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

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE PLACAS CIMENTÍCIAS REFORÇADAS COM TECIDO DE JUTA E MALVA E SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR METACAULINITA

ELAINE FIGUEIREDO MOTTA GOMES

MANAUS
2019

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

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE PLACAS CIMENTÍCIAS REFORÇADAS COM TECIDO DE JUTA E MALVA E SUSBTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR METACAULINITA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos

MANAUS
2019

Ficha Catalográfica

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

G633d

Gomes, Elaine Figueiredo Motta
Desenvolvimento e caracterização mecânica de placas cimentícias reforçadas com tecido de juta e malva e susbtituição parcial do cimento por metacaulinita / Elaine Figueiredo Motta Gomes . 2019
71 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Raimundo Pereira de Vasconcelos
Coorientadora: Maria Gorett dos Santos Marques
Coorientadora: Luciane Farias Ribas
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Caracterização mecânica. 2. Placas cimentícias reforçadas. 3. Juta e malva. 4. Metacaulinita. I. Vasconcelos, Raimundo Pereira de. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE PLACAS CIMENTÍCIAS REFORÇADAS COM TECIDO DE JUTA E MALVA E SUSBTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR METACAULINITA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em 23 de dezembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos
Universidade Federal do Amazonas - UFAM

Profª. Drª. Maria Gorett dos Santos Marques
Universidade Federal do Amazonas – UFAM

Profª. Drª. Luciane Farias Ribas
Universidade Federal do Amazonas - UFAM

DEDICATÓRIA

A Deus pela conquista desta vitória. A minha família, principalmente meus pais, Solange Figueiredo Gomes e Lenildo Motta Gomes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me abençoar, iluminar e dar sabedoria e discernimento para vencer os desafios impostos nesta jornada de formação acadêmica.

Aos meus pais, Solange Figueiredo Gomes e Lenildo Motta Gomes, pela assistência, paciência, incentivo, coragem, ensinamento, sempre ao meu lado acreditando nos meus sonhos, contagiando com força e garra e conduzindo por sábios caminhos, com a certeza da vitória profissional.

Aos meus familiares e amigos por dividirem os momentos de cansaço, estresse, ausência, insegurança, erros, acertos, alegrias e tristezas.

Aos colegas que se tornaram amigos, pelo apoio, parceria e companheirismo neste período de caminhada acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos, pelo apoio, confiança, princípios e conhecimentos conduzidos ao longo deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil (PPGEC) pela presteza e experiência compartilhados.

Aos técnicos dos laboratórios do programa, pela assessoria na realização dos experimentos.

À UFAM, por motivar, apoiar e incentivar a pesquisa.

E a todos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A presente pesquisa apresenta o desenvolvimento e caracterização mecânica de placas cimentícias reforçados com tecido de juta e malva. Foram utilizadas matrizes com redução de hidróxido de cálcio por meio da substituição do cimento por metacaulinita. Além disso, a utilização desta justifica-se pelas suas características físico-químicas e da granulometria próxima a do cimento utilizado. As placas cimentícias foram moldadas com o uso de um sistema de injeção pneumático, sendo empregadas formas acrílicas de 350 x 350 mm, com quatro camadas de tecido de juta e malva como reforço. Foram utilizadas ténicas de caracterização dos materiais como como fluorescência de raios-x, difração de raios-x, determinação da massa específica, granulometria a laser, microscopia eletrônica de varredura, termogravimetria, espectroscopia de infravermelho entre outras. Por meio destas foi possível verificar a adequação dos materiais para o desenvolvimento do compósito. Para análise do comportamento mecânico e avaliação dos efeitos promovidos pelos reforços estas placas foram submetidas a ensaio de flexão em 4 pontos. Dessa forma, foi possível concluir que as amostras produzidas com a substituição de metacaulinita em relação ao cimento obtiveram melhor resultado. Além disso, não foi observada diferença significativa em termos de resistência com relação ao tratamento de hornificação implementado nos tecidos.

Palavras-chave: caracterização mecânica, placas cimentícias reforçadas, juta e malva, metacaulinita.

ABSTRACT

This research presents the development and mechanical characterization of cementitious plates reinforced with jute and mauve fabric. Matrices with calcium hydroxide reduction were used by replacing cement with metakaolinite. In addition, the use of this is justified by its physical-chemical characteristics and the granulometry close to that of the cement used. The cementitious slabs were molded using a pneumatic injection system, using 350 x 350 mm acrylic forms, with four layers of jute and mauve fabric as reinforcement. Techniques for characterizing the materials were used, such as X-ray fluorescence, X-ray diffraction, specific mass determination, laser granulometry, scanning electron microscopy, thermogravimetry, infrared spectroscopy, among others. Through these it was possible to check the suitability of the materials for the development of the composite. For analysis of the mechanical behavior and evaluation of the effects promoted by the reinforcements, these plates were submitted to a flexion test at 4 points. Thus, it was possible to conclude that the samples produced with the substitution of metakaolin in relation to cement obtained better results. In addition, no significant difference was observed in terms of resistance in relation to the treatment of hornification implemented in the tissues.

Palavras-chave: Reinforced cementitious matrix, jute and malva, metakaolin, limestone and stone powder.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14

1.1 OBJETIVOS 16

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 16

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17

2.1 Fibras Vegetais 17

2.1.1 Fibras de juta e malva 19

2.2 Rede produtiva **Erro! Indicador não definido.**

2.3 Características física, químicas, mecânicas e morfológicas**Erro! Indicador não definido.**

2.4 Pozolanas 24

2.4.1 Metacaulinita 25

2.5 Comportamento mecânico de compósitos reforçados com fibras vegetais 25

2.5.1 Resistência à compressão 25

2.5.2 Resistência á tração na flexão 26

2.5.3 Resistência à tração direta 26

3. MATERIAIS E MÉTODOS 27

3.1 Coleta e seleção dos materiais 27

3.1.1 Tecido de Juta e Malva 27

3.1.2 Cimento *Portland* 27

3.1.3 Metacaulinita 28

3.1.4 Fíller 30

3.2 Caracterização dos materiais 31

3.2.1 Tecido de Juta e Malva 32

Hornificação **Erro! Indicador não definido.**

Capacidade de Absorção de Água 32

Análises Térmicas (TG/DTG) 33

Morfologia (MEV) 33

3.2.2 Materiais finos: Cimento, Metacaulinita, Fíller Calcário e Pó de Pedra 34
Composição química (FRX) 34
Composição mineralógica (DRX) 34
Massa Específica 34
Granulometria 34
Espectroscopia de Infravermelho (FTIR) 35
3.3 Desenvolvimento da matriz 35
3.3.1 Água 35
3.3.2 Compatibilidade do dispersante e dosagem de saturação 36
3.3.3 Dosagem da matriz 36
3.3.4 Dosagem e definição do traço 37
Etapa 1: dosagem das placas para definição do fíller a ser utilizado 38
Etapa 2: dosagem final das placas 38
3.3.5 Produção dos compósitos 39
3.4 Caracterização do comportamento à flexão em 4 pontos**Erro! Indicador não definido.**
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 46
4.1 Tecido de Juta e Malva 46
Análises Térmicas (TG/DTG) 46
Morfologia (MEV) 47
4.2 Materiais finos: Cimento, metacaulinita, calcário e pó de pedra 47
Composição química (FRX) 47
Composição mineralógica (DRX) 49
Massa Específica 52
Granulometria 53
Análises Térmicas (TG/DTG) 55
Espectroscopia de Infravermelho (FTIR) 57
4.3 Comportamento à flexão em 4 pontos 58
Placas com 2 camadas de reforço 58
Placas com 4 camadas de reforço 60
5. CONCLUSÕES 65
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 66

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura química da (a) celulose (b) hemicelulose e (c) lignina. Fonte: Abiola *et al*., 2014.....17
Figura 2: Principais produtores de juta e malva do Brasil nos últimos 10 anos. Fonte: IBGE-PAM/2017.....20
Figura 3: MEV da seção transversal de uma fibra de juta. Fonte: (TANGUY *et al*., 2018).....23
Figura 4: a) Representação das fibrocélulas, fibrilas, microfibrilas e cristais de celulose, b) Seção transversal da fibra de juta. Fonte: (MELO FILHO, 2012; OKSMAN K. *et al*., 2009; OLIVEIRA, 2013).....24
Figura 5: Localização do ponto de coleta dos tecidos de juta e malva. Fonte: Google Maps, 2018.....27
Figura 6: Localização do ponto de coleta do solo utilizado para a produção de metacaulinita. Fonte: Google Maps, 2018.....28
Figura 7: a) Coleta e b) transporte das amostras de solo 28
Figura 8: Secagem prévia das amostras.....29
Figura 9: Amostras de solo antes e após a calcinação 29
Figura 10: a) Coleta de calcário na Fábrica Cimento Nassau; b) Coleta do pó de pedra na empresa EBAM 30
Figura 11: Planejamento experimental para caracterização dos materiais utilizados31
Figura 12: Amostras utilizadas para o ensaio de absorção das fibras 32
Figura 13: Amostras submersas em água destilada 33
Figura 14: a) Funil de Kantro. b) Espalhamento da mistura 37
Figura 15: Sacos plásticos utilizados para a homogeneização do materiais.....39
Figura 16: Processo de umedecimento dos materiais finos a) material seco, b) material úmido.....40
Figura 17: Homogeneização da mistura com 50% da água da mistura 40
Figura 18: a) Acondicionamento da argamassa no clindro; b) Visão do cilindro e mangueiras.....41
Figura 19: Moldes acrílicos utilizados para a moldagem das placas: a) Sistema de vedação com anéis de borracha; b) Visão do conjunto com anéis de vedação e conjunto de parafusos e arruelas 42

Figura 20: Esquems de moldagem das placas com 4 tecidos de reforço: a) Sistema de mangueiras com 5 saídas; b) Preenchimento da placa com a argamassa 42
Figura 21: a) Placa desmoldada após 24 horas; b) Placa em cura úmida 43
Figura 22: Execução do ensaio de flexão em 4 pontos.....44
Figura 23: Análise térmica do tecido de juta e malva *in natura* 46
Figura 24: a) Microestrutura do cordão do tecido de fibras- 50 µm. b) seção longitudinal da fibra estudada- 20 µm. 47
Figura 25: Difratograma obtido para o cimento utilizado 50
Figura 26: Difratograma obtido para amostra de argila caulinítica e metacaulinita ...50
Figura 27: Difratograma do fíller calcário 51
Figura 28: Difratograma do fíller de pó de pedra.....52
Figura 29: Distribuição granulométrica dos materiais em pó utilizados na pesquisa.54
Figura 30: Curvas DTG obtidas para a argila caulinítica e metacaulinita 55
Figura 31: Curvas TG obtidas para a argila caulinítica e metacaulinita.....56
Figura 32: Espectro de infravermelho para a argila caulinítica e metacaulinita.....57
Figura 33: Curva de tensão x deformação para os compósitos MCC e MPP 59
Figura 34: a) Corpos-de-prova das placas produzidas com uso de calcário, b) Corpos-de-prova das placas produzidas com uso de pó de pedra 60
Figura 35: Curva tensão x deformação das matrizes produzidas sem substituição de metacaulinita 63
Figura 36: Curva tensão x deformação das matrizes produzidas com substituição de metacaulinita 63
Figura 37: a) Corpos-de-prova das placas produzidas sem uso de metacaulinita, b) Corpos-de-prova das placas produzidas com uso de metcaulinita 64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e desvantagens da utilização das fibras vegetais em relação as fibras sintéticas.....18
Tabela 2: Composição química das principais fibras naturais.....21
Tabela 3: Caracterísiticas físicas das principais fibras vegatais utilizadas.....22
Tabela 4: Principais propriedades mecânicas de fibras naturais.....22
Tabela 5: Características físico-químicas da água utilizada.....35
Tabela 6: Misturas utilizadas na etapa inicial da fase de dosagem e definição de traços 38
Tabela 7: Matrizes finais utilizadas para as placas 39
Tabela 8: Composição química do cimento utilizado 49
Tabela 9: Valores obtidos para a massa específica para os materiais utilizados.....53
Tabela 10: Características granulométricas para os materiais utilizados na pesquisa 55
Tabela 11: Dados para flexão em 4 pontos com amostras com duas camadas de reforço 58
Tabela 12: Parêmetros obtidos no ensaio de flexão em 4 pontos para as placas com 4 camdas de reforço.....60
Tabela 13: Matriz de correlação entre as resistência à flexão das placas produzidas 61
Tabela 14: Matriz de correlação entre o LOP das placas produzidas 61
Tabela 15: Matriz de correlação entre o MOR das placas produzidas 62
Tabela 16: Matriz de correlação entre o MOE das placas produzidas 62

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al_2O_3- Óxido de alumínio ou alumina

$Ca(OH)_2$- Hidróxido de cálcio

$CaCO_3$- Carbonato de cálcio

CH- Hidróxido de calcio

DRX- Difração de raios-x

DTG- Derivada termigravimétrica

Fe_2O_3- Óxido de ferro

FRX- Fluorescência de raios-x

FTIR- Espectroscopia de infravermelho por Transformada de Fourier

H_2O- Água

KBr- Brometo de Potássio

Mk- Metacaulinita

O- Oxigênio

OH- Hidroxilas

Si- Silício

SiO_2- Óxido de slício ou sílica

TG- Termogravimetria

TiO_2- Óxido de titânio ou anatásio

MCC- matriz cimentícia com utilização de calcário

MPP- matriz cimentícia com utilização de pó de pedra

MN- matriz sem substuição de metacaulinita e tecido natural

MH- matriz sem substuição de metacaulinita e tecido hornificado

ME-N- matriz com substituição de metacaulinita e tecido natural

ME-H- matriz com substituição de metacaulinita e tecido hornificado

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as questões ambientais aliadas ao desenvolvimento sustentável incentivaram a busca por novos materiais para aplicação nos diversos ramos da indústria. A construção civil disponta como um importante nicho para o desenvolvimento de pesquisas. Nesse contexto, destacam-se os materiais compósitos, cujos processos de produção, caracterização e, principalmente, de avaliação do seu tempo de vida útil vêm sendo estudados em vários centros de pesquisa do mundo (MELO FILHO, 2012).

Para Callister (2008) os compósitos são qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades. Dentre estes, destacam-se os materiais compósitos reforçados com fibras, sendo estas utilizadas como reforço desde o período Neolítico de 4600 a 4500 A.C, em um período conhecido como Era da Argila, onde as construções eram constituídas de argila com adição de resíduos vegetais, como palhas ou gramas cortadas.

Atualmente no mercado existe uma diversidade de fibras sintéticas utilizadas para reforço, onde para este propósito as mais usadas são as de aço, polipropileno, poliéster e vidro. Em contrapartida a utilização destas, maior atenção tem sido dada ao uso de fibras obtidas de fontes vegetais, pois a combinação entre propriedades mecânicas, físicas e seus benefícios ambientais tem sido o principal fator para seu uso como alternativa aos reforços convencionais (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015).

Embora materiais de construção de natureza frágil tenham sido reforçados com fibras vegetais desde a antiguidade, o conceito de reforço em matrizes à base de cimento foi desenvolvido em 1940, quando estas foram avaliadas como potenciais substitutas para as fibras de amianto (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015). O cimento amianto foi o primeiro fibrocimento a ser produzido em larga escala no início do século XX, onde foi bastante utilizado na fabricação de telhas e caixas d’água, porém sua utilização hoje é proibida em diversos países devido aos comprovados danos causados a saúde em função da utilização do amianto. No Brasil, para tais fins as fibras vegetais começaram a ser utilizadas em 1980, em estudos desenvolvidos por pesquisadores do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CEPED) em Camaçari, na Bahia.

As aplicações de compósitos cimentícios com fibras vegetais estão direcionadas à frabricação de painéis divisórios, revestimentos externos, tetos de chapas planas, telhas e componentes pré-frabricados em geral (MELO FILHO, 2012; ROMA; MARTELLO; SAVASTANO, 2008).

Fibras naturais à base de plantas são de natureza lignocelulósica e, portanto, são compostas de celulose, hemicelulose, lignina, pectina e substâncias cerosas. As vantagens das fibras lignocelulósicas naturais sobre os materiais de reforço tradicionais são a resistência específica e outras propriedades mecânicas aceitáveis, baixo custo, baixa densidade, não abrasividade, boas propriedades térmicas (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015). Proporcionam ao compósito maior tenacidade, ductilidade, capacidade de flexão (ABIOLA *et al*., 2014).

Diversas pesquisas com a utilização de fibras vegetais como material de reforço para compósitos tem sido utilizadas (DITTENBER *et al*., 2012; FIDELIS *et al*., 2013; MELO FILHO *et al*., 2013; MARQUES, *et al*., 2014; BALLESTEROS *et al*., 2015; AGUIAR, 2016; CAVALCANTE, 2017; FERREIRA *et al*., 2017; OLIVEIRA, 2017; FERREIRA *et al*., 2018; ZUKOWSKI; SILVA; TOLEDO FILHO, 2018), porém um dos principais gargalos a respeito da produção industrial de compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais vem da limitada durabilidade a longo prazo de tais materiais, além da compatibilidade entre a fibra e matriz.

A eficiência de um composto reforçado com fibra depende da interface fibra/matriz e da capacidade de transferir tensão da matriz para a fibra (ABIOLA *et al*., 2014). Essa eficiência de transferência de tensão desempenha um papel dominante na determinação das propriedades mecânicas do compósito. O papel das fibras celulósicas como reforço reside em combinar de maneira adequada a ligação interfacial adequada entre a fibra e a matriz, bem como assegurar a durabilidade do material (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015).

Apesar destas fibras possuírem a mesma estrutura celular, a morfologia varia para cada tipo de fibra. Desta forma, a espécie da fibra utilizada acarreta em características físicas distintas que podem modificar suas características mecânicas (CAVALCANTE, 2017; FIDELIS, *et al*., 2013).

OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver e caracterizar o comportamento mecânico de placas cimentícias reforçadas com tecido de juta e malva.

Para isso são necessários os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar física, química e morfologicamente os tecidos de juta e malva;
- Caracterizar os materiais constituintes do compósito como metacaulinita, cimento, fíller calcário e pó de brita;
- Produzir placas cimentícias com e sem adição do tecido de juta e malva como reforço. Com ou sem utilização da metacaulinita como substituição parcial da matriz cimentícia;
- Caracterizar o comportamento à flexão em 4 pontos das placas produzidas;

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho encontra-se estruturado da seguinte forma:

Capítulo 1: Apresentação da introdução, objetivos da pesquisa e a estrutura da dissertação com a descrição dos capítulos;

Capítulo 2: Revisão bibliográfica do tema em estudo, bem como principais características dos materais utilizados;

Capítulo 3: Apresentação dos materiais utilizados na pesquisa, assim como sua descrição e métodos de caracterização utilizadas;

Capítulo 4: Resultados obtidos na pesquisa;

Capítulo 5: Apresentação das conclusões da pesquisa;

Capítulo 6: Sugestões para pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fibras Vegetais

O setor de construção é responsável pelo consumo de grandes quantidades de recursos não renováveis. Essa atividade gera não apenas toneladas de resíduos, mas também toneladas de emissões de gás carbônico. Portanto, pesquisas sobre materiais de construção baseados em recursos renováveis como fibras vegetais são necessárias (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2011).

Fibras naturais à base de plantas são materiais renováveis de baixo custo, sua utilização em larga escala como matéria-prima para compósitos à base de cimento pode resultar em ganhos em termos de conservação ambiental, energética e de recursos (ONUAGULUCHI; BANTHIA, 2016).

As fibras vegetais ou celulósicas são compostas principalmente por celulose, com quantidades variáveis de lignina e hemicelulose e outros componentes minoritários, como água, proteínas, peptídeos e compostos inorgânicos (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015). A celulose é um polímero contendo unidades de glicose. A hemicelulose é um polímero feito de vários polissacarídeos. Quanto à lignina, trata-se de uma mistura amorfa e heterogênea de polímeros aromáticos e monômeros de fenilpropano (Figura 1) (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2011; JOHN *et al*., 2005).

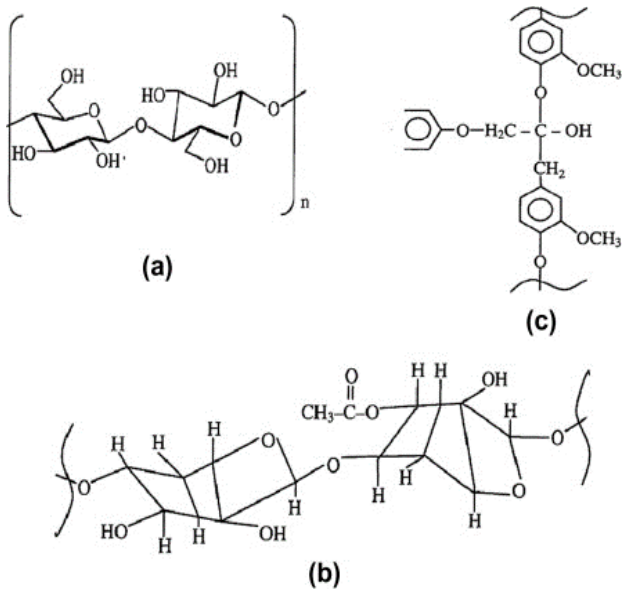


Figura 1: Estrutura química da (a) celulose (b) hemicelulose e (c) lignina. Fonte: Abiola *et al*., 2014.

As concentrações desses componentes dependem de fatores como tipo de fibra, condição de crescimento, dimensão, idade, localização na planta, extração e método de processamento (ONUAGULUCHI; BANTHIA, 2016).

Dessa forma, uma das desvantagens da utilização de fibras vegetais é que as mesmas apresentam variação em suas propriedades. A tabela 1 mostra uma relação entre as vantagens e desvantagens da utilização de fibras vegetais em relação as sintéticas.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens da utilização das fibras vegetais em relação as fibras sintéticas.

Vantagens	**Desvantagens**
• Baixa densidade e alta resistência específica e rigidez	• Menor durabilidade do que para compósitos de fibra sintética, mas pode ser melhorada consideravelmente com o tratamento
• As fibras são um recurso renovável, para o qual a produção requer pouca energia, envolve a absorção de CO_2 e ao mesmo tempo, devolve oxigênio ao meio ambiente	• Alta absorção de umidade, o que resulta em inchaço
• As fibras podem ser produzidas a um custo menor do que as fibras sintéticas	• Menor resistência, em particular resistência ao impacto em comparação com compósitos de fibra sintética
• Processos de fabricação de baixo risco	• Maior variabilidade de propriedades
• Baixa emissão de vapores tóxicos quando submetidos ao calor e durante a incineração no final da vida	• Temperaturas de processamento mais baixas, limitando as opções da matriz
• Menos danos abrasivos ao equipamento de processamento em comparação com os compostos de fibra sintética	

Fonte: Pickering; EFendy; Le, 2016.

De acordo com a sua origem e composição, as fibras celulósicas são classificadas como fibras de madeira e não-madeiras. As fibras de madeira podem também serem chamadas de lignocelulósicas, uma vez que possuem um teor de lignina mais elevado que as demais (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015). E são amplamente divididas em dois grupos: madeira macia e madeira dura (ONUAGULUCHI; BANTHIA, 2016).

As fibras não-madeiras podem ser classificadas em quatro grupos de acordo com a parte da planta utilizada para extração da fibra (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015), são os seguintes:

- Fibras liberianas: geralmente são extraídas da casca externa de caules de plantas. Exemplos destas fibras são a juta, cânhamo, linho, kenaf, rami e

outros. Apresentam-se como feixes longos de fibras e têm como característica principal a resistência à tração, em função disso são utilizadas para a produção de fios, têxteis, cordas, sacos e outros produtos (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015; ONUAGULUCHI; BANTHIA, 2016);

- Fibras foliares: São fibras grossas e duras extraídas dos tecidos de folhas, tipicamente usadas para a produção de cordas, tecidos, carpetes e tapetes. Como exemplo podem ser citadas as fibras de sisal, henequen e abacaxi (ONUAGULUCHI; BANTHIA, 2016);
- Fibras do caule: São fibras de caules de plantas, extraídas de plantas como cana de açúcar, milho, berinjela, trigo, cevada. Do junco de bambus e também de gramas como o esparto e capim-elefante. Tem sido utilizadas na fabricação de produtos de papel e cartão (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015; ONUAGULUCHI; BANTHIA, 2016);
- Fibras de sementes: São utilizadas na indústria têxtil, na produção de cordas, esteiras, sacos, isolamento entre outros. Como exemplo tem-se as fibras de algodão, coco, paineira e etc (ONUAGULUCHI; BANTHIA, 2016).

Nesta pesquisa serão estudados os tecidos compostos por fibras liberianas de juta e malva.

2.1.1 Fibras de juta e malva

A juta (*Corchorus capsularis*) é considera a segunda fibra têxtil mais produzida no mundo, logo após o algodão (ISLAM; AHMED, 2018). Enquanto a malva (*Ureta Lobata L*) produz fibras têxteis similares à juta, as quais são tradicionalmente utilizadas na fabricação de vestuário, barbantes, cordões, cortinas, fios, forros para estofados, artesanato e principalmente na confecção de sacarias para produtos agrícolas (OLIVEIRA, 2013).

Estas fibras mostram-se promissoras no desenvolvimento de compósitos reforçados com fibras vegetais, devido a sua disponibilidade, baixo custo e propriedades mecânicas ((AGUIAR, 2016; CAVALCANTE, 2017; FIDELIS, 2014, FIDELIS; SILVA; TOLEDO FILHO, 2014; ISLAM; AHMED, 2018; MARGEM, *et al*., 2016; OLIVEIRA, 2017; OLIVEIRA, 2013).

Estas fibras são consideradas um dos principais produtos da região Amazônica, principalmente nos estados do Amazonas e Pará. Onde geram renda,

demandam mão-de-obra e geram empregos tanto em sua comercialização como industrialização.

Com relação à disponibilidade das fibras, de acordo com dados informados pelo pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE-PAM/2017) indicam que o estado do Amazonas hoje é o maior produtor de juta e malva do país com praticamente 100% da produção nacional destas fibras. Até a produção de 2015 esse posto era dividido com o estado do Pará, como pode-se observar na Figura 2, que mostra a produção desses dois estados nos últimos 10 anos.

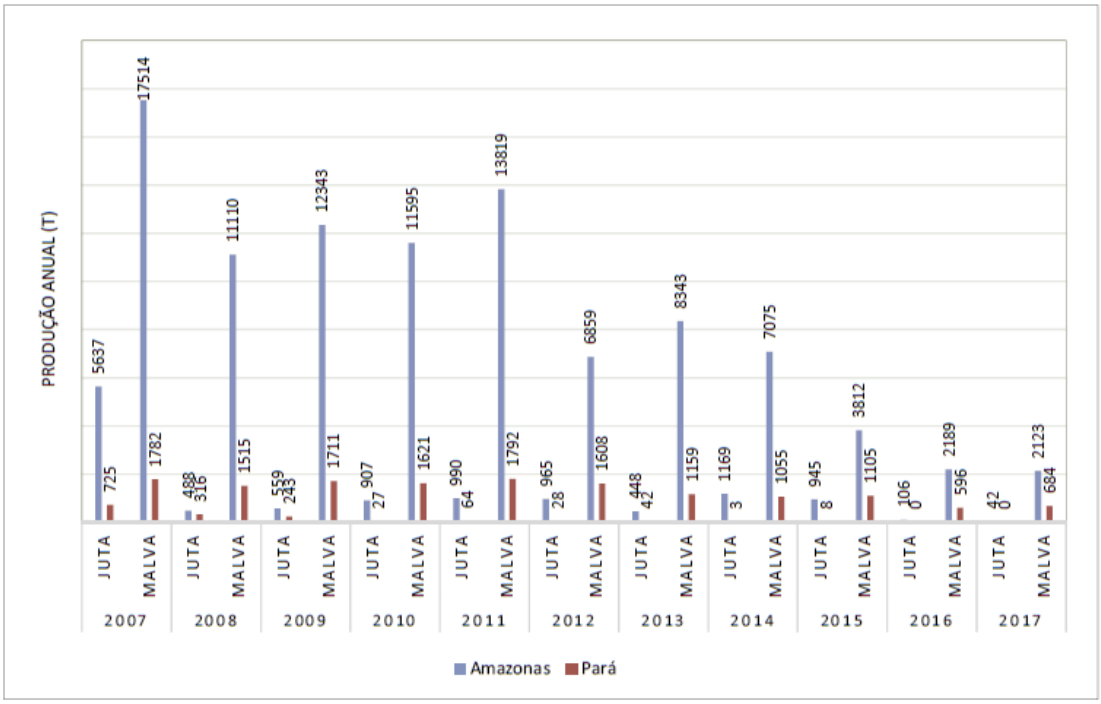


Figura 2: Principais produtores de juta e malva do Brasil nos últimos 10 anos. Fonte: IBGE-PAM/2017

Na produção mundial, segundo a Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), os principais produtores destas fibras são Índia, Bangladesh e China até o ano de 2016. O Brasil encontra-se dentro do grupo dos 10 principais produtores de fibras do mundo, onde ocupa a 10ª posição. Na Figura 2 pode-se observar a queda na produção brasileira a partir de 2012, em relação aos demais anos. Em 2017, a produção chegou a apenas 42 t.

Apesar desta redução na produção nacional, as fibras são de suma importância para a região amazônica. Uma vez que são aplicadas em pequena escala no artesanato e larga produção de sacarias para armazenamento de grãos. Assim contribuem para a economia no interior do estado (CAVALCANTE, 2017).

O cultivo da juta e malva é uma atividade econômica de grande valor para o setor primário do Amazonas, configurando-se em fonte de renda para milhares de famílias e faz do Amazonas, o maior produtor de fibras vegetais de malva e juta do Brasil (SOARES, 2015). Isso deve-se principalmente aos municípios e suas comunidades, na produção estadual destacam-se Coari, Manacapuru, Parintins, Itacoatiara, Anori, Anamã, Codajás e Manaquiri (IBGE-PAM/2017).

As fibras de juta são compostas principalmente de celulose, hemicelulose e lignina. Segundo Onuaguluchi e Banthia (2016) a composição química das fibras vegetais tem grande influência em suas propriedades mecânicas. Isso porque a celulose, a hemicelulose e a lignina são as principais responsáveis pelo comportamento das ligações e pela degradação das fibras naturais nos compósitos.

A tabela 2 apresenta as principais características químicas para as principais fibras utilizadas.

Tabela 2: Composição química das principais fibras naturais

Agrupamento	**Fibra**	**Celulose (%)**	**Hemicelulose (%)**	**Lignina (%)**
Liberianas	Juta	33,4	22,7	28,0
	Hibisco	28,0	25,0	22,7
	Tronco de banana	31,48	14,98	15,07
	Banana	60–65	6–8	5–10
Caule	Sorgo	27,0	25,0	11,0
	Bagaço	32–48	19–24	23–32
	Bagaço	41,7	28	21,8
	Trigo	33–38	26–32	17-19
	Arroz	28–36	23–28	12–14
	Cevada	31–45	27–38	14-19
Folha	Sisal	38,2	26,0	26
	Sisal	73,11	13,33	11,0
	Banana	25,65	17,04	24,84
	Abacaxi	70–82	18,0	5–12
	Palha de milho	38–40	28,0	7–21
Semente	Fibra de coco	36–43	0,15-0,25	41–45
	Tecido de coco	31,05	19,22	29,7
Madeira	Eucalipto	41,57	32,56	25,4

Fonte: (ONUAGULUCHI; BANTHIA, 2016)

Geralmente um maior desempenho é alcançado com um maior conteúdo de celulose e com microfibrilas de celulose mais alinhadas na direção da fibra, o que ocorre em fibras liberianas. As propriedades variam consideravelemente de acordo

com a composição e estrutura química, além do tipo de fibra e suas condições de cultivo, tempo de colheita, método de extração, tratamento e procedimentos de armazenamento (PICKERING; EFENDY; LE, 2016).

As características físicas mais importantes são as formas, tamanhos, orientações, espessura das paredes celulares e etc. As dimensões das células individuais das fibras lignocelulósicas dependem da espécie, maturidade e localização das fibras na planta e das condições de extração da fibra (JAWAID; KHALIL, 2011). A Tabela 3 fornece dados sobre comprimento e diâmetro de várias fibras celulósicas.

Tabela 3: Caracterísiticas físicas das principais fibras vegatais utilizadas

Fibra	Comprimento de fibra (mm)	Diâmetro da fibra (μm)
Banana	0,17	13,16
Folhas de abacaxi	3–9	20–80
Juta	0,8-6	5–25
Sisal	0,8-8	7–47
Linho	10–65	5–38
Cânhamo	5–55	10–51
Algodão	15–56	12–35
Henequen	-	8–33
Rami	40–250	18–80
Kenaf (bast)	1,4–11	12–36
Kenaf (core)	0,4–1,1	18–37
Bagaço	0,8-2,8	10–34
Bambu	2,7	14

Fonte: (JAWAID; KHALIL, 2011)

Fibras celulósicas como o linho, cânhamo, kenaf, sisal e juta por sua resistência e rigidez são cada vez mais importantes na produção de compósitos. A Tabela 4 apresenta as principais propriedades mecânicas de fibras naturais que podem ser utilizadas na produção de compósitos.

Tabela 4: Principais propriedades mecânicas de fibras naturais.

Fibra de origem	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
Abacá	400	12	3–10
Linho	345–1035	27,6	2,7–3,2
Juta	393–773	26,5	1,5–1,8
Cânhamo	690	70	1,6
Kenaf	930	53	1,6

Fibra de origem	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
Rami	560	24,5	2,5
Bambu	140–230	11–17	-
Sisal	511–635	9,4–22	2–2,5
Curaua	500 a 1150	11,8	3,7–4,3
Abacaxi	400–627	1,44	14,5
Fibr a de coco	175	4–6	30
Óleo de palma	248	3,2	25
Abacá	400	12	3–10
Linho	345–1035	27,6	2,7–3,2
Juta	393–773	26,5	1,5–1,8
Cânhamo	690	70	1,6
Kenaf	930	53	1,6

Fonte: (JAWAID; KHALIL, 2011)

A morfologia das fibras vegetais apresenta uma estrutura complexa, porém pode ser dividida em três partes principais: a parede primária, a parede secundária e o lúmen central. A parede secundária é descrita com três sub-camadas (S1, S2, S3) onde S2 é predominante (BOURMAUD *et al*., 2018).

De uma forma geral, são formadas pela união de fibrocélulas que são constituídas pelas paredes celulares, lamela e lúmens. Estas paredes são formadas por fibrilas que são ligadas por uma matriz polimérica de lignina e celulose (CAVALCANTE, 2017). Ao analisar-se a seção transversal pode-se visualizar de forma clara estas fibrocélulas (Figura 3).

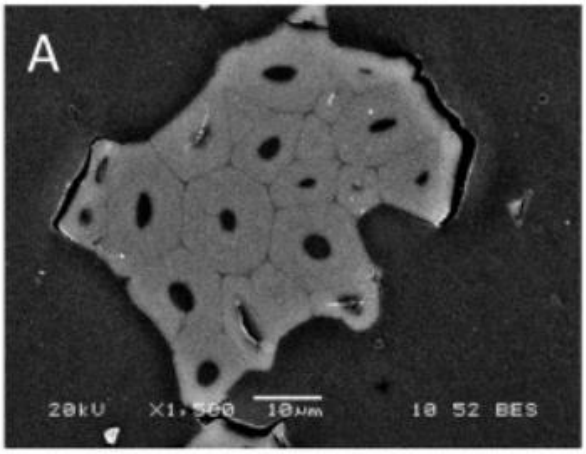


Figura 3: MEV da seção transversal de uma fibra de juta. Fonte: (TANGUY *et al*., 2018)

Segundo Melo Filho (2012), cada fibrocélula tem um diâmetro médio de 10 a 20 µm e tem mais ou menos a forma poligonal, com um furo central chamado lúmen, compreendendo cerca de 10% da área da seção transversal da fibrocélula. Porém,

esse percentual pode variar de fibra para fibra, de acordo com a espécie a qual pertence.

A Figura 4 mostra um esquema para a morfologia das fibras.

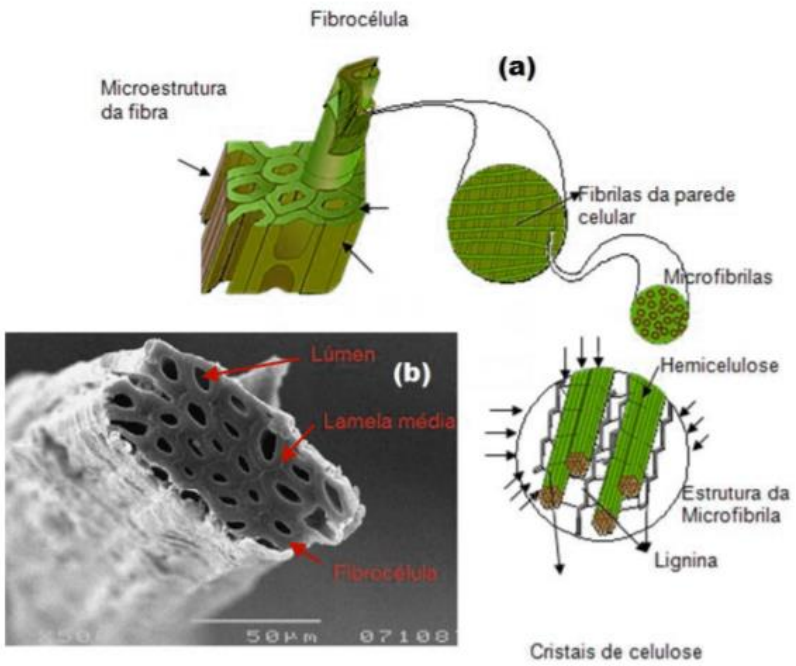


Figura 4: a) Representação das fibrocélulas, fibrilas, microfibrilas e cristais de celulose, b) Seção transversal da fibra de juta. Fonte: (MELO FILHO, 2012; OLIVEIRA, 2013)

2.2 Pozolanas

Um dos grandes desafios para a utilização de fibras celulósicas em compósitos cimentícios é a sua durabilidade. As fibras vegetais tendem a ser decompostas ao longo do tempo devido a alcalinidade do cimento, que durante o processo de hidratação libera hidróxido de cálcio (CH) que pode provocar a degradação das fibras (MELO FILHO, 2012).

Com intuito de garantir a durabilidade das fibras vegetais tem-se utilizado tratamentos nas fibras e na matriz. Um destes tratamento aborda a modificação da matriz por meio da substituição parcial da mesma por pozolanas. A principal finalidade das adições é a de promover reações pozolânicas, com o intuito de consumir o hidróxido de cálcio presente na matriz.

Assim, vários pesquisadores têm utilizado as pozolonas para modificar a matriz cimentícia (BELCHIOR, 2017; CAVALCANTE, 2017, CAVALCANTE, 2018; FIDELIS *et al*., 2014; MARQUES, 2009; MARQUES, 2015; MELO FILHO *et al*., 2013, OLIVEIRA, 2017), entre estas a metacaulinita.

2.2.1 Metacaulinita

A metacaulinita é uma pozolana que pode ser obtido por meio da queima de solos argilosos cauliníticos, da rocha caulim e de resíduos de cerâmica vermelha que contém a presença da caulinita.

A caulinita é um filossilicato dioctaédrico do tipo 1:1, formado pela superposição
de camadas tetraédricas de silício e octaédricas de alumínio (CHENG *et al*., 2012). A sua cela unitária apresenta composição teórica percentual expressa em termos de óxidos de SiO_2 – 46,54%; Al_2O_3 – 39,50%; H_2O – 13,96% (SILVA; SANTANA, 2013).

A metacaulinita é uma pozolana obtida pelo tratamento térmico do caulim ou argila caulinítica, este processo altera a estrutura da caulinita ao promover a quebra de suas ligações. Que resulta na formação da metacaulinita em temperaturas por volta de 600 800 °C (VIZCAYNO *et al*., 2010).

Argilas cauliníticas mostram a mais alta atividade pozolânica após a calcinação entre os diferentes tipos de argilas, graças à formação da fase amorfa de metacaulinita, altamente reativa (HOLLANDERS *et al*., 2016; ALUJAS *et al*., 2015; FERNANDEZ; MARTIRENA; SCRIVENER, 2011).

2.3 Comportamento mecânico de compósitos reforçados com fibras vegetais

O comportamento mecânico dos compósitos é influenciado por características inerentes ao reforço, como o tipo e geometria da fibra, fração volumétrica, módulo de elasticidade e resistência da fibra (MELO FILHO, 2012).

2.3.1 Resistência à compressão

Islam e Ahmed (2018) analisaram a influência da adição de fibras de juta em concretos, para tanto, foram utilizadas fibras em comprimentos de 10 mm e 20 mm em frações de volume de 0,00%; 0,25%; 0,50% e 1,0%. Para estes compósitos a resistência à compressão aumentou com o avanço da idade de cura. Aos 7 dias foi observado o aumento na resistência à compressão para os compósitos com adições de 0,50% e 10 mm de comprimentos e nas misturas com 0,25% e 20 mm de comprimento das fibras. Na fração de 1,00% para os dois comprimentos de fibras foi verificada a redução na resitência à compressão nas idades de 7, 28 e 90 dias.

2.3.2 Resistência á tração na flexão

Khorami e Ganjian (2011) estudaram o comportamento à flexão de compósitos cimentícios reforçados com resíduos de bagaço de cana-de-açúcar, trigo e eucalipto em teores de 2 e 4%. Onde verificou-se que o teor de 4% em peso alterou consideralvelmente a resistência à flexão.

Em estudos de Cavalcante (2017) com a utilização de fibras de juta e malva em placas cimentícias foi verificada o aumento da resistência na flexão para compósitos com a matriz modificada pela substituição de cimento por metacaulinita. Nestes mesmos compósitos os reforços com fibras foram utilizados na forma natural e com tratamento dos mesmos por hornificação, onde na resistência à flexão não houve influencia do tratamento utilizado no tecido.

Islam e Ahmed (2018) analisaram a influência da adição de fibras de juta em concretos, utilizando para isso fibras em comprimentos de 10 mm e 20 mm em frações de volume de 0,00%; 0,25%; 0,50% e 1,0%. A inclusão de fibras de juta não apresentou aumento no módulo de ruptura do concreto, exceto para a fibra de 10 mm na dosagem de 0,50%, onde o módulo de ruptura aumentou em quase 6,0%. Para o comprimento de fibra de 20 mm, o módulo de ruptura diminuiu para os três teores de fibras investigados de 0,25, 0,50 e 1,00%. Os resultados também ilustram que a adição de fibra de juta a um teor de 1,0% mostrou um efeito adverso no módulo de ruptura, independentemente das proporções de fibras de 100 e 200.

2.3.3 Resistência à tração direta

Islam e Ahmed (2018) analisaram a influência da adição de fibras de juta em concretos, onde foram utilizadas fibras em comprimentos de 10 mm e 20 mm em frações de volume de 0,00%; 0,25%; 0,50% e 1,0%. Foi verificado que as mesmas não exerceram influência significativa nos concretos. Isso pode ser atribuído ao comprimento das fibras incapazes de oferecer o efeito de ponte eficaz para limitar a propagação das rachaduras no concreto circundado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo apresenta a coleta, seleção e processamento dos materiais utilizados na pesquisa, bem como descrição e detalhes técnicos dos experimentos utilizados.

3.1 Coleta e seleção dos materiais

3.1.1 Tecido de Juta e Malva

Nas primeiras etapas de desenvolvimento da pesquisa, realizou-se visita técnica à matriz da Empresa Industrial de Juta S/A- JUTAL (Figura 5), localizada no município de Manaus, onde são produzidas as sacarias com fibras de juta e malva.

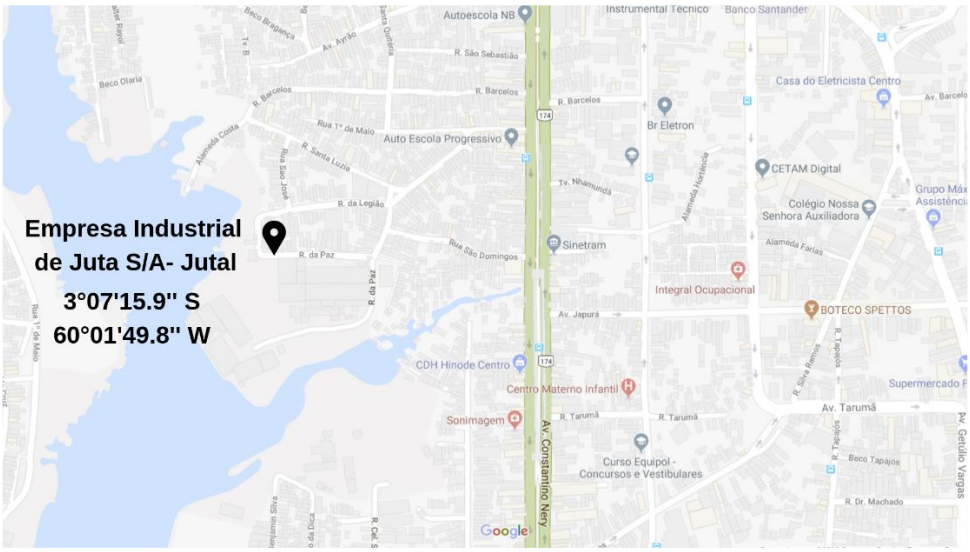


Figura 5: Localização do ponto de coleta dos tecidos de juta e malva. Fonte: Google Maps, 2018.

Esta empresa atualmente tem postos de compra de fibras de juta e malva em 6 municípios do Amazonas, os quais cobrem cerca de 18 municípios do Estado. Nesta pesquisa, foi coletado e utilizado o tecido de fibras de juta e malva com abertura entre tramas de aproximadamente 5 mm.

3.1.2 Cimento *Portland*

Para a referida pesquisa foi utilizado o cimento *Portland* comum CPI-S-40, da empresa Cemex. O fator norteador para a escolha do mesmo deve-se a pouca quantidade de adições existente neste tipo de cimento, de no máximo 5% (ABNT, NBR 5732). Com o intuito de estudar os efeitos decorrentes da substituição parcial da matriz por adições pozolânicas como a metacaulinita, considerou-se este cimento como o mais adequado para o estudo. Além disso, levou-se em conta o mercado da

cidade de Manaus, o qual não oferece cimentos sem adições, dos tipos CP I ou CP V.

Metacaulinita

A metacaulinita utilizada na pesquisa foi produzida a partir de um solo argiloso caulinítico, coletado nas instalações da fábrica da Litiara Indústria Cerâmica da Amazônia LTDA, localizada no município de Itacoatiara (Figura 6).

Figura 6: Localização do ponto de coleta do solo utilizado para a produção de metacaulinita. Fonte: Google Maps, 2018.

As amostras foram coletadas no depósito da empresa e armazenadas em sacos plásticos para transporte até Manaus (Figura 7.a e 7.b).

(a)

(b)

Figura 7: a) Coleta e b) transporte das amostras de solo

Após esta estapa, as amostras foram secas ao ar para posterior destorroamento e peneiramento (Figura 8).

Figura 8: Secagem prévia das amostras

No peneiramento foi utilizada a peneira de n° 200. Para posterior calcinação foram adotas as seguintes condições de queima, temperatura de 700 °C em forno mufla, com um tempo de permanência de 2 h (Figura 9). A adoção destes parâmetros é baseada na pesquisa de Cavalcante (2017), que utilizou solo proveniente das jazidas da mesma empresa de coleta desta pesquisa, para a produção de metacaulinita.

Figura 9: Amostras de solo antes e após a calcinação

3.1.4 Fíller

Os agregados miúdos foram substituídos por fíller calcário e pó de pedra. Esta medida leva em consideração a pesquisa de Cavalcante (2017) que ao utilizar areia como agregado miúdo, necessitou trabalhar com o material passante na peneira 600 µm. Em função do processo de moldagem das placas e abertura da malha do tecido de juta e malva não foi possível utilizar material de granulometria maior. Nesta pesquisa utilizou-se o material passante na peneira 300 µm.

A coleta do calcário empregado como fíller foi realizada na empresa Itautinga Agro Industrial S/A – Fábrica de Cimento Nassau, localizada no Distrito Industrial, Manaus (Figura 10.a). O calcário utilizado na empresa é proveniente da jazida de calcário localizada no rio Jatapu, no município de Urucará (AM), na fronteira com o Pará a 640 km de Manaus, nas seguintes coordenadas 1°42'15.8"S 58°30'41.6"W.

(a)

(b)

Figura 10: a) Coleta de calcário na Fábrica Cimento Nassau; b) Coleta do pó de pedra na empresa EBAM

Por sua vez, o pó de brita foi obtido junto à Empresa Brasileira De Agregados Minerais- EBAM, em seu Centro de Distribuição localizado avenida Torquato Tapajós, KM 15, no bairro de Tarumã-Açu (Figura 10.b).

A pedreira de onde os materiais são provenientes situa-se na zona rural do município de Presidente Figueiredo, no km 134 da BR 174. Com as seguintes coordenadas 1°50'16.8"S 60°07'00.2"W.

3.2 Caracterização dos materiais

Nesta seção é apresentado o programa experimental utilizado para a caracterização dos materiais utilizados, bem como o tratamento no tecido empregado, conforme Figura 11.

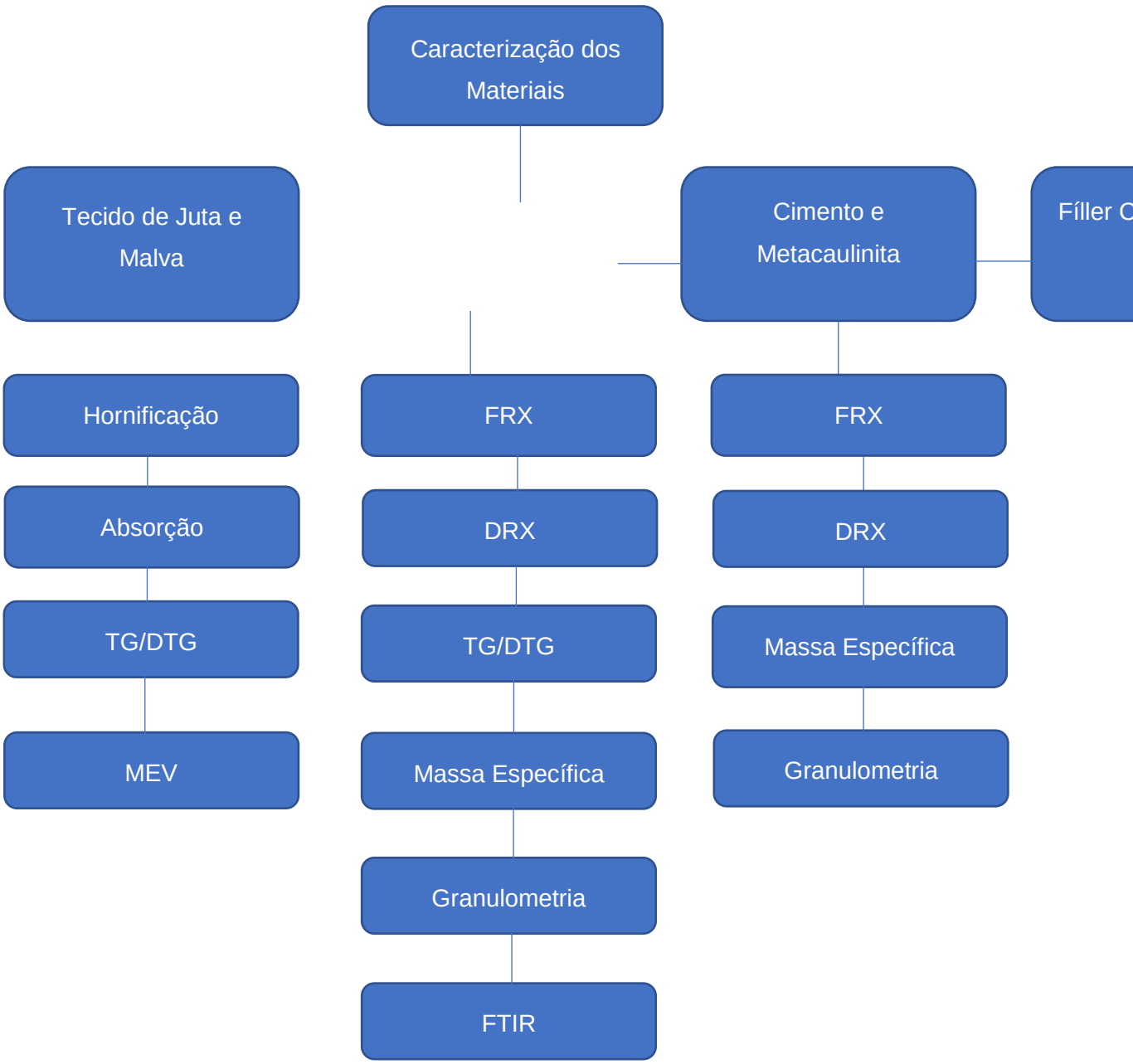


Figura 11: Planejamento experimental para caracterização dos materiais utilizados

3.2.1 Tecido de Juta e Malva

O tratamento por honificação do tecido seguiu os procedimentos utilizados por Ferreira *et al*. (2017) e Cavalcante (2017), descritos abaixo:

a) Lavagem do tecido em água corrente, seguida de secagem em estufa a 60 °C por cerca de 24h;
b) Imersão do tecido em água por cerca de 3 h, que corresponde ao tempo de saturação do mesmo;
c) Secagem do tecido em estufa com circulação de ar a 80 °C por cerca de 16 h;
d) Após este período de secagem, a estufa foi resfriada gradualmente até próximo da temperature ambiente com o objetivo de evitar o choque térmico nas fibras;
e) Os procedimentos (b e c) foram repetidos por 10 vezes e posteriormente os tecidos foram acondicionados em sacos plásticos até a utilização.

Capacidade de Absorção de Água

A absorção de água dos tecidos de juta e malva foi determinada de acordo com os procedimentos adotados por Fidelis *et al*. (2013), Ferreira *et al*. (2017) e Cavalcante (2017).

Foram moldadas amostras de 10x10 cm de tecidos, onde estas foram secas em estufa a 40 °C até constância de massa, conforme Figura 12.

Figura 12: Amostras utilizadas para o ensaio de absorção das fibras

Após isso, foram imersas em água destilada até a saturação (Figura 13). Depois de removidas, foi retirado excesso de água da superfície com o auxílio de papel absorvente e pesadas para verificação da massa. As leituras de massa foram realizadas nos tempos de imersão de 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480 e 1440 min.

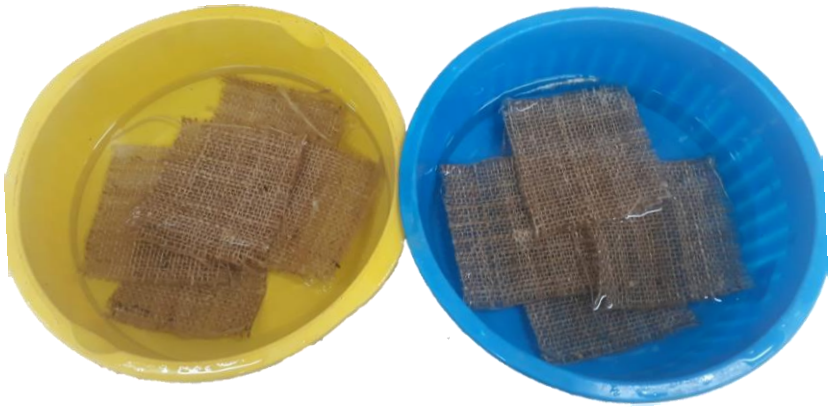


Figura 13: Amostras submersas em água destilada

Após este processo, as amostras foram secas em estufa a 80 °C por 12h e depois deste período resfriadas até a tempetura. Realizou-se o procedimento para todos os tempos de leitura.

Análises Térmicas (TG/DTG)

As análises termogravimétricas foram realizadas no Laboratório de Ensaios Físico-Químicos na Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Foi utilizado o equipamento SDT Q600 fabricado pela TA Instruments. Aproximadamente 10 mg em pó de cada amostra foram escaneados em um cadinho aberto de alumina de 90 microlitros sob uma atmosfera de gás N 5.0 com fluxo máximo de 30 ml/min, a uma taxa de aquecimento constante de 10 ºC/min até a temperatura de 900 ºC.

Morfologia (MEV)

A morfologia do tecido foi analisada com a utilização de um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo TM-3000 da Hitachi, à uma tensão de aceleração de 15 kV. Foram obtidas imagens da seção longitudinal das fibras.

3.2.2 Materiais finos: Cimento, Metacaulinita, Fíller Calcário e Pó de Pedra

Composição química (FRX)

Esta análise foi realizada no Laboratório de Ensaios Físico-Químicos na Faculdade de Tecnologia da UFAM. Utilizou-se a técnica de fluorescência de raios-x por energia dispersiva (FRX) para determinação da composição química expressa em óxidos. Foi utilizado o equipamento da marca Panalytical modelo Epsilon 3 XL, com tensão máxima de 50 kV, corrente máxima de 3 mA e atmosfera de gás Hélio.

Composição mineralógica (DRX)

A composição mineralógica das amostras foi realizada no Laboratório de Materiais situado no Departamento de Física da UFAM, por meio da difração de raios-x (DRX). As medidas foram obtidas em difratômetro Panalytical Empyrean, com tubo de Cu- Kα (1,5418 Å), a coleta ocorreu na faixa angular entre 10º e 40º (2θ), velocidade do goniômetro de 0,02°/passo.

Massa Específica

Realizou-se o ensaio de determinação da massa específica dos materiais de acordo com a NBR NM 23- Cimento *Portland* e outros materiais em pó- Determinação da massa específica de 2001.

Granulometria

A distribuição granulométrica foi obtida por meio do analisador a laser Mastersizer® 2000 que mede partículas de tamanhos entre 0,02 µm a 2000 µm, tal análise foi realizada no Laboratório de Análises Minerais (LAMIN) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

Com o intuito de evitar a aglutinação das partículas dos materiais analisados, estes foram dispersados em meio aquoso. Para o cimento foi utilizado como dispersante o álcool etílico e para os demais como a metacaulinita, o fíller calcário e pó de pedra utilizou-se a água.

Antes da coleta de dados as amostras foram submetidas à banho de ultrassom por cerca de 5 min com a adição de 20 ml de NaOH 0,1 M para maior dispersão das partículas.

De acordo com o fabricante o equipamento utilizado possui uma faixa de obscuração entre 10 e 20%.

Espectroscopia de Infravermelho (FTIR)

A técnica de FTIR foi utilizada para analisar a transformação do solo caulinítico em metacaulinita, decorrentes do processo de calcinação. Foi utilizado um espectrômetro Thermo Electron, modelo Nicolet S10 do Laboratório de Espectroscopia de Infravermelho da UFAM, com varredura espectral de infravermelho médio das amostras, em 32 varreduras ao longo do intervalo de números de onda de 4000 a 400 cm^{-1} e resolução de 4 cm^{-1}. As amostras foram digitalizadas com a utilização da técnica de transmitância por meio da pastilha de brometo de potássio (KBr), onde as amostras foram misturadas com KBr na proporção de 1:100, cerca de 10 mg de amostra foram utilizadas, e prensadas em disco a 80 KN por 1 min.

3.3 Desenvolvimento da matriz

3.3.1 Água

A água utilizada para o desenvolvimento dos experimentos é proveniente da rede de abastecimento da cidade de Manaus. A mesma apresenta as seguintes características físico-químicas, conforme Tabela 5.

Tabela 5: Características físico-químicas da água utilizada

Característica	Valor
Concentração de oxigênio dissolvido	0,61 DOppm
pH	5,98
Temperatura	26,25 °C
Condutividade	44 µS/cm
Medição de sólidos totais dissolvidos	22 tdsppm
Medição de salinidade	0,02 sal
Medição Redox	98,2 ORP
Medição de oxigênio dissolvido	8,1 DO%

Fonte: Cavalcante, 2017.

3.3.2 Compatibilidade do dispersante e dosagem de saturação

Nesta pesquisa foi utilizado o dispersante Glenium® 51 da BASF, composto por polímeros policarboxilatos, de forma semelhante à pesquisa de Cavalcante (2017). Cuja referida pesquisa também utilizou o cimento do tipo CP I.

Desta forma, foram tomados como base os resultados obtidos no referido trabalho. Para verificação da compatibilidade e obtenção da dosagem de saturação, Cavalcante (2017) utilizou os ensaios do funil de Marsh e mini abatimento de Kantro.

Por meio destes ensaios verificou-se que este tipo de dispersante é compatível com o cimento em questão. Além disso, obteve-se uma dosagem de saturação de 0,8% e teor de sólidos de 30,61%.

3.3.3 Dosagem da matriz

As matrizes aplicadas em compósitos cimentícios reforçados com tecidos de fibras vegetais, em geral, precisam atender requisitos como: compatibilidade química com o reforço têxtil, reologia adequada à penetração no tecido e compatível com o processo de produção adotado e sobretudo capacidade de absorver e transferir cargas entre os elementos do compósito (CAVALCANTE, 2017).

Cavalcante (2017) estudou teores de substituição de cimento por metacaulinita de 20%, 30%, 40% e 50%. Onde foi verificado que o teor de 40% de substituição destacava-se em relação aos demais, o mesmo consumia praticamente toda a porlandita existente na matriz.

Dessa forma, a matriz desta pesquisa será desenvolvida com o teor ótimo de substituição encontrado por Cavalcante (2017), pois leva-se em consideração que o solo caulinítico utilizado para a produção da metacaulinita tem a mesma origem da pesquisa anteriormente citada.

Para definição da dosagem da matriz a ser utilizada foram realizados ensaios de consistência em misturas do material fino (cimento ou cimento+ 40% de metacaulinita) com o fíller adotado (calcário ou pó de pedra), seguindo a metodologia do miniabatimento de Kantro (Figuras 14.a e 14.b) (CALMON *et al.*, 2013; CAVALCANTE, 2017).

(a) (b)

Figura 14: a) Funil de Kantro. b) Espalhamento da mistura

Estas misturas foram dosadas e modificadas com base no traço desenvolvido por Cavalcante (2017), 1:1:0,4 (material cimentício: areia: água/material cimentício), com teor de superplastificante igual a 1,8% e Marques (2015), 1:0,54:0,45 e 1,75% de teor de superplastificante. Considerou-se também a consistência adequada descrita pela primeira autora para a moldagem com o sistema utilizado cerca de 134 mm para amostras de referência e 155 mm para a matriz com substituição de metacaulinita.

A primeira autora substituiu 40% da massa de cimento por metacaulinita e utilizou areia como agregado miúdo. Por sua vez, a segunda autora substituiu 50% da massa de cimento por metacaulinita e utilizou o calcário como fíller.

3.3.4 Dosagem e definição do traço

Na fase de dosagem de definição dos traços utilizados foram realizadas duas etapas com processo distintos de produção dos compósitos, conforme descrito abaixo:

Etapa 1: Nesta foram utilizadas placas cimentícias com 2 camadas de tecido como reforço, além disso a mesma serviu para a definir o fíller a ser utilizado na fase final.

Etapa 2: Foi verificado na etapa anterior a fissuração excessiva das placas. Dessa forma, adotou-se o reforço com 4 camadas de tecido onde foram utilizados os naturais e hornificados. Além disso, foi utilizado apenas 1 tipo de fíller.

Os tópicos seguintes apresentam estes processos de forma mais detalhada.

Etapa 1: dosagem das placas para definição do fíller a ser utilizado

Foram desenvolvidas 2 matrizes cimentícias com 100% de cimento e 2 camadas de reforço, destas uma será com a adição de fíller calcário e outra com fíller de pó de pedra, uma vez que estes materiais foram utilizados para substituir o agregado miúdo.

A partir destas foi definido o fíller a ser utilizado no compósito final.

As dosagens adotadas de acordo com o ensaio de espalhamento com o funil de Kantro estão estão detalhas na Tabela 6:

Tabela 6: Misturas utilizadas na etapa inicial da fase de dosagem e definição de traços

Matriz	Tipo de Fíller	Cimento (%)	Metacaulinita (%)	Traço	Teor de dispersante
MCC	Calcário	100	0	1:0,50:0,45	2,5%
MPP	Pó de Pedra	100	0	1:0,50:0,45	1,8%

Etapa 2: dosagem final das placas

Para a dosagem final do compósito utilizou-se o fíller calcário, assim foram desenvolvidas 4 matrizes cimentícias: 2 de referência com com 100 % de cimento e reforço com tecido natural e hornificada. Por conseguinte, nas outras 2 matrizes 40% do cimento foi substituído por metacaulinita e os reforços foram utilizados da mesma forma que nas referências.

Em função do aumento do número de camadas foi necessário o reajuste dos traços estabelecidos na etapa anterior para traços com maior fluidez. A Tabela 7 apresenta as informações a respeito das misturas produzidas.

Tabela 7: Matrizes finais utilizadas para as placas

Matriz	Tratamento do Tecido	Tipo de Fíller	Cimento (%)	Metacaulinita (%)	Traço	Teor de dispersante
MN	Natural	Calcário	100	0	1:0,50:0,50	2,5%
MH	Hornificado	Calcário	100	0	1:0,50:0,50	2,5%
ME- N	Natural	Calcário	60	40	1:0,50:0,50	4,0%
ME- H	Hornificado	Calcário	60	40	1:0,50:0,50	4,0%

3.3.5 Produção dos compósitos

A produção das misturas da etapa 1 e 2 seguiu os procedimentos estabelecidos por Cavalcante (2017), cujo mesmo contempla as seguintes etapas: homogeneização manual dos materiais sólidos dentro de sacos plásticos (Figura 15), com agitação vigorosa por cerca de 1 min.

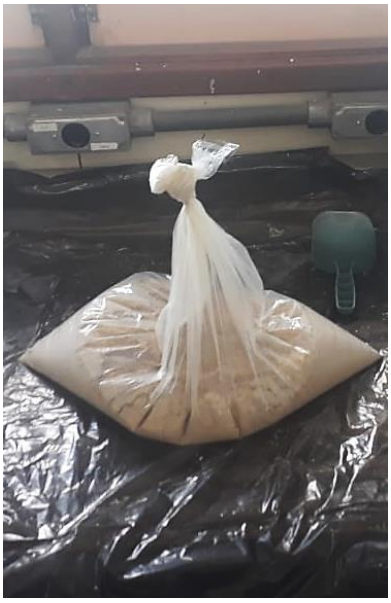


Figura 15: Sacos plásticos utilizados para a homogeneização do materiais

Após isso, o material foi acondicionado em recipientes onde foram umedecidos antes do início da mistura, com o intuito de evitar a perda de material durante a mistura em função da característica pulverulenta dos mesmos.

Assim, 50% da água necessária para a mistura foi utilizada para umedecer todo o material sólido em um intervalo de tempo de 5 minutos (Figura 16.a e 16.b).

(a)

(b)

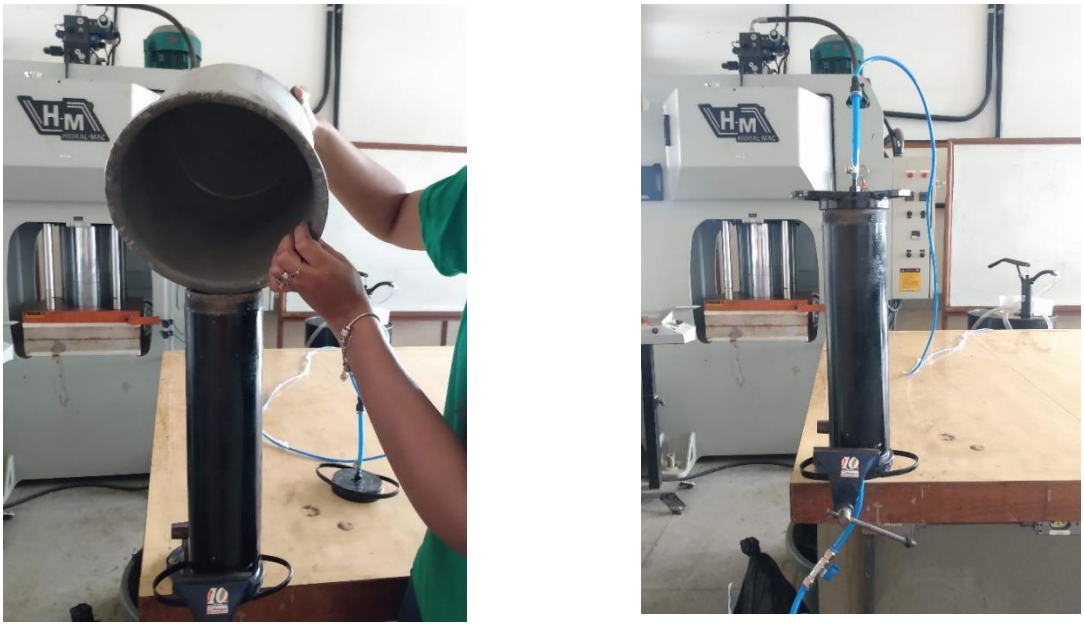
Figura 16: Processo de umedecimento dos materiais finos a) material seco, b) material úmido

A mistura umedecida foi homogeneizada por cerca de 5 minutos a uma velocidade de 115 rpm, no decorrer deste processo os outros 50% da água são misturados com o superplastificante e adicionados a mistura (Figura 17).

Figura 17: Homogeneização da mistura com 50% da água da mistura

O misturador foi desligado em tempos de 1 minuto para retirada do excesso de argamassa contida nas paredes do misturador, esta pausa foi realizada no tempo de 15 s. A partir deste passo, a mistura passou a ser realizada à uma velocidade de 237 rpm por 8 minutos. O tempo total de mistura que envolve todos os processos descritos equivale a 20 minutos.

Após o processo da mistura dos materiais, iniciou-se a moldagem das placas por meio de um sistema pneumático com a injeção da argamassa em placas acrícilica. Para tanto é utilizado um cilindro metálico fixo em uma morsa de bancada, no qual a argamassa ficou acondicionada e foi liberada para os moldes (Figura 18.a). O ar comprimido foi transportado por meio de mangueiras flexíveis de poliuretano azul de diâmetros de 6mm, porém, ao chegar no cilindro esse diâmetro é aumentado para 10 mm (Figura 18.b).



(a) (b)

Figura 18: a) Acondicionamento da argamassa no clindro; b) Visão do cilindro e mangueiras

Todo o processo citado acima é comum para produção das placas com 2 camadas de tecido de reforço e 4 camadas de reforço. Para ambas foi utilizado um molde acrílico quadrado com medidas de 350 x 350 mm. Para isso foi utilizado um sistema de vedação com o uso de lençóis de borracha nas espessuras de 1 e 2 mm (Figura 19.a), além de um conjunto de parafusos e arruelas para fixar as faces das formas (Figura 19.b).

(a) (b)

Figura 19: Moldes acrílicos utilizados para a moldagem das placas: a) Sistema de vedação com anéis de borracha; b) Visão do conjunto com anéis de vedação e conjunto de parafusos e arruelas

Porém, na injeção da argamassa nas formas foram utilizados diferentes sistemas de mangueiras. Uma vez que a placas com 2 tecidos apresentavam apenas 3 camadas entre os reforços para serem preenchidas com a argamassa e uma espessura total de 10 mm, utilizou-se um sistema com 3 saídas de mangueiras com diâmetros de 6 mm.

(a) (b)

Figura 20: Esquems de moldagem das placas com 4 tecidos de reforço: a) Sistema de mangueiras com 5 saídas; b) Preenchimento da placa com a argamassa

Para as placas com 4 tecidos o sistema consistiu em 5 saídas de mangueiras de 4 mm de diâmetro (Figura 20.a). Em função da espessura das placas de 12 mm e da quantidade camadas entre os reforços foi necessário reduzir o diâmetro das

mangueiras. Além disso, foi considerado o espaço reduzido para a movimentação das mangueiras dentro dos moldes para melhor preenchimento dos mesmos.

Assim, a consistência da argamassa também foi modificada para uma argamassa mais fluída onde a mesma tivessse a capacidade de auto preenchimento nas formas (Figura 20.b). Em função destes aspectos a relação a/c foi modificada de 0,45 para 0,50 e os teores de dispersante utilizado saltaram para 2,5% nas matrizes de referência e 4,0% para as matrizes com metacaulinita. O valor estabelecido pelo fabricante vai de 0,2 a 1%, porém abre margem para variação de acordo com a temperatura do ambiente, tipo de cimento, fator A/C, condições de mistura, tipos de agregados e principalmente a quantidade de finos da mistura.

A desmoldagem foi realizada 24 horas após a moldagem. E foram mantidas em cura úmida até a idade de 28 dias para a realização de ensaios mecânicos (Figura 21.a e 21.b).

(a) (b)

Figura 21: a) Placa desmoldada após 24 horas; b) Placa em cura úmida

3.4 Determinação da tração na flexão

Para o ensaio de flexão em 4 pontos foram extraídos 4 corpos de prova de 160 x 40 x 10 mm (comprimento x largura x espessura) para as placas com 2 camadas de reforços e 4 corpos de prova de 160 x 40 x 12 mm (comprimento x largura x espessura) para as placas com 4 camadas de reforços.

O ensaio foi realizado em uma máquina universal de testes de modelo AME-5KN com capacidade de carga de até 5KN (500 kgf) operando a uma velocidade de deflexão de 0,50 mm/min (Figura 22). O teste foi realizado no Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LAMAC).

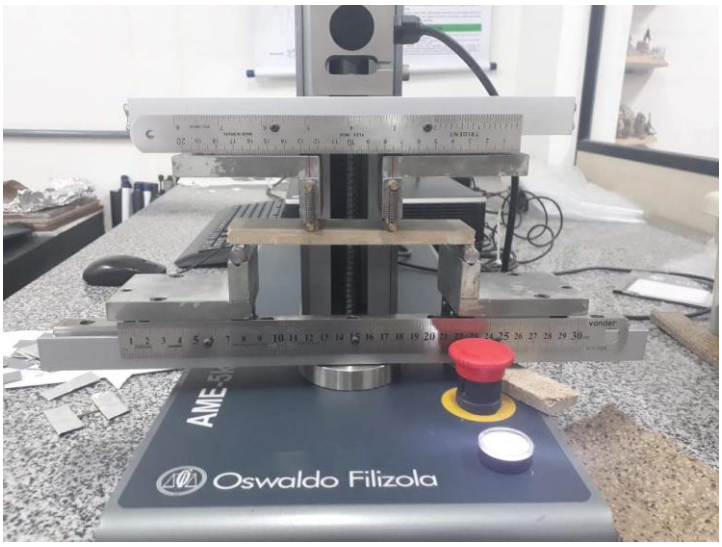


Figura 22: Execução do ensaio de flexão em 4 pontos

Foram ensaiadas 4 amostras para cada subgrupo e a partir destes foram determinados os valores de módulo de ruptura (MOR), limite de proporcionalidade (LOP), módulo de elasticidade (MOE) e energia específica (SE). Estes parâmetros foram calculados de acordo com o procedimento estabelecido pela RILEM 19 TFR e adaptados em pesquisas de Tonoli *et al*., 2007, Tonoli *et al*., 2009; Almeida *et al.,* 2013; Correia *et al*., 2014; FONSECA *et al.,* 2019; OJO *et al.,* 2019; Santos *et al.,* 2019; TONOLI *et al.,* 2019 e OJO *et al.,* 2020.

As fórmulas matemáticas utilizadas para os cálculos do LOP, MOR e MOE. Estão descritas nas equações a seguir:

$$LOP = \frac{Plop \times Lv}{b \times h^2} \qquad (1)$$

$$MOR = \frac{Pmáx \times Lv}{b \times h^2} \qquad (2)$$

$$MOE = \frac{276 \times Lv^3}{1296 \times b \times h^3} \times m \qquad (3)$$

Onde Plop representa a carga no ponto superior da parte linear da curva carga x deflexão, Pmáx é a carga máxima suportada pelo compósito, Lv é medida do maior vão de ensaio, b e h são respectivamente a largura e a espessura das

placas ensaiadas. Por sua vez, m é a tangente do ângulo de inclinação da curva força x deflexão durante a deformação elástica.

Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente por meio da Análise Variância (ANOVA) seguido pelo teste de Tukey com nível de significância de 0,05 com a utilização do software PAST 3.26.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Tecido de Juta e Malva

Análises Térmicas (TG/DTG)

A Figura 23 apresenta os resultados obtidos para as análises térmicas (TG/DTG) para o tecido de juta e malva em estudo, onde podem ser observados na curva DTG 4 picos que apresentam perda de massa na curva TG. O primeiro trecho por volta de 100 °C está relacionada com a perda de água das fibras onde na amostra resultou em uma perda de massa de 9,95% (MARQUES, 2009; CAVALCANTE, 2017; FERREIRA *et al*., 2017; MENDES, 2019), o pico de maior intensidade desta faixa situa-se em 56,42 ºC. O segundo pico em 282,48 ºC está relacionado com decomposição da hemicelulose, ocorre uma perda de massa de 10,41% nas faixa de temperatura de 248,31 ºC a 300,37 ºC (FERREIRA *et al*., 2017; MENDES, 2019).

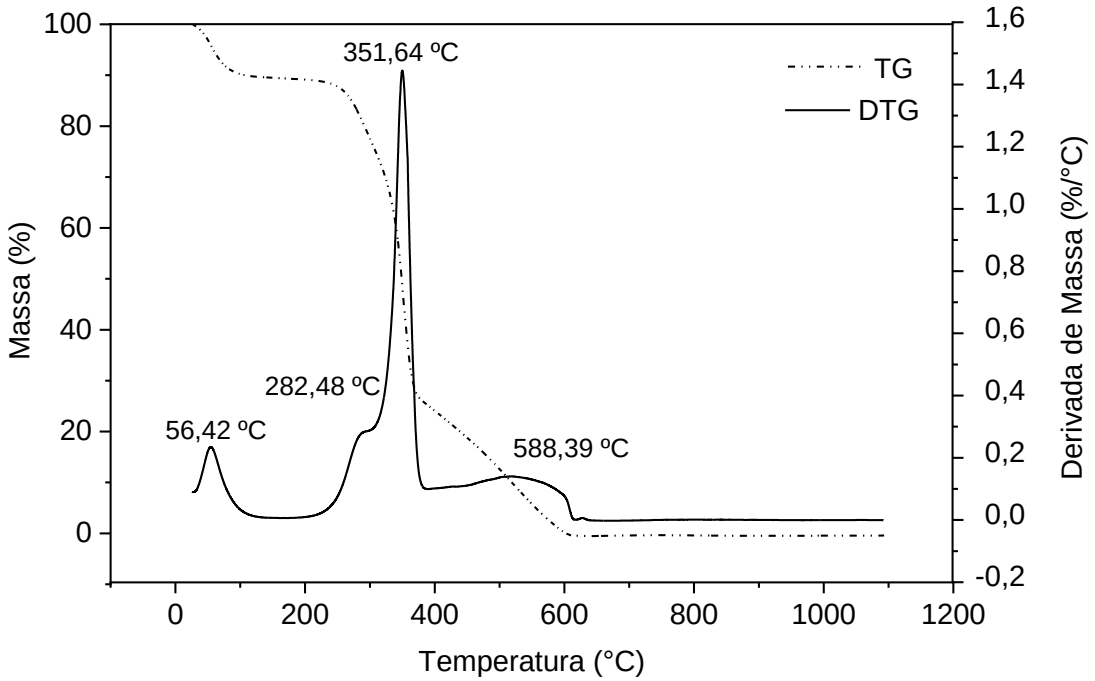


Figura 23: Análise térmica do tecido de juta e malva *in natura*

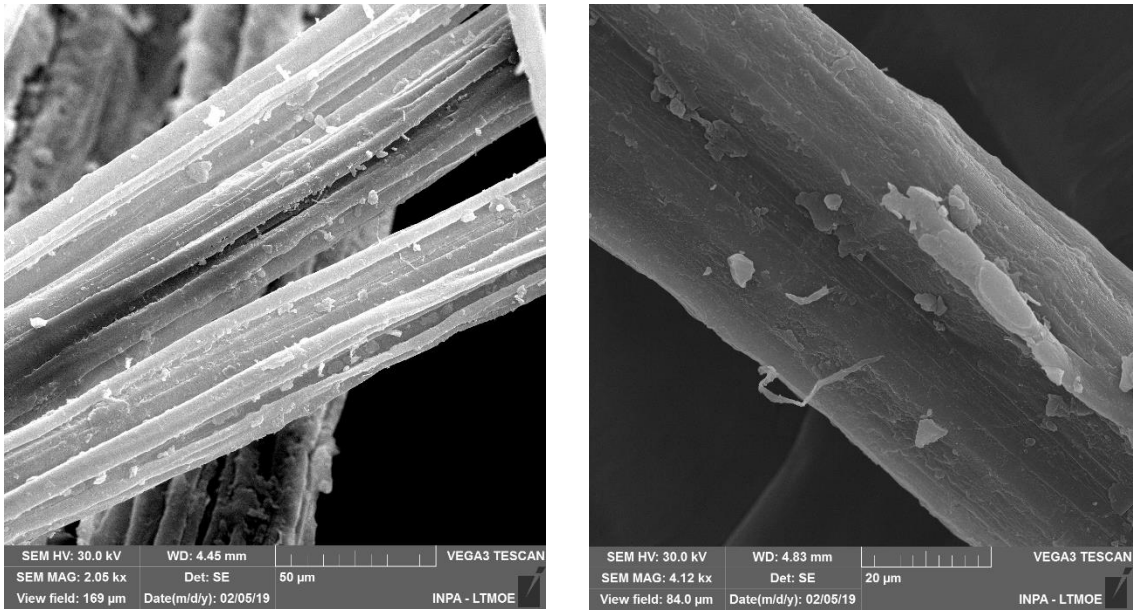
O terceiro pico em 351,64 ºC corresponde a perda de massa decorrente da degradação da celulose, onde a faixa de perda ocorrida de 350 a 400 ºC é característica da mesma (MARQUES, 2009; CAVALCANTE, 2017; FERREIRA *et al*., 2017; MENDES, 2019). Neste intervalo ocorre a maior perda de massa da amostra, cerca de 53,37%. Ao final do terceiro pico observa-se que há um quarto pico em

588,39 ºC e uma perda de massa de 24,26% de 400 a 606,66 ºC que corresponde a decomposição lenta da lignina, que geralmente ocorre por volta de 200 a 600 ºC.

Morfologia (MEV)

As morfologias apresentadas na Figura 24 foram realizadas no cordão e seção longitudinal do tecido de juta e malva. Segundo Marques (2015) os pontos brilhosos (superfície cerosa) visualizados nas imagens (Figuras 24.a e 24.b) podem se tratar de polissacarídeos que atuam como uma camada protetora natural das fibras.

Segundo Cavalcante (2017) esta superfície também pode estar associada ao uso de óleo de palma na fabricação do tecido de juta e malva natural. Tal fato pode ser prejudicial para a aderência entre a fibra e a matriz. Porém, pode evitar a evaporação da água natural das fibras (MARQUES, 2015).



(a) (b)

Figura 24: a) Microestrutura do cordão do tecido de fibras- 50 µm. b) seção longitudinal da fibra estudada- 20 µm.

4.2 Materiais finos: Cimento, metacaulinita, calcário e pó de pedra

Composição química (FRX)

O cimento *Portland* CP I- S-40 foi utilizado como referência por ser composto basicamente por clínquer e gipsita (no mínimo 95%) e o restante, cerca de 5% de adições confome preconiza a ABNT NBR 5732.

Um dos aspectos mais comentados na utilização de fibras vegetais em compósitos cimentícios está relacionado com a sua durabilidade em ambientes alcalinos como o das matrizes cimentícias. Pois podem sofrer decomposição (OLIVEIRA, 2014; MARQUES, 2015; CAVALCANTE, 2017; MENDONÇA, 2018). Uma das soluções utilizadas para mitigar essa degração é utilizar as fibras em uma matriz livre de hidróxido de cálcio. Para isso são utilizadas alternativas como o uso de materais pozolânicos em substituição parcial ao cimento.

Nesta pesquisa foi utilizada a metacaulinita obtido por meio de amostras de um solo argiloso caulinítico.

A tabela 8 apresenta os principais elementos encontrados na composição química dos materiais utilizados na produção das placas cimentícias.

As amostras do solo argiloso utilizado para a produção de metacaulinita apresentaram em sua composição química a predominância da sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), de acordo com os dados da tabela 8. Tais elementos são compatíveis com a composição química da caulinita (Al_2O_3. $2SiO_2H$. $2H_2O$), principal elemento presente na amostra.

Verifica-se que há uma pequena diferença entre os elementos do solo argiloso e da metacaulinita. Isso ocorre, pois, a queima não altera a composição química do material natural, porém promove a remoção de água estrutural das amostras calcinadas (LORENTZ *et al*., 2018).

A sílica e a alumina presentes na amostras dão um indicativo do potencial pozolânico do material utilizado, uma vez que os compostos mais encontrados são os responsáveis pela reatividade química com o hidróxido de cálcio, que levam à formação de compostos com propriedades cimentícias (CAVALCANTE, 2017).

Além destes elementos, atenta-se para o elevado teor de Fe_2O_3 presente na amostra, cerca de 12%. O mesmo é responsável pela coloração mais avermelhada do material.

Tabela 8: Composição química do cimento utilizado

Compostos	Cimento (%)	Argila (%)	Metacaulinita (%)	Calcário (%)	Pó de Pedra (%)
CaO	74,79	0,22	0,20	84,42	6,77
SiO_2	12,18	46,85	46,78	7,74	56,50
Fe_2O_3	4,77	12,83	11,56	2,51	14,48
SO_3	3,69	-	-	-	-
Al_2O_3	2,52	36,15	37,99	2,91	11,79
P_2O_5	0,50	0,90	0,68	0,35	1,24
K_2O	0,49	0,04	0,04	0,73	6,43
MgO	0,33	-	-	0,85	1,18
TiO_2	0,12	2,49	2,31	0,24	0,88
Mn	0,14	-	-	0,02	0,17
Outros	0,47	0,52		0,23	0,56
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	-	95,83	96,33	-	-
Perda ao Fogo	-	16,19	2,72	-	-

As normas que tratam dos assuntos acerca de materiais pozolâncios, como NBR 12653 (2014) e ASTM C618 (2014) estabelecem uma parcela mínima de 70% em massa de SiO_2, Al_2O_3 e FeO_3 para possível utilização como material pozolânico. Nas amostras é possível observar os valores de 95,83 % e 96,33%, respectivamente para argila e metacaulinita.

Os valores de perda ao fogo foram obtidos com base nas curvas TG das amostras a 950 °C.

Observa-se que o fíller calcário é composto principalmente por óxido de cálcio (CaO) e em menores proporções por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Ao contrário do fíller proveniente do pó de pedra composto principalmente por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e ferro (Fe_2O_3).

Composição mineralógica (DRX)

O difratograma obtido para o cimento *Portland* CP I-S-40 (Figura 25) apresenta as principais fases presentes no material utilizado. Podem-se observar a alita (Ca_3SiO_5), belita (Ca_2SiO_4), a calcita ($CaCO_3$) proveniente do fíller calcário que compõe o cimento, além da dolomita ($CaMg(CO_3)_2$) e da portlandita ($Ca(OH)_2$).

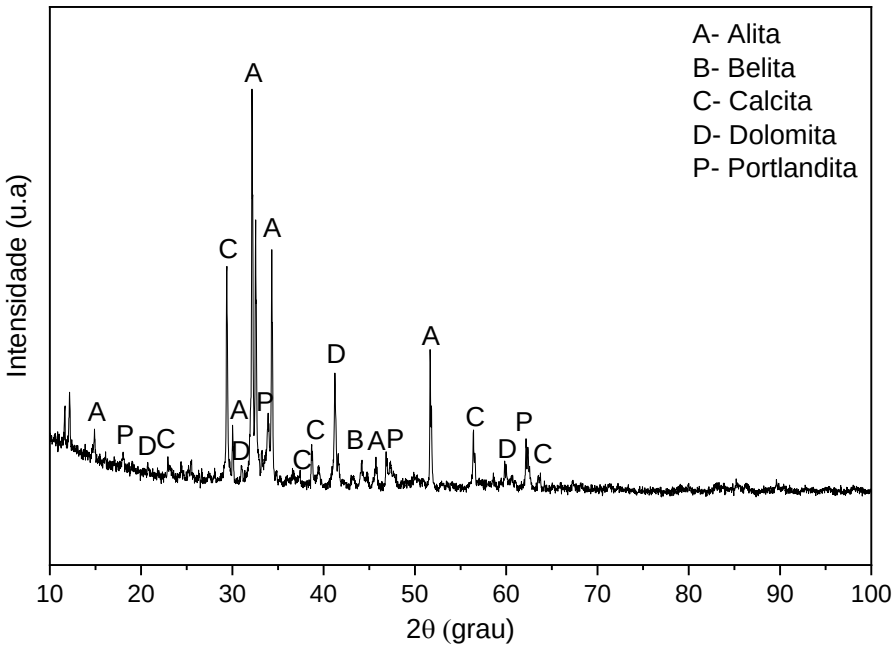


Figura 25: Difratograma obtido para o cimento utilizado

Na Figura 26 são apresentados os padrões de difração para a argila cauliníticas e metacaulinita analisadas. Onde foi identificada a caulinita como o principal argilomineral presente. O quartzo presente na amostra foi identificado por meio da aparição de picos intensos e pontiagudos no difratograma.

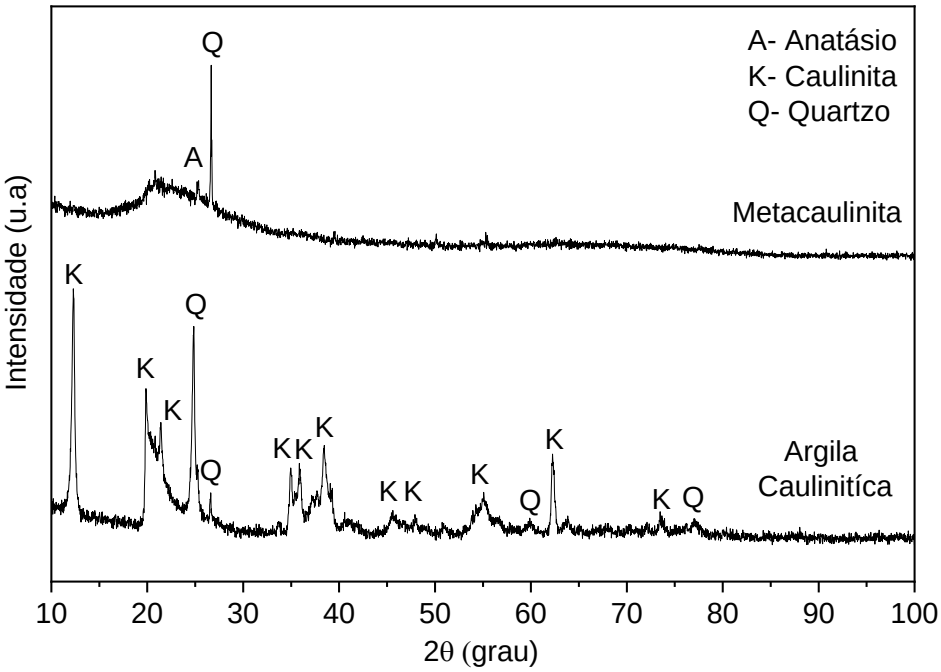


Figura 26: Difratograma obtido para amostra de argila caulinítica e metacaulinita

Observa-se no difratograma os picos caracterísiticos da caulinita situados em 2θ de 12º a 25º e entre os ângulos 2θ 35º a 40º (BARATA; ANGÉLICA, 2012). Na

amostra de metacaulinita, a qual já passou pelo processo de queima a 700 °C por cerca de 2h, nota-se a perda desses picos. Tal fator indica perda de cristalinidade de amostra, o que leva ao alargamento do pico situado em 2θ = 15°- 35°. A este alargamento atribui-se o nome de halo amorfo, que evidencia as transformações do solo natural (MORSY *et al*., 2018).

Nas Figuras 27 e 28 são apresentados os difratogramas do fíller calcário e de pó de pedra, onde foram observados picos característicos no calcário que indicam a presença de calcita ($CaCO_3$), dolomita ($CaCO_3.MgCO_3$) e quartzo (SiO_2). As fases encontradas são iguais as encontradas por Marques (2016) para o calcário empregado na sua pesquisa.

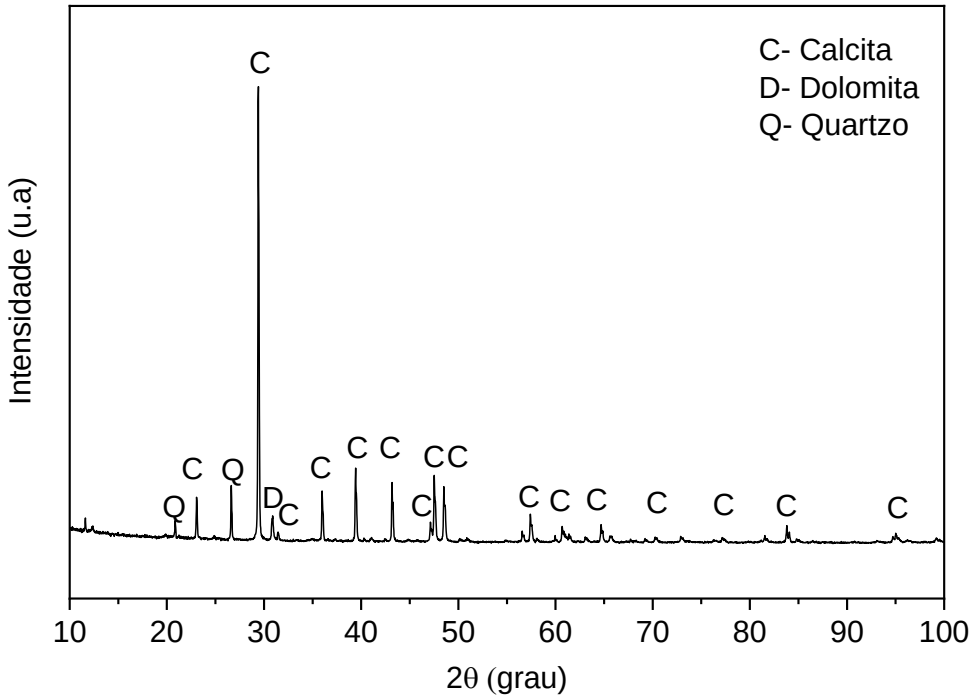


Figura 27: Difratograma do fíller calcário

Por sua vez no fíller proveniente de pó de pedra foram identificados a anortita ($CaAl_2Si_2O$), a dolomita e o quartzo como principais fases presentes.

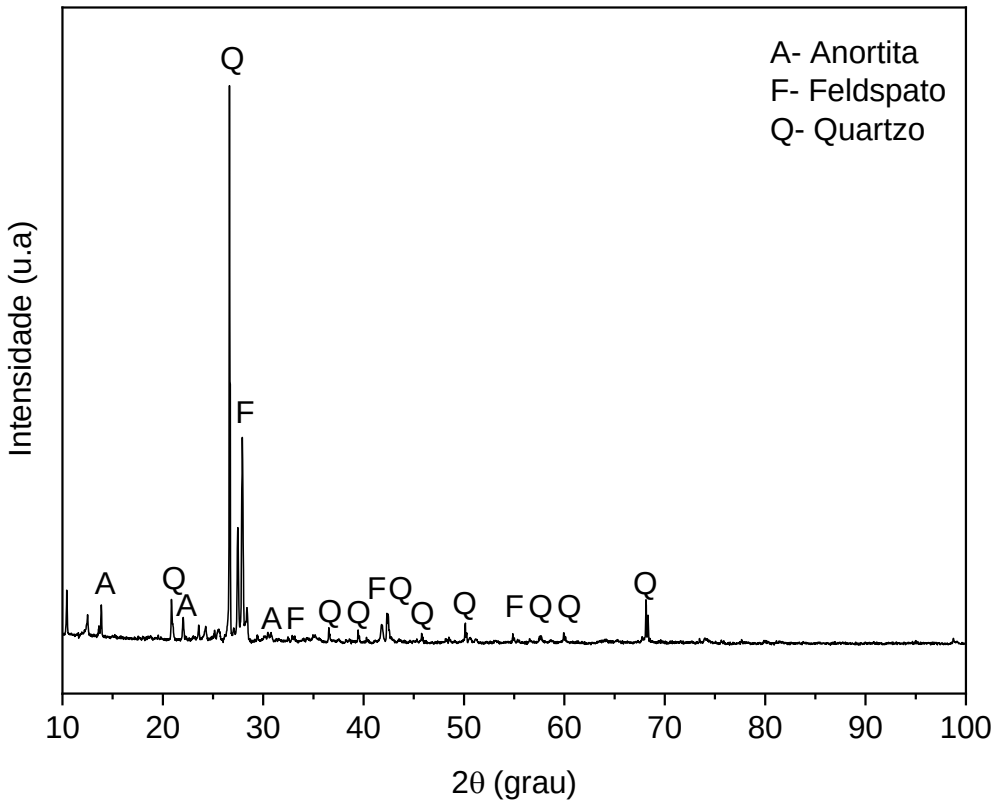


Figura 28: Difratograma do fíller de pó de pedra

Nestas amostras pode ser observado que as mesmas não apresentam o halo amorfo característico de materiais pozolânicos, o que indica alto grau de cristalinidade.

Massa Específica

A Tabela 9 apresenta os valores de massa específica obtidos para os materiais utilizados. Os resultados dos ensaios de caracterização do cimento utilizado foram comparados aos obtidos em estudos de Cavalcante (2017) que obteve 3,23 g/cm³ e Soares (2016) com o valor de 3,19 g/cm³.

O valor obtido para a massa específica conforme Tabela 6 é 3,72% menor que o resultado de Cavalcante (2017) e 2,57% menor que o de Soares (2016).

Tabela 9: Valores obtidos para a massa específica para os materiais utilizados

Materiais	**Massa Específica (g/cm³)**
Cimento CP I S 40	3,11
Metacaulinita	2,71
Calcário	2,96
Pó de Pedra	2,82

A metacaulinita apresentou valores de massa específica semelhantes ao de Cavalcante (2017) que obteve 2,89 g/cm³ e Marques (2016) com 2,66 g/cm³ (2015) (Tabela 8). Onde o valor médio obtido é 6,64% menor que valor de Cavalcante (2017) e 1,88% maior que o resultado de Marques (2016).

Para os valores de massa específica dos dois tipos de fíller utilizado, o resultado obtido para o calcário é 5,33% maior que o valor de 2,81 obtido por Marques (2016) para este mesmo material, porém, tanto este valor quanto aquele obitdo para o pó de pedra pode ser considerado normal para um material de preenchimento.

Granulometria

A distribuição das partículas de metacaulinita devem ser similares a do cimento para garantir o efeito físico proporcionado pela substituição deste pelas pozolanas em matrizes cimentícias (CAVALCANTE, 2017). A Figura 29 apresenta as curvas granulométricas dos quatro materiais utilizados.

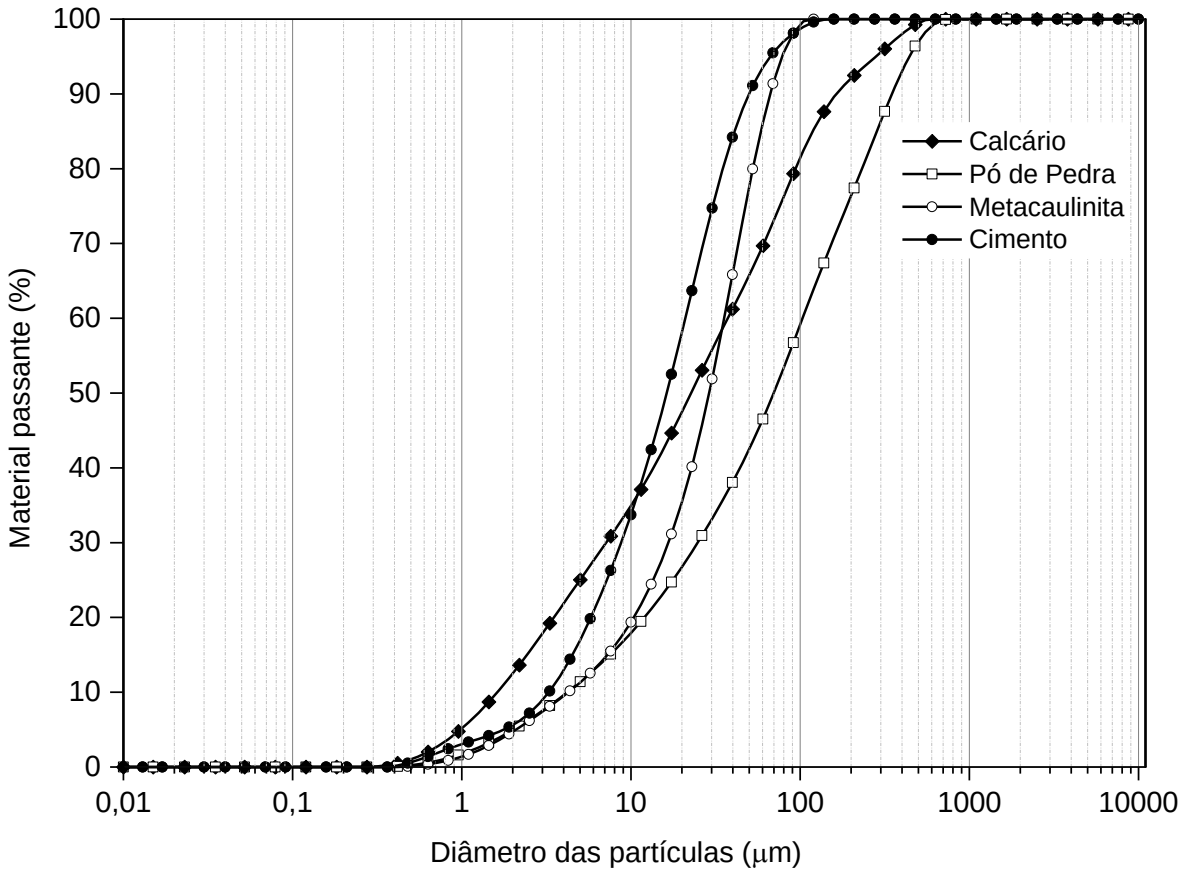


Figura 29: Distribuição granulométrica dos materiais em pó utilizados na pesquisa

É possível observar que as curvas granulométricas do cimento e da metacaulinita são semelhantes, porém a metacaulinita apresenta grãos maiores. Fato que é confirmado por meio da comparação entre os valores de D10, D50 e D90 dos materais que estão especificados na Tabela 9. O aumento desses índices foi de 30,58%, 78,07% e 33,47%, respectivamente, da metacaulinita em relação ao cimento.

A Tabela 9 apresenta os diâmetros D10, D50 e D90 dos materiais utilizados, que são definidos como os tamanhos de partícula abaixo dos quais se encontram 10%, 50% e 90% da massa do material, respectivamente. Além disso, mostra a faixa de obscuração do equipamento utilizado para cada material, assim como o resíduo.

Com relação ao fíller calcário e de pó de pedra, observa-se que os grãos do pó de pedra são maiores. No comparativo entre os índices das amostras o aumento da dimensão das partículas foi de 159,25% para o D10, 208,57% para D50 e 112,94% para D90. Fato que evidencia a granulometria mais grossa do pó de pedra.

Tais fatores podem influenciar no empacotamento e fluidez da matrizes cimentícias produzidas.

Tabela 10: Características granulométricas para os materiais utilizados na pesquisa

Materiais	Obscuração (%)	Resíduo (%)	D90 (µm)	D50 (µm)	D10 (µm)
Cimento CP I S 40	15,95	1,83	49,81	16,28	3,27
Metacaulinita	12,25	0,65	66,48	28,99	4,27
Calcário	27,80	1,16	163,76	22,64	1,62
Pó de Pedra	15,48	0,67	348,72	69,86	4,20

Análises Térmicas (TG/DTG)

Na Figura 30 observam-se 3 picos endotérmicos na amostra do solo argiloso. O primeiro pico por volta de 39,46 ºC está associado a perda de água. O segundo pico em 345,09 ºC está relacionado a eliminação de água de hidróxidos de alumínio como a goetita e gibsita (Vieira *et al;* 2007; Vieira e Pinheiro, 2011).

A desidroxilação da caulinita geralmente ocorre associada a uma perda de massa de 13,76% (SHVARZMAN *et al*., 2003), a qual corresponde a sua transformação. Aparece associada a um evento endotérmico que ocorre nas faixas de 450 a 600 °C.

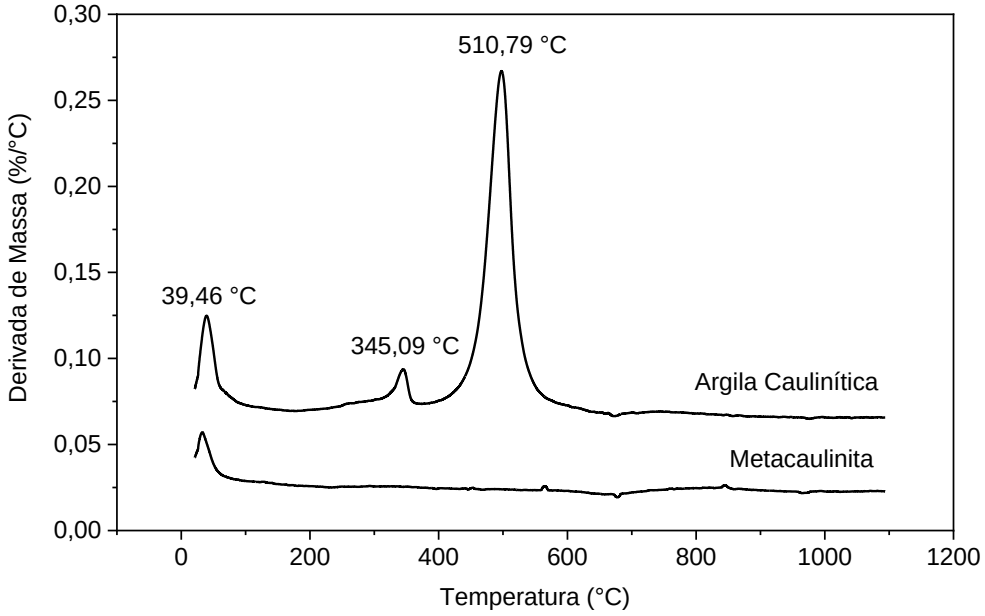


Figura 30: Curvas DTG obtidas para a argila caulinítica e metacaulinita

A temperatura inicial do intervalo de desidroxilação é de 400 °C, o centro do pico endotérmico aparece em 510,79 °C e temperatura final ocorre por volta de 650 °C (Figura 31).

Observa-se que na curva DTG para metacaulinita que ocorre o desaparecimento do pico de caulinita em 510,79 ºC, o que comprova a desidroxilação do argilomineral e sua transformação em material reativo (CAVALCANTE, 2017). Por meio desses resultados, considera-se que as condições de queima adotadas para a produção da metacaulinita foram suficientes.

Com o auxílio da curva TG (Figura 31) para uma avaliação quantitativa da eficiência das condições de calcinação utilizadas, foi calculada a diferença entre o teor de caulinita presente na amostra de argila cauliníticas e na metacaulinita. Avet e Scrivener (2018) consideram que a massa da amostra calcinada não é igual a massa da amostra natural, em função da evaporação.

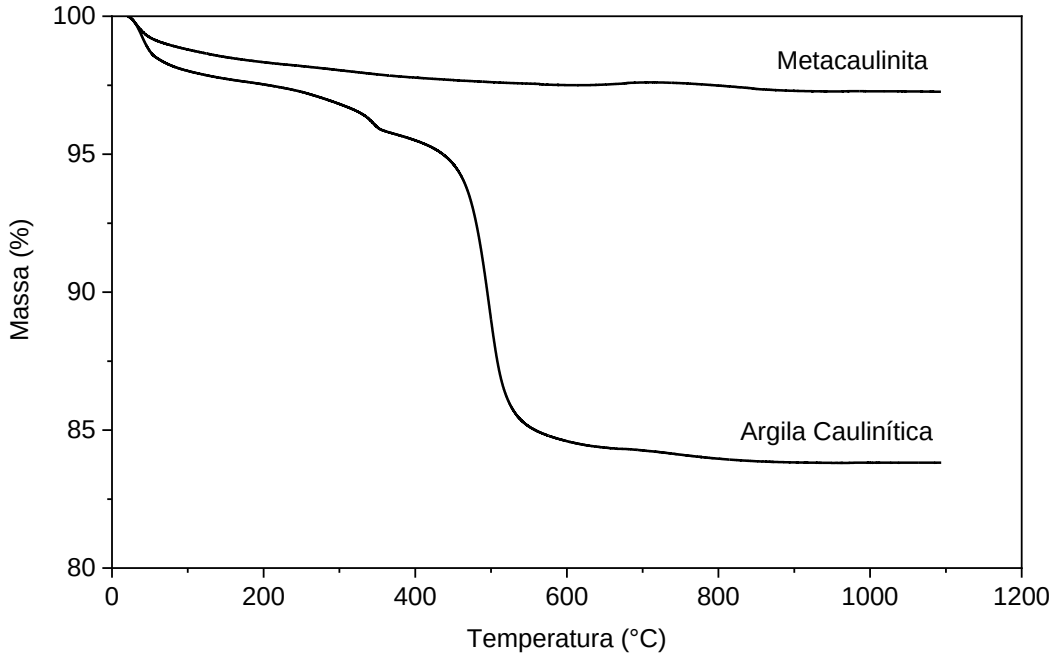


Figura 31: Curvas TG obtidas para a argila caulinítica e metacaulinita

A quantidade de caulinita transformada é calculada com base na perda de água restante para a amostra calcinada, de acordo com a seguinte equação:

$$\%metacaulim = \%M_{K\text{-}OH} \times \frac{M_K}{2 \times M_{H_2O}} - \%M_{Kcalc\text{-}OH} \times \frac{Mk}{2 \times M_{H_2O}} \times \frac{100 - \%M_{Kcalc\text{-}OH}}{100} \qquad (4)$$

Onde:

$\%M_{k\text{-}OH}$= perda de massa correspondente ao intervalo de desidroxilação da argila;

M_k= massa molar da caulinita (258,16 g.mol $^{-1}$);

M_{H2O}= massa molar da água (18,02 g.mol $^{-1}$);

$\%M_{kcal\text{-}OH}$= perda de massa residual no intervalo de desidroxilação da amostra calcinada;

Com base nas amostras obtidas para a argila calcinada e natural, por meio dos cálculos acima descritos foi possível verificar que cerca de 80% da caulinita presente na amostra natural foi transformada em metacaulinita.

Espectroscopia de Infravermelho (FTIR)

O espectro de infravermelho de argilas é caracterizado por bandas características de 3700 a 3600 $^{cm\text{-}1}$ (Figura 32) associadas a presença de hidroxilas (OH) da estrutura da caulinita (LORENTZ *et al*., 2018).

As bandas em 1091 cm^{-1} e 1101 cm^{-1} evidenciam a conversão da caulinita para metacaulinita. Além disso, o processo de calcinação induz ao rompimento da estrutura cristalina da caulinita e a transforma em metacaulinita.

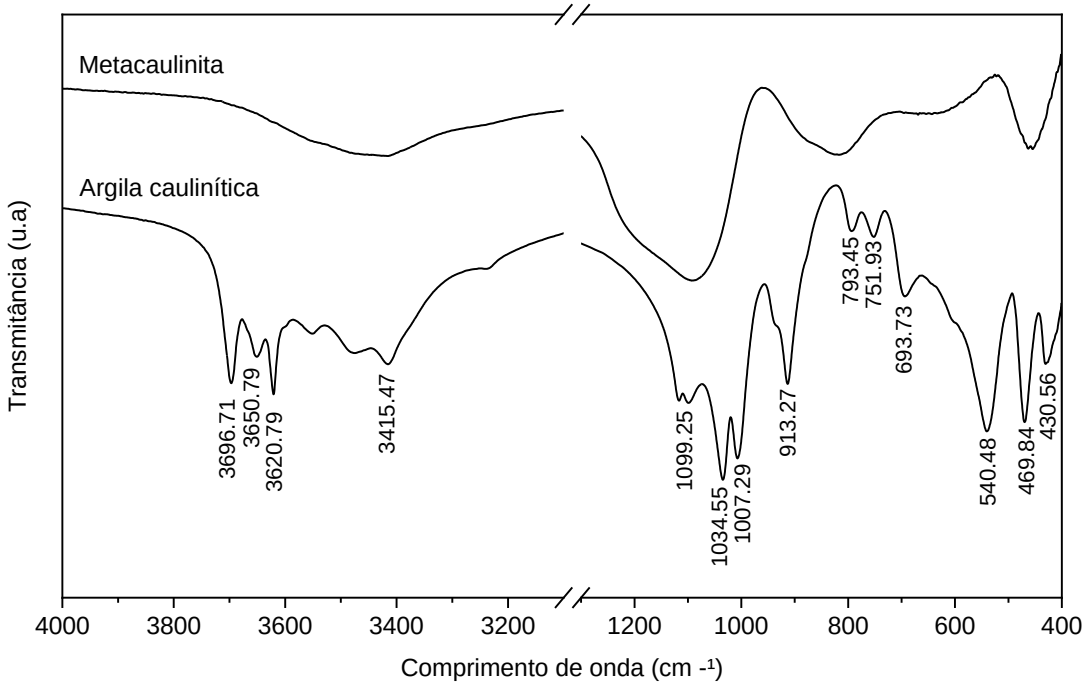


Figura 32: Espectro de infravermelho para a argila caulinítica e metacaulinita

A transformação para metacaulinita é indicada pela redução das bandas características de 3700 a 3600 cm^{-1} na amostra calcinada, como pode ser visto na

Figura 23. Isso indica a redução do grau de ordenação da caulinita, passando para o estado amorfo, onde as mesmas tendem a enfraquecer e depois desaparecer (LORENTZ *et al*., 2018).

4.3 Comportamento à flexão em 4 pontos

Placas com 2 camadas de reforço

Para as amostras produzidas com duas camadas de reforço foram obtidos os resultados apresentados na tabela 11. Onde as amostras foram analisadas por meio de análise de variância (ANOVA) para um nível de significância de 5%. Os resultados da Tabela 11 estão expressos nas médias obtidas para os parâmetros calculados.

Tabela 11: Dados para flexão em 4 pontos com amostras com duas camadas de reforço

Grupos	**Resistência na Flexão (MPa)**	**LOP (MPa)**	**MOR (MPa)**	**MOE (GPa)**
MCC	8,48	5,23	5,65	5,13
MPP	9,06	5,51	5,30	11,31
Valor-p	0,616	0,756	0,550	0,029

Para que estes apresentem diferença estatística é necessário que o valor-p seja menor que 0,05. Observa-se que para os dados de resistência na flexão, limite de proporcionalidade e módulo de ruptura, valor-p é maior que o nível de significância utilizado. Assim, pode-se concluir que os dados são estatisticamente iguais.

A utilização do calcário ou do pó de brita como fíller nos compósitos produzidos não resultou em influência nestas propriedades. Porém, nos dados relativos ao módulo de elasticidade dos compósitos observou-se que valor-p é menor que 0,05. Implicando em diferença estatística entre os dados.

Observa-se que houve melhora significativa no módulo de elasticidade dos compósitos com adição de pó de pedra (MPP), cerca de 120% de aumento em

relação ao de calcário (MCC). Este parâmetro indica que o compósito MPP é mais flexível do aquele produzido com MCC.

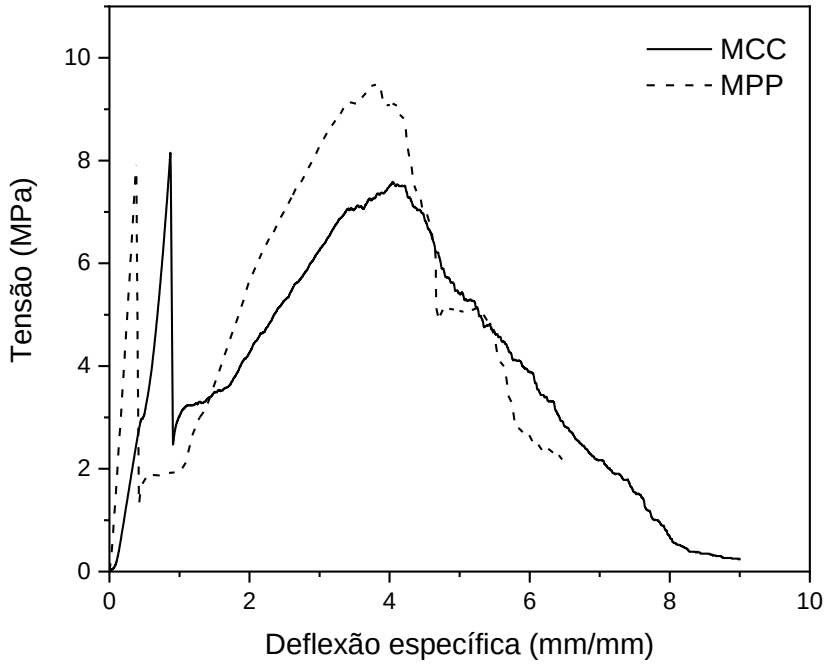
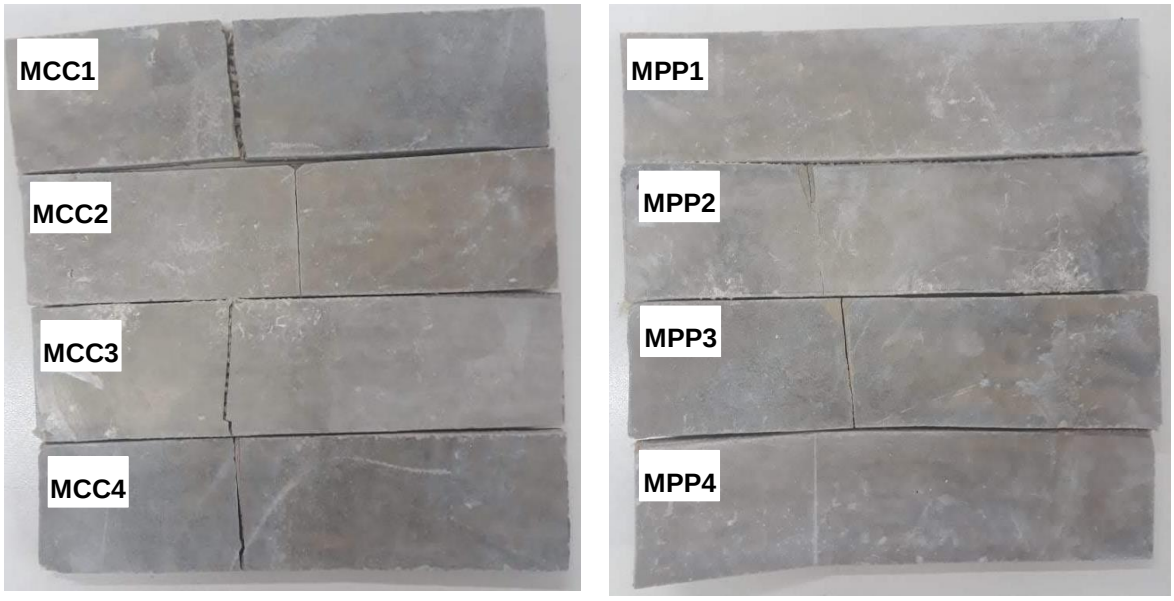


Figura 33: Curva de tensão x deformação para os compósitos MCC e MPP

A Figura 33, apresenta a curva tensão x deformação característica para compósitos reforçados com fibras. As curvas apresentam um região, logo após o limite de proporcionalidade, uma queda abrupta da tensão com uma rápida recuperação, indicando neste ponto o surgimento de uma fissura dominante, característico de compósitos nos quais o volume de fibra em relação a matriz está abaixo do volume crítico necessário a uma distribuição mais eficiente de tensões.

Considerando-se os dados apresentados, como não há diferença significativa entre a maioria dos parâmetros utilizados, optou-se pela utilização do calcário nas placas finais, uma vez que o mesmo produziu misturas mais fluidas que o pó de brita, ~~e~~ ofereceu menores obstáculos com sistema de injeção de argamassa utilizado na moldagem das placas e produziram compósitos menos flexíveis.

Na Figuras 34.a e 34.b é possível observar o comportamento dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio de flexão para ambos os materiais utilizados. Nas figuras observa-se o comportamento semelhantes das fissuras produzidas pela carga aplicada durantes a realização do ensaio. Observa-se que o estado de fissuração para ambos os compósitos é dominado por uma fissura principal, característico de compósitos com volume de fibras abaixo do crítico. Confirmando o que foi observado nos gráficos da Figura 33.



(a) (b)

Figura 34: a) Corpos-de-prova das placas produzidas com uso de calcário, b) Corpos-de-prova das placas produzidas com uso de pó de pedra

Placas com 4 camadas de reforço

Na tabela 12 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de flexão a 4 pontos para as placas com 4 camadas de reforço. Da mesma forma que as placas anteriores os resultados foram analisados por meio de análise de variância. Observa-se na tabela que valor-p é menor que o nível de significância utilizado de 5%, fato que implica em amostras com diferenças estatísticas entre os parâmetros utilizados.

Tabela 12: Parêmetros obtidos no ensaio de flexão em 4 pontos para as placas com 4 camadas de reforço.

Grupos	**Resistência na Flexão (MPa)**	**LOP (MPa)**	**MOR (MPa)**	**MOE (GPa)**
MN	9,12	5,67	6,07	6,40
MH	7,96	5,11	5,31	8,72
MEN	13,87	4,60	9,25	18,93
MEH	9,36	3,54	6,24	16,20

Valor-p	0,000033	0,000197	0,000033	0,000143

Dessa forma, para identificar as diferenças foi utilizado o teste de Tukey para cada um destes parâmetros. Na resistência à flexão, de acordo a Tabela 13 destacam-se as placas com adição de metacaulinita, tanto as reforçadas com tecidos naturais e hornificados. A adição da metacaulinita e tecido natural resultou em aumento de 52,08% em relação a mistura MN, sem adição de metacaulinita. Para a amostra com metacaulinita e tecido hornificado o aumento foi da ordem de 17,58%.

Tabela 13: Matriz de correlação entre as resistência à flexão das placas produzidas

	MN	**MH**	**MEN**	**MEH**
MN		0,4778	**0,000266**	0,988
MH	2,094		**3,32E-05**	0,3191
MEN	8,638	10,73		**0,000434**
MH	0,4542	2,548	8,184	

No limite de proporcionalidade também destacam-se as placas com adição de metacaulinita (Tabela 14). Porém, neste parâmetro ocorreu a redução de cerca de 18,80% e 30,72%.

Tabela 14: Matriz de correlação entre o LOP das placas produzidas

	MN	**MH**	**MEN**	**MEH**
MN		0,3606	**0,02828**	**0,00014**
MH	2,418		0,4214	**0,00199**
MEN	4,662	2,244		**0,03066**
MH	9,258	6,84	4,596	

No módulo de ruptura as placas com metacaulinita diferenciam-se estatisiticamente das demais (Tabela 15). A substituição da matriz cimentícia pela

mesma resultou em um aumento de 52,38% nas placas com tecido natural e 17,51% nas placas com tecido hornificado.

Tabela 15: Matriz de correlação entre o MOR das placas produzidas

	MN	**MH**	**MEN**	**MEH**
MN		0,4814	**0,000263**	0,9873
MH	2,085		**3,30E-05**	0,3192
MEN	8,652	10,74		**0,000432**
MH	0,4632	2,548	8,188	

No módulo de ruptura as placas com metacaulinita apresentam diferença significativa (Tabela 16) com relação as placas sem substituição. O aumento chegou a 195,78% para as placas com tecido natural e 85,77% para as placas com tecido hornificado.

Tabela 16: Matriz de correlação entre o MOE das placas produzidas

	MN	**MH**	**MEN**	**MEH**
MN		0,6838	**0,000288**	0,002346
MH	1,586		**0,001693**	0,01615
MEN	8,565	6,978		**0,5694**
MH	6,7	5,114	1,865	

Por meio das análises estatísticas é possível observar que o fator que realmente influencia a melhoria das propriedades analisadas trata-se da substituição da matriz cimentícia por metacaulinita. Não foram observadas diferenças significativas com relação ao tratamento ao qual os tecidos foram submetidos.

A Figura 35 apresenta a curva tensão x deformação das matrizes produzidas sem substituição de metacaulinita. Dessas curvas, observa-se que o compósito com tecido natural apresentou melhor comportamento mecânico em relação ao tecido hornificado, deste modo, indicando que o tratamento influenciou de modo negativo.

Comportamento semelhante foi observado para os compósitos produzidos com a substituição do cimento por metacaulinita (Figura 36).

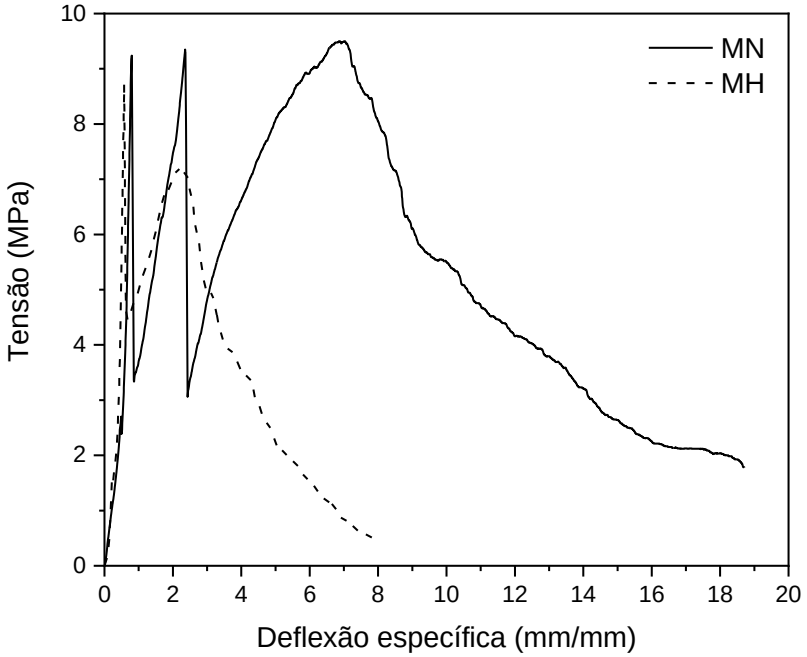


Figura 35: Curva tensão x deformação das matrizes produzidas sem substituição de metacaulinita

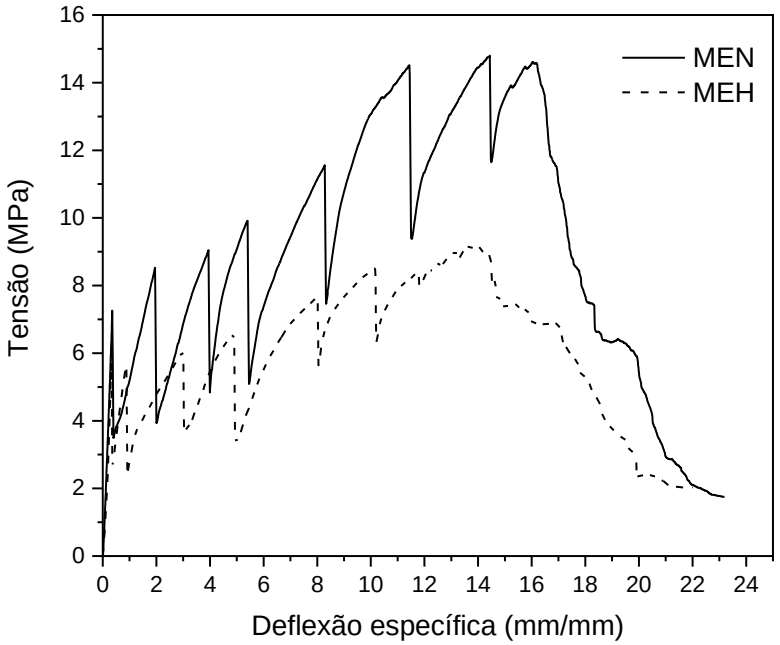
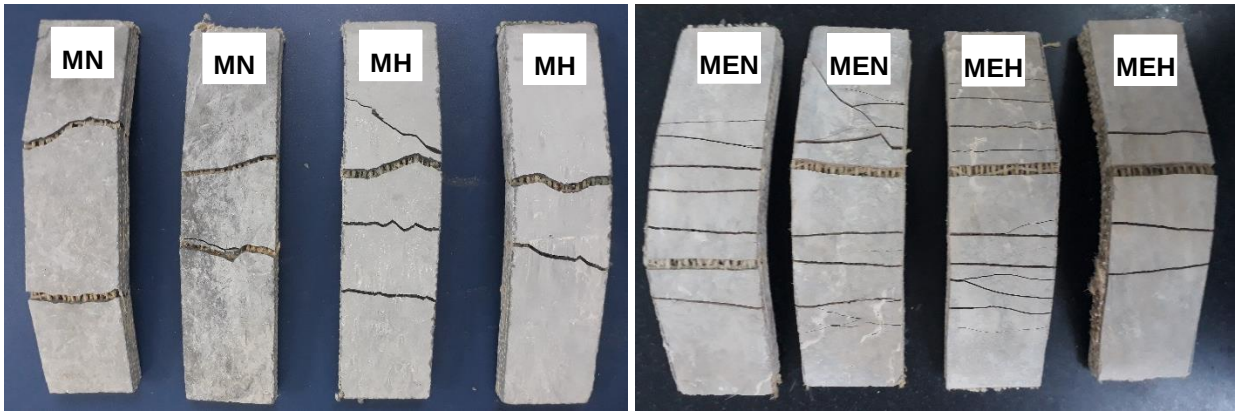


Figura 36: Curva tensão x deformação das matrizes produzidas com substituição de metacaulinita

Dos gráficos apresentados nas Figura 34 a 36 é possível identificar que o aumento do número de camadas melhorou o comportamento dos compósitos em termos do estado de fissuração, onde houve um aumento na quantidade de fissuras,

principalmente para os compósitos produzidos com metacaulinita, indicando para estes uma melhor distribuição de tensões na matriz produzidas pelo tecido. Isso pode ser confirmado pela Figura 37, onde é possível observar o estado de fissuração para as amostras submetidas ao ensaio de flexão.



(a) (b)

Figura 37: a) Corpos-de-prova das placas produzidas sem uso de metacaulinita, b) Corpos-de-prova das placas produzidas com uso de metacaulinita

5. CONCLUSÕES

Mediante os resultados apresentados foi possível concluir que:

O tecido de juta e malva são adequados para utilização como reforço das placas cimentícias.

A aplicação de metacaulinita em substituição do cimento é justificada tanto pelas suas características físicas, químicas e a granulometria próxima a do cimento utilizado. Foi possível observar que a composição química da metacaulinita atende aos requisitos normativos para utilização como pozolana. Além disso, por meio dos ensaios de DRX, FTIR e TG é evidenciada a efetividade da queima realizada nas amostras de argila. Uma vez que tal fator pode alterar a reatividade da mesma.

Tanto o fíller calcário como o pó de pedra utilizados em substituição ao agregado miúdo convencional (areia), apresentam granulometria próxima a do cimento. A escolha por um destes materiais não apresentou diferença estatística significativa com relação a resistência na flexão, limite de proporcionalidade e módulo de ruptura.

Optou-se pela utilização do fíller calcário nas placas finais, em função de ser possível produzir misturas com mais fluidez, além de compósitos menos flexíveis em relação àqueles com pó de pedra. Além disso, o diâmetro dos sistemas de mangueiras utilizado foi primordial para a escolha.

Assim, é possível concluir que nas amostras produzidas com a substituição da metacaulinita em relação ao cimento as propriedades mecânicas analisadas foram influenciadas de forma positiva mais efetiva que o tratamento de hornificação promovido nos tecidos, exceção do Limite de Proporcionalidade que apresentou diminuição quando tais tratamentos foram utilizados. Além disso, observou-se uma melhor distribuição de tensões nos compósitos produzidos com metacaulinita em relação aos de matriz de referência, com um número maior de fissuras, conforme o estado de fissuração apresentado pelas amostras submetidas ao ensaio de flexão.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros que podem complementar a pesquisa apresentada neste trabalho sugere-se:

- Análise da microestrutura dos compósitos produzidos por meio de Microscópia Eletrônica de Varredura;
- Análise da durabilidade dos compósitos por meio de ciclos de secagem e molhagem em ambiente controlado, avaliando-se as propriedades mecânicas entre os compósitos com e sem tratamento;
- Análise de parâmetros físicos dos compósitos por meio de ensaios de absorção, porosidade e permeabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOLA, O.s. *et al*. Utilisation of natural fibre as modifier in bituminous mixes: A review. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 54, p.305-312, mar. 2014. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.037.

AGUIAR, Alcineia Silva de. Estudos das propriedades físicas e mecânicas de placas cimentícias reforçadas com fibras longas de malva. 2016. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

ALMEIDA, A.e.f.s. *et al*. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. Cement And Concrete Composites, [s.l.], v. 42, p.49-58, set. 2013. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.05.001.

ALUJAS, Adrian *et al*. Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. Applied Clay Science, [s.l.], v. 108, p.94-101, maio 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.028.

ARDANUY, Mònica; CLARAMUNT, Josep; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 79, p.115-128, mar. 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5732: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991. 8 p.

BALLESTEROS, Julian Eduardo Mejia *et al*. Evaluation of cellulosic pulps treated by hornification as reinforcement of cementitious composites. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 100, p.83-90, dez. 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.044.

BARATA, M. S.; ANGÉLICA, R. S.. Caracterização dos resíduos cauliníticos das indústrias de mineração de caulim da amazônia como matéria-prima para produção de pozolanas de alta reatividade. Cerâmica, [s.l.], v. 58, n. 345, p.36-42, mar. 2012. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132012000100007.

BELCHIOR, Wallace Melo. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de microconcretos com substituição parcial do cimento por resíduos cerâmicos. 2017. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

BENTCHIKOU, Mohamed *et al*. Effect of recycled cellulose fibres on the properties of lightweight cement composite matrix. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 34, p.451-456, set. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.097.

BOURMAUD, Alain *et al*. Towards the design of high-performance plant fibre composites. Progress In Materials Science, [s.l.], v. 97, p.347-408, ago. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.05.005.

Callister Jr., W. D. Ciência e engenharia de materiais. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2008.

CAVALCANTE, Daiana Goes *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, [s.l.], v. 94, p.296-306, nov. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.10.001.

CAVALCANTE, Daiana Góes. Estudo das características física, mecânica e química de compósitos cimentícios reforçados com tecido de juta e malva tratado e adição de materiais pozolânicos. 2017. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

CHENG, Hongfei *et al*. The thermal behavior of kaolinite intercalation complexes-A review. Thermochimica Acta, [s.l.], v. 545, p.1-13, out. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2012.04.005.

CORREIA, Viviane da Costa *et al*. Potential of bamboo organosolv pulp as a reinforcing element in fiber–cement materials. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 72, p.65-71, dez. 2014. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.005.

DITTENBER, David B.; GANGARAO, Hota V.s.. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, [s.l.], v. 43, n. 8, p.1419-1429, ago. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019.

FERNANDEZ, Rodrigo; MARTIRENA, Fernando; SCRIVENER, Karen L.. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. Cement And Concrete Research, [s.l.], v. 41, n. 1, p.113-122, jan. 2011. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.013.

FERREIRA, Saulo Rocha *et al*. Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 139, p.551-561, maio 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.004.

FERREIRA, Saulo Rocha *et al*. Influence of natural fibers characteristics on the interface mechanics with cement based matrices. Composites Part B: Engineering, [s.l.], v. 140, p.183-196, maio 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.016.

FIDELIS, Maria Ernestina Alves *et al*. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. Journal Of Materials Research And Technology, [s.l.], v. 2, n. 2, p.149-157, abr. 2013. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.003.

FIDELIS, Maria Ernestina Alves; SILVA, Flávio de Andrade; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. The Influence of Fiber Treatment on the Mechanical Behavior of Jute Textile Reinforced Concrete. Key Engineering Materials, [s.l.], v. 600, p.469-474, mar. 2014. Trans Tech Publications. http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.600.469.

FONSECA, Camila Soares *et al*. Jute fibers and micro/nanofibrils as reinforcement in extruded fiber-cement composites. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 211, p.517-527, jun. 2019. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.236.

HOLLANDERS, Sofie *et al*. Pozzolanic reactivity of pure calcined clays. Applied Clay Science, [s.l.], v. 132-133, p.552-560, nov. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Produção Agrícola Municipal. Disponível em: http:// www.ibge.gov.br . Acesso em 05 de dezembro 2018.

ISLAM, Mohammad S.; AHMED, Syed Ju. Influence of jute fiber on concrete properties. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 189, p.768-776, nov. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.048.

JAWAID, M.; KHALIL, H.p.s. Abdul. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. Carbohydrate Polymers, [s.l.], v. 86, n. 1, p.1-18, ago. 2011. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.043.

JOHN, V.m. *et al*. Durability of slag mortar reinforced with coconut fibre. Cement And Concrete Composites, [s.l.], v. 27, n. 5, p.565-574, maio 2005. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.007.

KHORAMI, Morteza; GANJIAN, Eshmaiel. Comparing flexural behaviour of fibre–cement composites reinforced bagasse: Wheat and eucalyptus. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 25, n. 9, p.3661-3667, set. 2011. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.052.

LORENTZ, Brandon et al. Characterization of Florida kaolin clays using multiple-technique approach. Applied Clay Science, [s.l.], v. 161, p.326-333, set. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2018.05.001.

MARGEM, Jean Igor *et al*. Pullout Tests Behavior of Polyester Matrix Reinforced with Malva Fiber. Materials Science Forum, [s.l.], v. 869, p.371-376, ago. 2016. Trans Tech Publications. http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.869.371.

MARQUES, M. G. S. Caracterização das Propriedades da Fibra Vegetal de Arumã para Aplicação como Reforço à Matriz Cimentícia. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2009.

MARQUES, M. G. S. Estudo das Propriedades Físicas e Mecânicas e da Durabilidade de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibra Amazônica. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2015.

MARQUES, Maria Gorett dos Santos *et al*. Numerical-Experimental Assessment of the Arumã Fiber as Reinforcement to the Cementitious Matrix. Key Engineering Materials, [s.l.], v. 600, p.460-468, mar. 2014. Trans Tech Publications. http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.600.460.

MELO FILHO, J. A., 2012, Durabilidade Química e Térmica e Comportamento Mecânico de Compósitos de Alto Desempenho Reforçados com Fibras de Sisal, Tese Doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

MELO FILHO, João de Almeida; SILVA, Flávio de Andrade; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems. Cement And Concrete Composites, [s.l.], v. 40, p.30-39, jul. 2013. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.003.

MENDES, Ana Paula de Lima. Efeito da adição de fibras sintéticas e naturais nas propriedades físicas e mecânicas de argamassas autonivelantes com metacaulinita. 2019. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

MORSY, M.s. et al. Facile production of nano-scale metakaolin: An investigation into its effect on compressive strength, pore structure and microstructural characteristics

of mortar. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 172, p.243-250, maio 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.249.
OJO, Emeso B. *et al*. Effects of fibre reinforcements on properties of extruded alkali activated earthen building materials. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 227, dez. 2019. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116778.

OJO, Emeso B. *et al*. Statistical data on the physical and mechanical properties of fibre reinforced alkali activated uncalcined earth based composite. Data In Brief, [s.l.], v. 28, fev. 2020. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.dib.2019.104839.

OLIVEIRA, Igor Roberto Cabral. Propriedades mecânicas, físicas e químicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras longas de juta e de malva. 2013. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.

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

ONUAGULUCHI, Obinna; BANTHIA, Nemkumar. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. Cement And Concrete Composites, [s.l.], v. 68, p.96-108, abr. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.014.

PACHECO-TORGAL, Fernando; JALALI, Said. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 25, n. 2, p.575-581, fev. 2011. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024.

PICKERING, K.l.; EFENDY, M.g. Aruan; LE, T.m.. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, [s.l.], v. 83, p.98-112, abr. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038.

ROMA, Luiz C.; MARTELLO, Luciane S.; SAVASTANO, Holmer. Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 22, n. 4, p.668-674, abr. 2008. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.10.001.

SANTOS, Valdemir dos *et al*. Fiber-cement composites hydrated with carbonated water: Effect on physical-mechanical properties. Cement And Concrete Research, [s.l.], v. 124, out. 2019. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105812.

SILVA E SILVA, M ; SANTANA, G. P. . Caulinita: estrutura cristalina, técnicas físicas de estudo e adsorção. Scientia Amazonia , v. 2, p. 54-70, 2013.

SOARES, Geisiane Tavares. Sustentabilidade Socioambiental: um estudo de caso na cooperativa de fibras vegetais, malva e juta, de Manacapuru no Amazonas. 2015. 110f. Dissertação (Mestrado em Serviço Social) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2015.

TANGUY, Morgane *et al*. Polypropylene reinforcement with flax or jute fibre; Influence of microstructure and constituents properties on the performance of composite. Composites Part B: Engineering, [s.l.], v. 139, p.64-74, abr. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.061.

TONOLI, G.h.d. *et al*. Cellulose modified fibres in cement based composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, [s.l.], v. 40, n. 12, p.2046-2053, dez. 2009. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.09.016.

TONOLI, Gustavo Henrique Denzin *et al*. Influence of the initial moisture content on the carbonation degree and performance of fiber-cement composites. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 215, p.22-29, ago. 2019. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.159.

TONOLI, Gustavo Henrique Denzin *et al*. Performance and Durability of Cement Based Composites Reinforced with Refined Sisal Pulp. Materials And Manufacturing Processes, [s.l.], v. 22, n. 2, p.149-156, 2 fev. 2007. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1080/10426910601062065.

VIEIRA, C. M. F. and PINHEIRO, R. M.. Avaliação de argilas cauliníticas de Campos dos Goytacazes utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha. Cerâmica [online]. 2011, vol.57, n.343, pp.319-323. ISSN 0366-6913. http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132011000300010.

VIEIRA, C. M. F.; TERRONES, L. A.; SANCHEZ, R. and MONTEIRO, S. N.. Características e efeito da fração granulométrica < 2 µm no comportamento de queima de uma argila. Cerâmica [online]. 2007, vol.53, n.327, pp.249-254. ISSN 0366-6913. http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132007000300006.

VIZCAYNO, C. *et al*. Pozzolan obtained by mechanochemical and thermal treatments of kaolin. Applied Clay Science, [s.l.], v. 49, n. 4, p.405-413, ago. 2010. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2009.09.008.

ZUKOWSKI, Bartosz; SILVA, Flávio de Andrade; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Design of strain hardening cement-based composites with alkali treated natural curauá fiber. Cement And Concrete Composites, [s.l.], v. 89, p.150-159, maio 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.006.