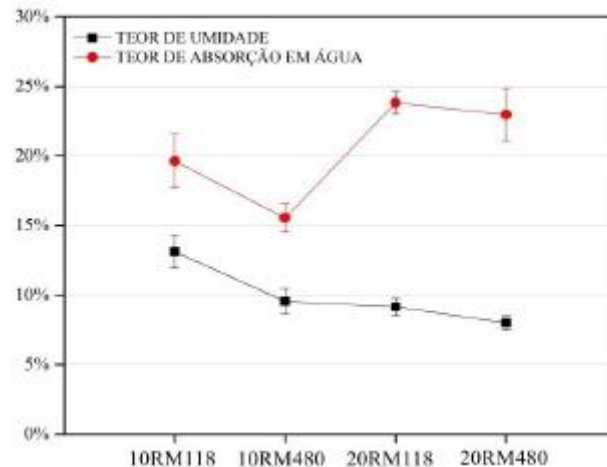
Tabela 3 - Massa específica dos WCC produzidos

Massa Específica (g/cm ³)	10RM118	10RM480	20RM118	20RM480
	$1,39 \pm 0,0055$	$1,48 \pm 0,038$	$1,20 \pm 0,007$	$1,13 \pm 0,007$

Na Figura 4 é mostrado os resultados dos ensaios de umidade e absorção em água. O teor de umidade para os compósitos com resíduos de 10 e 20% não diferiram entre si em grau significativo. Isso mostra que a concentração de partículas não tem influência direta neste índice.

Para a absorção de água os valores de adição em 10% mostraram-se mais favoráveis quando comparada a valores superiores de 20%. As partículas maiores (4,8 mm) apresentam melhores resultados, dificultando a permeabilidade da água no compósito.

Figura 2 - Resultado para ensaios físicos de absorção em água e umidade



2.2 Análise do desempenho mecânico

Observa-se na Figura 5 o declínio da resistência à flexão com o aumento da quantidade de resíduos. Como mostrado na figura 2, a amostra com 30% de resíduo apresentou desagregação entre a matriz e o reforço. A incorporação de uma quantidade grande de resíduo na matriz resulta em uma maior zona de interação, o que justifica o declínio na resistência.

A partir dos gráficos apresentados na Figura 4 foram calculados os valores de MOR (tensão máxima de ruptura), MOE (módulo de elasticidade) e Tenacidade (energia absorvida pelo compósito quando fissurado, determinada pela área do gráfico) para os gráficos acima foi determinado a tenacidade a 2 mm de deflexão, devido esse valor está presente em todos os gráficos, os dados são mostrados na tabela 4:

Figura 3 - Ensaio de flexão em 4 pontos dos WCC

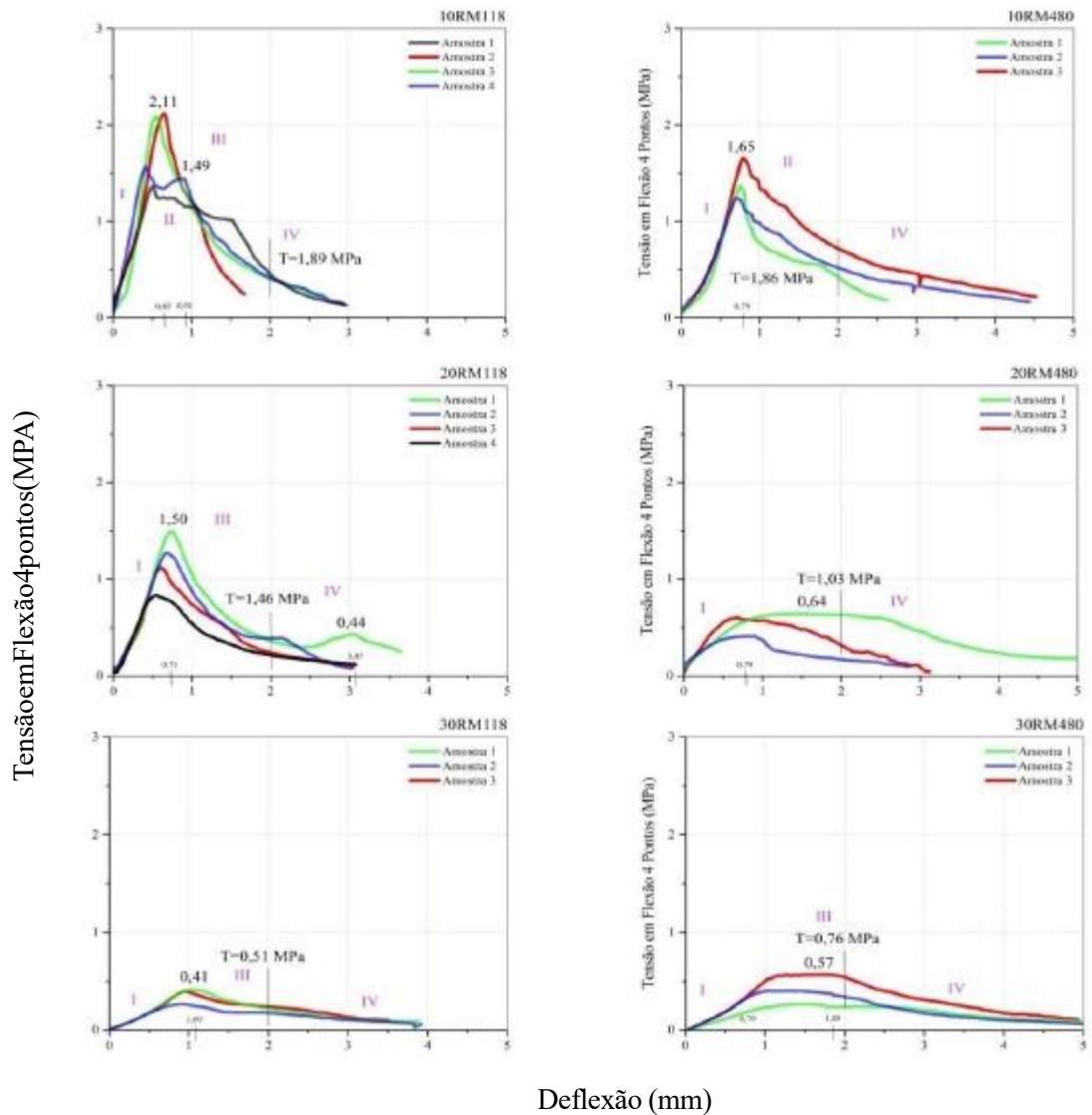


Tabela 4 - Resultados mecânicos do ensaio de Flexão em 4 pontos

	10RM118	10RM480	20RM118	20RM480	30RM118	30RM480
MOR	1,78 ±	1,42 ±	1,180±	0,551±	0,358 ±	0,413±
	0,321	0,154	0,204	0,095	0,061	0,103
MOE	2,89 ±	1,66 ±	1,26 ±	0,48 ±	0,22 ±	0,18 ±
	0,466	0,358	0,379	0,209	0,044	0,066
Tenacidade	1,825±	1,512±	1,176±	0,834±	0,452±	0,571±
	0,081	0,234	0,154	0,186	0,06	0,135

3. Considerações finais

Conclui-se que:

- Adições acima de 20% de resíduos de madeira na matriz causam desagregação entre as partículas e perda de material.
- A adição de 20% de resíduos apresenta um compósito mais leve, devido às propriedades de densidade da madeira estudada ($\rho = 0,65 \pm 0,021$), uma diferença de 13,67%.
- Os compósitos com 10% de resíduos, no entanto, apresentaram-se mais resistentes a absorção de água, diferença de cerca de 17,55%.
- Os protótipos produzidos com 10% de resíduos de madeira apresentaram melhores dados de tensão máxima de ruptura, sendo superior em cerca de 33,8% e 79,9% quando comparados aos resultados dos protótipos de 20 e 30% de resíduos, respectivamente. Estes também apresentam resultados mais expressivos para de elasticidade e tenacidade ($T=1,825\text{MPa}$).
- Nos compósitos de 10% de madeira a granulometria mais indicada é o material da malha de 1,18 mm, devido apresentar resistência superior de 20,3%. Da mesma forma, para os compósitos de 20,4% de resíduos, com resistência superior de 53,3%. Para os compósitos com 30% de resíduos, a melhor granulometria é a retida na malha de 4,8 mm, sendo superior em 20,8%.

Diante desses dados, recomendam-se, estudos de outras propriedades em compósitos com adição de 10% de resíduos de madeira ou inferior, passante na peneira de 4,8 mm e retidos na malha de 1,18 mm.

ANEXO 2

DEFINIÇÃO DO TRAÇO – TEOR DE FIBRA DE MALVA

1. Materiais e métodos

Foram testados teores de fibra de 2, 4 e 6 (%) no comprimento de 25 e 50 mm, sendo confeccionados 6 placas com dimensão de 280x280x10 mm cada. A matriz cimentícia foi composta de cimento, areia e água através do traço 1:1:0,4.

Considerando os valores de densidade volumétrica de 0,76 g/cm³ para fibra e de 2,6 g/cm³ para o agregado, cujos valores foram obtidos através de métodos de (LEÃO, 2008) e NBR 5738 (ABNT, 2015b), respectivamente. O Cimento utilizado foi o CPII-Z-40 RS (composto, pozolânico, 40 MPa e resistente a sulfato; $\rho = 3,15 \text{ g/cm}^3$).

A fim de melhor trabalhabilidade da mistura foi diluído em água aditivo plastificante. Os materiais foram misturados na argamassadeira por 8-10 minutos (Figura 1a-1b).

Em seguida, foram depositados na forma de moldagem acrílica por 24 horas (Figura 1c). A placa foi submetida à cura por 7 dias, e em seguida foram obtidas amostras de 50 x 280 mm para teste de flexão de 4 pontos na máquina universal de ensaios mecânicos no Laboratório de Materiais compósitos da Amazônia (Lamac), conforme Figura 1d.

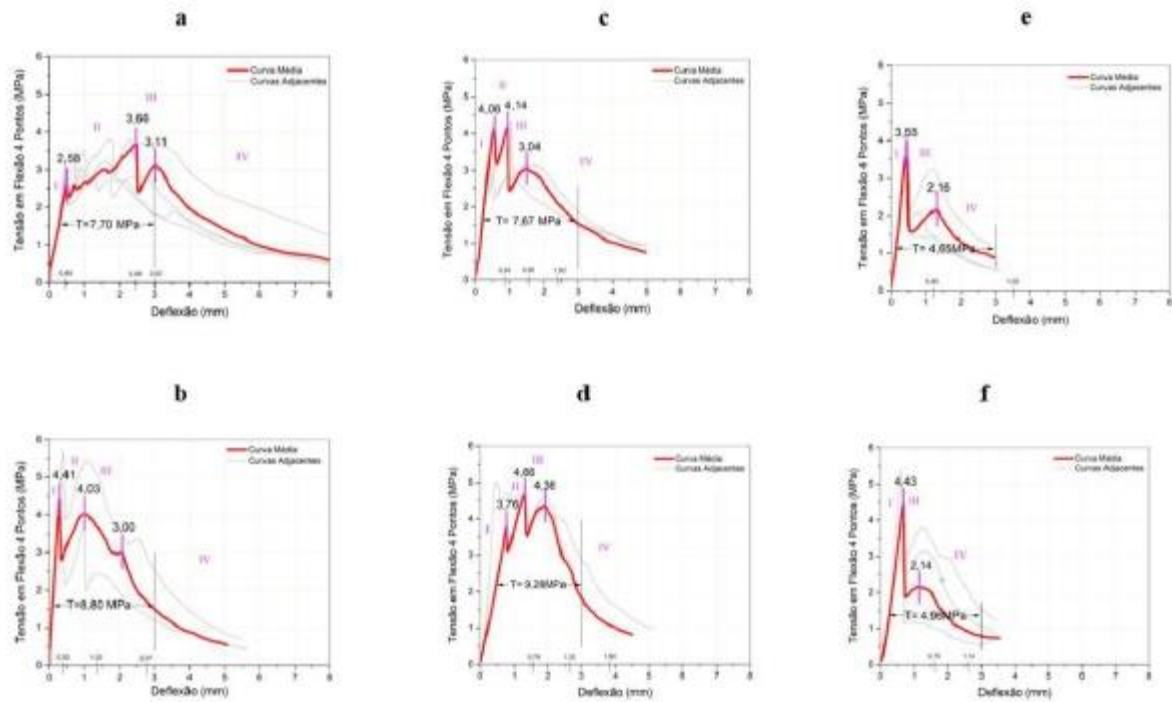


Figura 1 – Processo de confecção das amostras

2. Resultados e Discussão

A Figura 2a e 2b expõe os resultados das amostras com 6% de fibras, no comprimento de 25 e 50 mm, tais amostras foram renomeadas de 6FM25 e 6FM50, respectivamente.

Figura 2 – Curvas de tensão x deflexão das amostras: (a) 6FM25; (b)6FM50; (c)4FM25; (d)4FM50; (e)2FM25 e (f)2FM50



Observa-se que a amostra 6FM25 apresentou-se mais homogênea, ou seja, a curva média é similar com as curvas adjacentes, tendo pouca divergência entre as regiões do compósito, indicando maior agregação entre a matriz e a fibra. Por outro lado, a região II apresentou mais fissuras. Entretanto, os melhores resultados de flexão estática são vistos na amostra 6FM50, com $\sigma_t = 4,03$ MPa e maior resistência pós-fissuração ($T=8,80$ MPa) em 3 mm de deformação.

A redução da concentração de fibras para 4% (4FM25 e 4FM50) apresentou compósitos com fissuras mais centradas. O compósito 4FM50 destacou-se pela resistência máxima de 4,66 MPa e tenacidade de 9,28 MPa, valores máximos encontrados nessa pesquisa.

A concentração maior de fibras pode ter influenciado na interface dos materiais, portando uma quantidade menor de fibras proporciona melhor interface entre fibra/matriz e como consequência maiores valores de resistência são obtidos, conforme ilustrado na Figura 2c e 2d.

Os valores da concentração de fibras de 2% (2FM25 e 2FM50) apresentam o menor grau de fissuração, tendo a ocorrência de duas fissuras: a resistência da região elástica e a resistência de ruptura, apresentando menor tenacidade, como observado nas Figuras 2e e 2f.

3. Considerações finais

Baseando-se nos resultados obtidos, é possível concluir que:

- Observou-se maior facilidade na moldagem de Protótipos produzidos com concentração de 2% de fibra de Malva curta. Protótipos produzidos com 4 e 6% apresentaram aglomeração das fibras na argamassadeira, sendo necessário mais tempo de mistura e possivelmente ocasionando desgaste da fibra.
- Os protótipos produzidos com fibras de 50 mm apresentam resultados mecânicos mais expressivos, cerca 13% superior na concentração de 4%; enquanto que os produzidos com 6% apresentaram aumento de 10%. Quando utilizado 2% de fibra, a diferença não foi significativa.
- A concentração de 4% de fibra curta de Malva obteve os maiores valores para resistência de tensão (4,66 MPa e 4,14 MPa). Portanto, recomenda-se para estudos futuros adição de 4% de fibra de Malva com 50 mm de comprimento.