

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

FERNANDA FERREIRA OIKAWA

**ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE FLEXÃO EM
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE MALVA**

MANAUS

2019

FERNANDA FERREIRA OIKAWA

**ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE FLEXÃO EM COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE MALVA**

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

Orientador: Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho

MANAUS

2019

Ficha Catalográfica

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

O39e Oikawa, Fernanda Ferreira
Estudo da caracterização mecânica de flexão em compósitos cimentícios reforçados com fibras de malva / Fernanda Ferreira Oikawa. 2019
75 f.: il. color; 31 cm.

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

1. malva. 2. fibras naturais. 3. metacaulinita. 4. compósitos cimentícios. I. Melo Filho, João de Almeida II. Universidade Federal do Amazonas III. Título



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº. 022/2019

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

DATA DO EXAME: 21/11/2019

DISCENTE: Fernanda Ferreira Oikawa

ORIENTADOR: Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho

BANCA EXAMINADORA: (Nome Completo)

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

Profa. Dra. Caren Michels (Membro Externo)

Prof. Dr. Rannier Marques Mendonça (Membro Externo)

TITULO DA PROPOSTA DE DISSERTAÇÃO: ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE FLEXÃO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRA DE MALVA.

LOCAL: Sala Multiuso II da Faculdade de Tecnologia

HORA DE INÍCIO: 09h00

De acordo com o Regimento Interno do Programa Pós – Graduação em Engenharia Civil, aprovados pelo Conselho de Ensino e Pesquisa/CONSEP/UFAM e CAPES, o (a) aluno (a) submeteu sua dissertação em forma escrita e oral, sendo após exposição de cerca de 47 minutos arguido oralmente pelos membros da banca, tendo tido como resultado:

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

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

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

Observações corrigir

Manaus, 21 de novembro de 2019

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

João de Almeida M. Filho

Profa. Dra. Caren Michels (Membro Externo)

Caren Michels

Prof. Dr. Rannier Marques Mendonça (Membro Externo)

R. Mendonça

Fernanda Ferreira Oikawa (Discente)

FERNANDA F. OIKAWA

Aos meus pais, Edson e Neidsonia, e ao meu irmão, Fábio, por serem o alicerce da jornada que trilhei até este momento, eu seria incapaz de alcançar qualquer vitória sem o apoio dos mesmos.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

O presente estudo envolve a produção e caracterização de compósitos de matriz cimentícia com adição de pozolana, reforçados com fibras de malva, nas formas de fios longos (orientados em uma única direção) para teores de 6%, 8% e 10% e de fios curtos (desorientados) com teor de 2%. A utilização de fibras naturais promove o conceito de sustentabilidade e pode melhorar o desempenho mecânico de compósitos cimentícios ao ser utilizada como reforço, desde que aplicado adequadamente. Portanto, o desenvolvimento de uma matriz cimentícia com redução de hidróxido de cálcio, através da incorporação de argila calcinada, sendo esta uma metacaulinita oriunda do caulim da região amazônica, tem a intenção de evitar a deterioração do reforço empregado. Os compósitos produzidos foram ensaiados mecanicamente, por meio de ensaio de flexão em quatro pontos. Os laminados com 10% de fibras longas tratadas, apresentaram ductilidade superior aos demais, o que se confirma pelo comportamento de múltipla fissuração e, ainda, uma tensão equivalente de flexão superior aos demais compósitos, que atinge em média 43MPa. Enquanto o compósito mais frágil atingiu uma média de 12MPa, para 2% de fibras curtas, além de apresentar ruptura brusca, sem quantidades significativas de fissuras visíveis.

Palavras-chave: malva, fibras naturais, metacaulinita, compósitos cimentícios.

ABSTRACT

The present research involves production and characterization of cementitious composites with pozzolan addition reinforced with mauve fibers, arranged in the form of short fibers (disoriented) with 2% volume and long fibers (oriented in one direction) for volumes of 6%, 8% e 10%. Natural fibers are very interesting in the field of scientific research, and promotes the concept of sustainability. Its improve the mechanical performance of cementitious composites when used properly applied as reinforcement. Therefore, the development of a cement matrix with calcium hydroxide reduction through the incorporation of calcined clay, which is a metakaolin from kaolin from the Amazon region, intends to avoid the deterioration of the reinforcement employed. The composites produced were mechanically tested by four point bending test. Laminates with 10% of treated long fibers have higher ductility than the other laminates produced, which is confirmed by the multiple cracking behavior and also an equivalent flexural stress higher, which averages 43MPa. While the most fragile composite reached an average of 12MPa, for 2% volume of short fibers, besides presenting sudden rupture, without significant amounts of visible cracks.

Key words: malva, natural fibers, metakaolin, cementitious composites.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos materiais compósitos.....	18
Figura 2 – Classificação quanto ao tipo de fibras.....	21
Figura 3 - Constituição estrutural de uma fibra vegetal	22
Figura 4 – Padrão de deformação na matriz ao redor de uma fibra que está submetida à aplicação de uma carga de tração	34
Figura 5 – Compósitos produzidos de acordo com o volume de fibras	35
Figura 6 – Metodologia adotada.....	36
Figura 7 – Curva granulométrica do CP I-S-40	37
Figura 8 – Curva granulométrica da areia	39
Figura 9 – Jazida de caulim vista (a) via satélite e (b) no local de retirada do material.	39
Figura 10 – Caulim no forno mufla, a ser calcinado.	40
Figura 11 – Curvas granulométricas dos materiais secos.....	41
Figura 12 – Fibras na forma (a) longa e (b) curta.....	42
Figura 13 – Equipamento utilizado para análise termogravimétrica	43
Figura 14 – Espectrômetro de fluorescência de Raios X da PANalytical - Epsilon 3XL	44
Figura 15 – Equipamento utilizado na difratometria de raios-X.....	45
Figura 16 – Representação do tronco de cone para ensaio de mini abatimento	46
Figura 17 – Execução do ensaio de mini abatimento.....	46
Figura 18 – Placa acrílica para moldagem dos compósitos reforçados com fibras curtas	48
Figura 19 – Uma camada de fibra longa, com detalhe da costura realizada.....	49
Figura 20 – Última camada de argamassa do laminado com reforço de fibras longas.	49
Figura 21 – Execução do ensaio de resistência à tração na flexão em 4 pontos.....	50
Figura 22 – Análise da Tensão para o Ensaio de 3 Pontos	51
Figura 23 – Análise térmica diferencial e termogravimétrica do caulim.....	53
Figura 24 – Análise térmica diferencial e termogravimétrica das pastas de cimento, com substituição por metacaulinita(50%) e sem substituição (0%), aos 28 dias.....	54
Figura 25 – Difratograma de raios X do caulim e da metacaulinita	56
Figura 26 – Resultados do ensaio de mini abatimento.....	57

Figura 27 – Curva típica de tensão equivalente de flexão x deflexão do MKSF.	58
Figura 28 – Curva típica de tensão equivalente de flexão x deflexão do compósito MKFC2.	59
Figura 29 – Compósito MKFC2 após rompimento à flexão.	59
Figura 30 – Curvas típicas de tensão equivalente de flexão x deflexão do MKSF e do MKFC2.	60
Figura 31 – Curvas típicas de tensão x deflexão dos compósitos MKFL6, MKFL8st e MKFL10st.	61
Figura 32 – Fratura dos corpos de prova do (a) MKFL6, (b) MKFL8st e (c) MKFL10st.	63
Figura 33 – Curvas típicas de tensão x deflexão dos compósitos MKFL8ct e MKFL10ct.	64
Figura 34 – Fissuras dos compósitos com após ensaio de flexão (a) MKFL8st e (b) MKFL8ct.	65
Figura 35 – Compósito MKFL10ct após ensaio de flexão com (a) comportamento de múltipla fissuração e (b) detalhe da abertura formada.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas das principais fibras vegetais utilizadas em compósitos	20
Tabela 2 – Composição química percentual de algumas fibras vegetais mais utilizadas	23
Tabela 3 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras de malva	25
Tabela 4 – Classificação das fibras de juta e malva.....	27
Tabela 5 – Exigências químicas dos materiais pozolânicos.....	29
Tabela 6 – Propriedades do cimento CP I-S-40.....	37
Tabela 7 – Propriedades da areia utilizada	38
Tabela 8 – Propriedades do aditivo químico	41
Tabela 9 – Propriedades do superplastificante ADVA CAST 525	42
Tabela 10 – Decomposição térmica dos produtos de hidratação do cimento	54
Tabela 11 – Variação de massa das pastas submetidas à análise termogravimétrica (TG).....	55
Tabela 12 – Análise química da metacaulinita	56
Tabela 13 – Resultado do ensaio de flexão para o MKSF.	58
Tabela 14 – Valores médios de tensão e deflexão do ensaio de flexão do MKSF e MKFC2.	60
Tabela 15 – Valores médios de tensão e deflexão do ensaio de flexão dos compósitos MKFL6, MKFL8st e MKFL10st.	62
Tabela 16 – Resultado do ensaio de flexão para os compósitos MKFL8.....	64
Tabela 17 – Valores típicos de tensão de pós fissuração em 12mm de deflexão	67

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Justificativa.....	14
1.2. Objetivos	15
1.3. Organização da dissertação.....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1. Materiais compósitos.....	17
2.1.1. Compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais	19
2.1.2. Fibras vegetais	20
2.1.2.1. Fibras de malva.....	24
2.1.2.2. Processo produtivo da fibra de malva	26
2.2. Matriz cimentícia	27
2.2.1. Reações pozolânicas.....	28
2.2.2. Compósito cimentício livre de hidróxido de cálcio	31
2.2.3. Durabilidade de compósitos cimentícios com fibras naturais	32
2.2.4. Tratamentos para melhorar tensão fibra-matriz de fibras naturais	33
3. METODOLOGIA	35
3.1. Materiais.....	36
3.1.1. Cimento Portland	37
3.1.2. Agregado miúdo	38
3.1.3. Metacaulinita.....	39
3.1.4. Água e aditivo superplastificante	41
3.1.5. Fibra natural.....	42
3.2. Métodos	43
3.2.1. Termogravimetria.....	43
3.2.2. Espectroscopia de fluorescência de raios X	44

3.2.3.	Difração de raios X	44
3.2.4.	Mini abatimento – Kantro	45
3.3.	Produção dos laminados	47
3.3.1.	Fibras Curtas	47
3.3.2.	Fibras Longas	48
3.4.	Resistência à flexão	49
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1.	Termogravimetria	52
4.2.	Espectroscopia de fluorescência de raios X.....	55
4.3.	Difração de raios X.....	56
4.4.	Mini abatimento – Kantro	57
4.5.	Comportamento dos compósitos à flexão	57
4.5.1.	Compósito com fibras curtas	58
4.5.2.	Compósitos com fibras longas.....	61
4.5.3.	Influência do tratamento das fibras.....	63
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
	ANEXO A	76

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

As fibras naturais, principalmente as de origem vegetal, representam um recurso renovável, e sua disponibilidade é praticamente ilimitada (PRASAD, S. V. et AL, 2001). Sua produção incrementa a economia agrícola e familiar (MARTINS NETO, 2011; MARGEM, 2013) e a utilização de fibras naturais se torna vantajosa devido ao baixo custo, quando comparadas às fibras sintéticas, que exigem maior consumo de energia e, conseqüentemente, apresentam um maior custo de produção (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2010).

Outro aspecto do emprego das fibras de origem vegetal é em relação a emissão de gases do efeito estufa, visto que sua produção envolve o plantio de organismos vegetais que são neutros neste quesito, representando uma alternativa sustentável (MARGEM, 2013).

A empregabilidade das fibras vegetais é diversa, abrange desde as aplicações clássicas na indústria têxtil até material de reforço de compósitos. Neste cenário as fibras aparecem, principalmente nos últimos anos, como alternativa de reforço de matrizes cimentícias, devido a proibição dos produtos reforçados com fibras de amianto (REBELO, 2016).

Oliveira (2017) destaca que os compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais vegetais, por sua vez, possuem diversas funcionalidades desde placas planas e corrugadas para elemento de cobertura, passando por painéis divisórios e revestimentos de pisos, até aplicação em paredes e forros entre outros. Entretanto, para cada aplicação se faz necessário a caracterização física, química, mecânica e térmica do novo material.

1.1. Justificativa

O uso de fibras para reforço de compósitos eram predominantemente com fibras de amianto. Contudo, devido à natureza cancerígena desta fibra, buscou-se alternativas no intuito de substituí-las em elementos de reforço nos compósitos. As fibras vegetais são abundantes, renováveis, atóxicas, de baixo custo, baixa densidade, elevada resistência e módulo específico, tornando-as uma alternativa com grande potencial de utilização na construção civil (MELO FILHO, 2012).

Neste contexto, os compósitos reforçados com fibras naturais, excetos os com amianto, representam uma solução para demanda por materiais sustentáveis. São uma alternativa para a construção civil, pois estes compósitos se apoiam nos três pilares da sustentabilidade ambiental: baixa emissão de gases do efeito estufa, baixo consumo de recursos naturais e baixa geração de resíduos (CBCS, 2011).

Outro aspecto importante do uso das fibras vegetais em compósitos cimentícios é que as mesmas promovem um aumento da resistência de tração na flexão, uma vez que matrizes cimentícias sem elemento de reforço possuem baixa resistência à tração. Desta forma, o uso de fibras vegetais neste tipo de compósito é tecnicamente compatível, pois melhora as propriedades mecânicas do material.

Em decorrência, principalmente, do aspecto sócio econômico, as fibras de juta (*Corchorus capsularis*), juntamente com as fibras de malva (*Urena Lobata, L.*), são consideradas como uma riqueza da economia agrícola da região Amazônica, em especial nos Estados do Amazonas e Pará (OLIVEIRA, 2013).

Todavia, a durabilidade do compósito cimentício reforçado com fibra vegetal de malva e juta também está ligado ao tipo de tratamento aplicado à matriz. Neste

estudo, a metacaulinita regional faz parte da matriz, em substituição parcial ao cimento *Portland*, de modo que reduza ou anule o hidróxido de cálcio gerado na hidratação, provendo menor alcalinidade, que é menos prejudicial às fibras vegetais.

Portanto, foram desenvolvidos e caracterizados compósitos com uma matriz cimentícia modificada, reforçados com fibra natural vegetal de malva, a fim de estimular a pesquisa, e consequente empregabilidade, destes materiais no ramo da construção civil.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento e caracterização mecânica por resistência à flexão de compósitos cimentícios reforçados com diversos teores de fibra vegetal de malva.

Quanto aos objetivos específicos, tem-se:

- Obtenção de um material pozolânico capaz de consumir o hidróxido de cálcio gerado pela matriz cimentícia;
- Verificar a forma de aplicação do reforço, a fim de tornar viável a produção dos laminados;
- Avaliar os compósitos produzidos, por caracterização mecânica de resistência à tração na flexão em quatro pontos.

1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos.

Capítulo 1: Introdução – No presente capítulo é feita uma breve introdução sobre fibras naturais vegetais, a serem aplicadas como reforço em elementos cimentícios, além da justificativa e objetivos deste estudo.

Capítulo 2: Referencial Teórico – Apresenta a revisão aprofundada de estudos consolidados, a fim de esclarecer características relevantes acerca do assunto.

Capítulo 3: Metodologia – É o capítulo onde estão descritos todos os materiais utilizados, e preparo dos mesmos. Bem como, os procedimentos experimentais adotados na pesquisa, como a produção dos laminados e a metodologia utilizada nos ensaios mecânicos.

Capítulo 4: Resultados e discussão – É feita a apresentação e a análise de todos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais utilizados e dos compósitos.

Capítulo 5: Considerações finais – Encontram-se as considerações gerais, de acordo com os resultados obtidos para os diferentes compósitos produzidos, além de sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Materiais compósitos

A norma americana da American Society for Testyng & Materials - ASTM D3878-95 estabelece que um material compósito é uma substância constituída de dois ou mais materiais, insolúveis entre si e quando combinados formam um material de engenharia útil, cuja propriedades não são encontradas nos materiais isoladamente.

Callister e Rethwisch (2012) complementam a definição ao determinar que os materiais compósitos são formados pela união de dois ou mais materiais, com uma interface que os distingue. Assim, os materiais compósitos contêm as propriedades de seus materiais constituintes, de tal maneira que a propriedade do compósito é oriunda da combinação das melhores propriedades dos seus materiais componentes.

Alguns aspectos devem ser levados em consideração sobre as propriedades dos compósitos como, por exemplo, as suas fases constituintes, as quantidades utilizadas de cada componente e a geometria da fase em dispersão (distribuição, orientação, forma e tamanho das partículas). Portanto, os compósitos são compostos por duas fases: fase contínua (matriz) e fase dispersa (reforço) (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

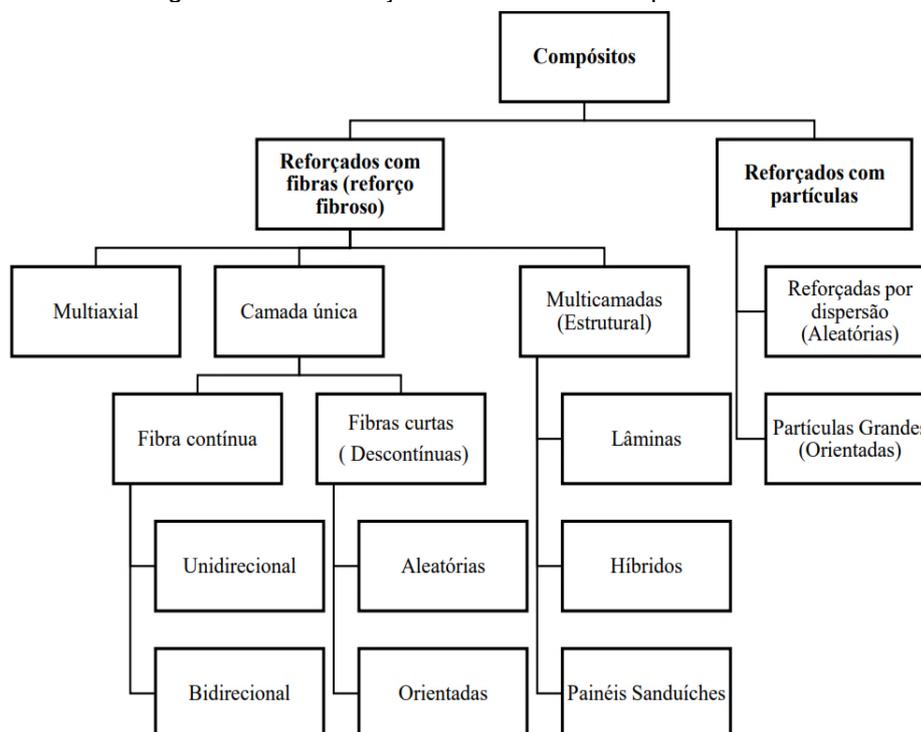
Canevarolo Júnior (2006) destaca que a combinação multifásica é análogo a arranjos existentes na natureza, como por exemplo, a madeira que é constituída por

fibras de celulose, flexíveis e resistentes, unidas pela lignina que é uma espécie de resina mais rígida. Dessa forma, as fibras da madeira são o reforço do compósito, e a lignina representa a matriz, o que caracteriza a constituição de um compósito devido a combinação do reforço com uma matriz.

A matriz do material compósito é caracteristicamente um material coesivo e adesivo, e tem por finalidade preservar a integridade estrutural do compósito por meio de ligação simultânea com a fase dispersa. Assim, a matriz é responsável por envolver a fase dispersa, protegendo o material de reforço, unindo os elementos e distribuindo os esforços. Por conseguinte, melhoram-se as propriedades da fase matricial incorporando outros constituintes, onde juntos, combinam-se para compor o compósito (MUELLER, 2004).

Callister e Rethwisch (2012) classificam os compósitos em função do tipo de matriz, do reforço, e seus arranjos, conforme mostra Figura 1.

Figura 1 - Classificação dos materiais compósitos



Fonte: CALLISTER; RETHWISCH, 2012 (adaptado).

Constata-se que os compósitos são divididos em dois tipos: reforçados com partículas e reforçados com fibras. Neste estudo desenvolveu-se um compósito

reforçado com fibras de origem vegetal, de malva. Para tanto, utilizou-se uma matriz cimentícia.

Os materiais compósitos reforçados com fibras datam desde o início da civilização humana no Antigo Egito e Mesopotâmia, como por exemplo, a mistura de argila com palha na fabricação de tijolos de adobe (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

No entanto, a aplicabilidade em termos de desempenho e comportamento das propriedades finais dos compósitos estão relacionados à adesão entre matriz e reforço, do tipo de matriz e da interface entre a fibra natural e a matriz contínua. Bem como, as propriedades dos compósitos dependem das características dos processos de fabricação utilizados, em especial os materiais brutos e tratamentos adicionais, como a modificação da superfície das fibras e ou modificação da matriz cimentícia por meio de adições (FARUK et al., 2012).

2.1.1. Compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais

Oliveira (2013) estabelece que compósitos cimentícios possuem como material aglomerante principal o cimento Portland comum, cujo mesmo é constituído de silicatos, aluminatos e cálcio.

Assim, ao se inserir fibras naturais na matriz cimentícia, obtém-se um compósito com propriedade de resistência superior ao da matriz cimentícia sem as fibras. Outro aspecto notável é durante a fissuração, pois a adição das fibras promove ao compósito um comportamento mais rígido ao invés da ruptura brusca (MELO FILHO, 2005).

As fibras de juta, linho, rami e sisal (convencionais) são fibras que possuem alto percentual de celulose, sendo indicadas para material de reforço em compósitos. Os percentuais elevados de lignina nas fibras de juta e sisal habilitam-nas a terem comportamento adicional de fortalecimento dos compósitos (SANTOS, 2006).

Algumas propriedades físicas e mecânicas destas fibras se encontram na Tabela 1. Propriedades como módulo de resistência à tração (σ_T), módulo de elasticidade (E), deformação à ruptura (ϵ_T) e a massa específica (P).

Tabela 1 – Propriedades mecânicas das principais fibras vegetais utilizadas em compósitos

Tipo de Fibra	σ_T (MPa)	E (GPa)	ϵ_T (%)	P (g/cm³)
Sisal	126-800	3,80-62,0	2,80-10	1,27-1,50
Malva	160	17,4	5,2	1,41
Juta	320-500	12,0-100	1,3-2,8	1,5
Coco	95-149	2,80-13,7	3,3-5,1	1,18-1,45
Piçava	143	5,6	5,9	1,05

Fonte: SATYANARAYANA *et al.*, 2007.

Além destas propriedades, as fibras vegetais lignocelulósicas apresentam propriedades que favorecem seu uso, enquanto material de reforço em compósitos, como por exemplo, reduzida massa específica, baixa maciez e abrasividade, potencial reciclável e biodegradável, não tóxica, baixo custo e consumo de energia na produção, baixa condutividade térmica e conseqüentemente funcionam como isolante térmico e acústico (SATYANARAYANA *et al.*, 2007).

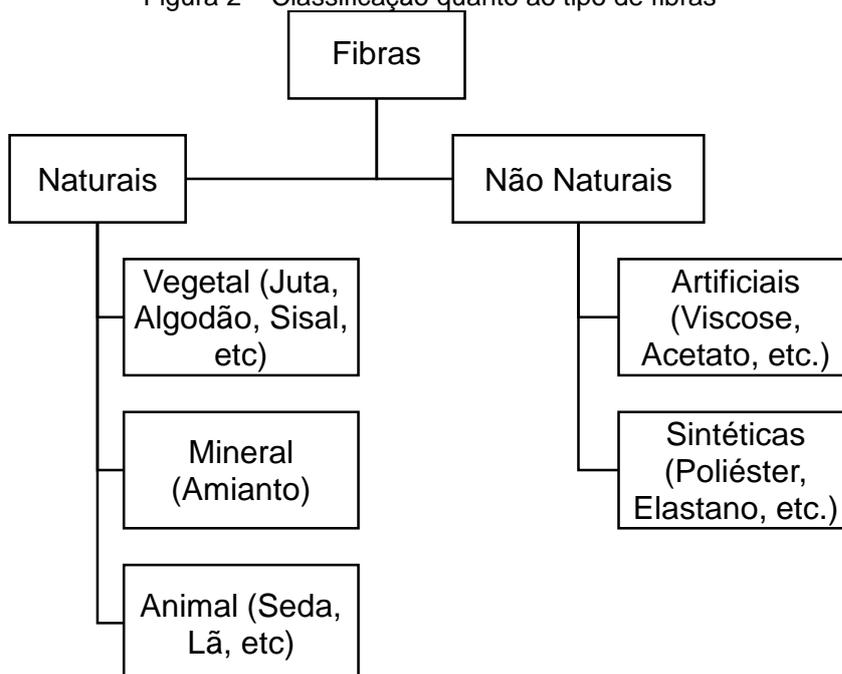
As fibras vegetais podem ser empregadas em compósitos, quanto ao tamanho, de forma curta ou longa, quanto a distribuição, de forma aleatória ou ordenadas. Entretanto, Fidelis (2014) destaca que a utilização das fibras longas e alinhadas em forma de tecido para o desenvolvimento de compósitos cimentícios representa a melhor solução física e mecânica (FIDELIS, 2014).

2.1.2. Fibras vegetais

Fibras vegetais são fibras celulósicas, uma vez que são ricas em lignocelulose, isto é, sua composição principal é formada por lignina, celulose e hemicelulose. Estas fibras vegetais possuem empregabilidade bastante ampla, abrangendo desde aplicações na indústria têxtil à aplicações como elemento de reforço em matrizes cimentícias (MARINELLI *et al.*, 2008).

As fibras podem ser classificadas como naturais e não naturais, conforme esquema apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Classificação quanto ao tipo de fibras



Fibras vegetais de plantas fibrosas (não-madeiras) constituem matéria-prima abundante e de baixo custo em muitos países em desenvolvimento (GUIMARÃES, 1990). Algumas fibras apresentam potencial para utilização como reforço em materiais compósitos. O sucesso em muitos campos de aplicação pode influenciar na escolha de métodos de produção e aproveitar o bom desempenho das fibras celulósicas (COUTTS, 1992).

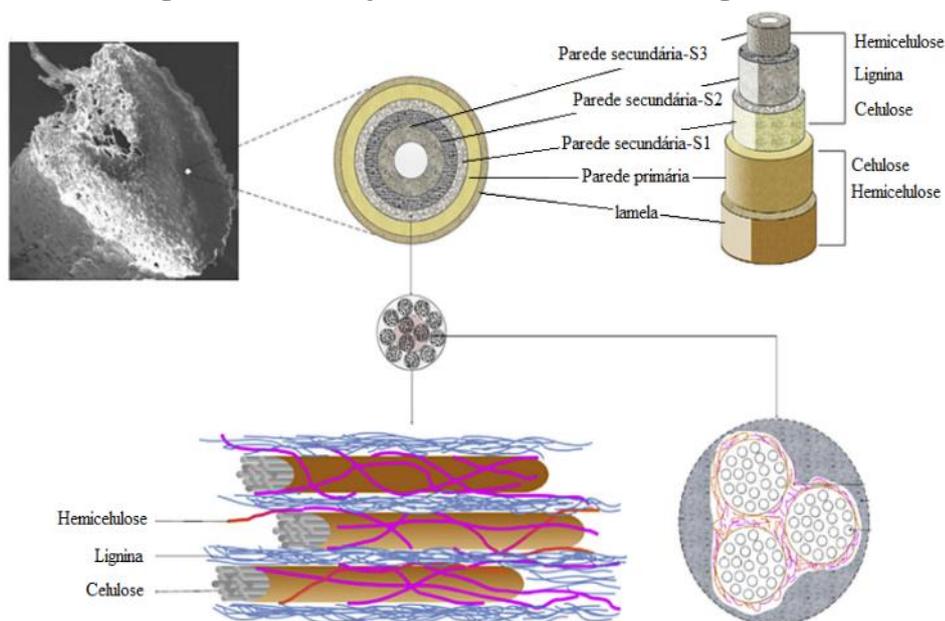
Outro aspecto importante das fibras vegetais é sua abundância, pois podem ser obtidas de um extenso número de plantas fornecedoras de fibras ou de materiais fibrosos, o que torna as fibras bastante acessíveis (MONTEIRO, et al, 2008).

Dessa forma, as fibras vegetais podem ser obtidas de diversas partes de uma planta. Portanto, podem ser oriundas do caule, folha e sementes ou frutos das plantas, tal como as fibras obtidas do caule, que são compostas por feixes de fibras, cada um contendo fibrocélulas individuais ou filamentos. Juta, malva, linho, cânhamo, são alguns exemplos desse tipo de fibra (THOMAS et al., 2011).

As fibras naturais podem ser consideradas materiais compósitos naturais. Na Figura 3 tem-se a estrutura de uma fibra vegetal, cuja mesma é constituída por uma parede principal fina, que é a primeira camada depositada durante o crescimento celular, e envolve uma parede secundária. A parede secundária é composta por três

camadas, sendo que a camada de espessura média determina as propriedades mecânicas da fibra. A parede celular das fibras não é uma membrana homogênea, são constituídas por microfibrilas, que apresentam diferentes orientações em cada parede celular e são unidas por uma matriz de lignina e hemicelulose (JOHN et al., 2008).

Figura 3 - Constituição estrutural de uma fibra vegetal



Fonte: WEI; MEYER, 2015.

Nos estudos das fibras vegetais interessa-se por características macroscópicas diretamente relacionadas ao comportamento dos compósitos produzidos, tal que, quando se busca por melhores propriedades mecânicas, por exemplo, os objetos de estudo são as dimensões das fibras e o volume de vazios existente, bem como a resistência à tração ou módulo de elasticidade (PINHEIRO, 2008).

A composição química das fibras naturais são basicamente constituídas por celulose, lignina, hemiceluloses, e integradas a outros materiais presentes em pequenas proporções como ceras e extrativos (ESMERALDO, 2006).

A composição química das lignoceluloses, componente majoritário das fibras vegetais, apresenta-se em quantidades variáveis em diferentes partes da planta,

dependendo de fatores como espécie vegetal, idade, condições de crescimento, entre outros fatores (REBELO, 2016).

A celulose está localizada principalmente nas paredes secundárias das células vegetais e compõe significativamente metade das madeiras, estima-se que cerca de 40 e 50% de quase todas as plantas é constituída de celulose. Outro aspecto é o alto grau de cristalinidade da celulose, que promove maior solidez aos efeitos da degradação mecânica, química e/ou térmica, e também alta resistência à tração às fibras vegetais (LAVOINE et al., 2012).

A lignina é o componente da fibra vegetal caracteristicamente hidrofóbico e altamente ramificado, tal que confere rigidez à parede celular, e conseqüentemente influencia as propriedades físicas e mecânicas da madeira (KLOCK et al., 2005).

Em resumo, a Tabela 2 mostra a composição química de algumas fibras vegetais comumente utilizadas, no qual constata-se uma variação na composição química entre as fibras, o que é responsável, conseqüentemente, na variação das propriedades físicas e mecânicas das fibras, conforme mostrada na tabela 2.

Tabela 2 – Composição química percentual de algumas fibras vegetais mais utilizadas

Tipo de Fibra	Celulose	Hemicelulose	Lignina
Sisal	70,7-75,2	21,1	7,6-8,0
Malva	76,0	-	10,0
Juta	60,0	22,10	15,9
Coco	43,4-53	14,7	38,3-40,7

Fonte: AGOPYAN; SAVASTANO JR, 1997.

Em decorrência da primeira crise do petróleo no ano de 1970, aumentou-se o interesse por materiais naturais, promovendo um maior uso de compósitos reforçados com fibra de juta e sisal principalmente para aplicação em construções de habitações populares. Assim, com o crescente desenvolvimento da ciência, nos últimos anos aprimorou-se o uso destes materiais, o que permitiu projetar as propriedades almejadas aos compósitos para seu consumo em comutação à materiais convencionais (HILL; HUGHES, 2010).

Entretanto, a produção mundial das fibras sintéticas ainda é maior que a produção das fibras naturais, mas o cenário tende a mudar tanto devido ao seu

impacto socioeconômico, quanto pela busca por um modelo de desenvolvimento sustentável, tal que diversos pesquisadores têm se dedicado ao estudo da aplicação de fibras naturais vegetais (OLIVEIRA, 2013).

2.1.2.1. Fibras de malva

As fibras são extraídas de uma planta pertencente à família malváceas, a malva (*Urena lobata*, L), uma planta herbácea e adaptada às condições de várzea cultivada principalmente nos estados do Amazonas e Pará. Geralmente a malva é cultivada em sistema de consórcio com a juta em terras férteis (AGOPYAN; SAVASTANO JR, 1997).

As fibras de malva são utilizadas predominantemente para confecção de sacaria de café, açúcar, cacau e castanha de caju, todavia também são utilizadas para produção de papel, vestuário e tecidos para estofados e tapetes, e apresenta potencial de utilização na construção civil como reforço de compósitos (SAVASTANO JR; LUZ; NOLASCO, 2000).

Segundo Margem (2013), as fibras de malva são oriundas do cultivo temporário em condições de várzea, e devido inúmeras aplicações nas indústrias nacionais e internacionais tornou-se econômica e tecnicamente competitiva com as fibras sintéticas, uma vez que estas podem causar danos ambientais em função da sua difícil decomposição após o descarte, enquanto que as fibras de malva levam cerca de dois anos para se decomporem após o seu desuso, não agredem o meio ambiente.

As fibras são extraídas do caule da malva, representa uma fibra oriunda do líber da planta, ocorrendo entre a camada intermediária que envolve a medula central lenhosa do caule e a camada externa da casca (SAVASTANO JR; LUZ; NOLASCO, 1997).

O processo de extração e beneficiamento da fibra de malva é constituído de duas etapas: 1) Etapa de desgomagem e descorticagem, que é realizada em campo através de máquinas desfibriladoras, no qual as fibras são extraídas mecanicamente

do caule da planta; e 2) Etapa de desgomagem, realizada nas indústrias via processos químicos para limpeza, clareamento e estabilização das fibras (MARGEM, 2013).

Posteriormente as fibras de malva podem empregadas em diversos segmentos, desde a fabricação de tecidos, cordas e barbantes, ou utilizada como fonte de celulose para a produção de papel moeda, devido à sua resistência, até ser utilizada na fabricação de mangueiras, pneus e fios de paraquedas (OLIVEIRA, 2013). Além de nos últimos anos serem utilizadas por diversos pesquisadores como reforço de compósitos (MELO FILHO, 2005; MARQUES, 2009; MELO FILHO, 2012; OLIVEIRA, 2013; FIDELIS, 2014, RODRIGUES, 2015; CÉSAR et al., 2016; CUNHA, 2017).

Todavia, a grande empregabilidade da fibra de malva é decorrente de sua fácil obtenção, por meio de cultivos rudimentares, sem necessidade de emprego tecnológico para produção, além de suas propriedades físicas e mecânicas, no qual pode se destacar baixa densidade, em torno de 0,402 g/cm³, elevada resistência mecânica, conforme mostra Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras de malva

Propriedades	Valores característicos
Comprimento médio das fibras	23, 8 cm
Diâmetro médio das fibras	43,6 µm
Massa específica real	1,37 g/m ³
Resistência à tração	160 MPa
Alongamento à ruptura	5,20%
Absorção máxima	377%

Fonte: MARGEM, 2013.

Shihong et al. (1994) reforça um aspecto característico da fibra de malva, seu baixo valor econômico, quando comparada a fibras sintéticas, como, por exemplo, a fibra de vidro e aramida, uma vez que as fibras naturais de malva podem ter um valor até 10% das fibras sintéticas.

Um dos estudos pioneiros, quanto a introdução de fibras naturais em argamassa cimentícia, desenvolvidos por Savastano Jr, Luz e Nolasco (1997), mostrou que um compósito de matriz cimentícia reforçados com fibras de malva possui

comportamento das propriedades mecânicas superior quando comparada com as argamassas de cimento sem a incorporação das fibras.

Posteriormente Melo Filho (2005; 2012), Fidelis (2014), Rodrigues (2015), César et al. (2016) e Cunha (2017) ratificaram os estudos sobre o benefício da incorporação de fibras de malva em matriz cimentícia. Constataram que as fibras melhoraram o comportamento mecânico de flexão, uma vez que os corpos de prova apenas de matriz cimentícia apresentaram uma ruptura brusca, enquanto os corpos de prova reforçados com fibras de malva não apresentaram tal comportamento, mas sim um desempenho mecânico um pouco mais tenaz e dúctil após a fissuração.

2.1.2.2. Processo produtivo da fibra de malva

A fibra de malva é obtida por extração de sua planta, quando a mesma é submetida ao processo de maceração, que geralmente é realizado em água corrente ou parada. Para tanto, os feixes de caule são submersos de 8 a 20 dias, e, posteriormente completa-se a maceração, no quais as fibras são separadas das medulas lenhosas, lavadas e postas para secar (RODRIGUES, 2015).

Após secas, as fibras são processadas novamente em máquinas específicas para as tornar mais macias, e eliminar os detritos vegetais, como pontas endurecidas ou mal maceradas. Em seguida, são organizadas em fardos não trançados, que comumente são de 10 a 15 cm de diâmetro, separadas de acordo com seu comprimento, cor e brilho (RODRIGUES, 2015).

Quanto a classificação, as fibras de malva são divididas em quatro tipos pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (1982), que por meio da Portaria Nº150 classifica as fibras conforme mostra Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação das fibras de juta e malva

Classificação	Características
Tipo 1	Coloração esbranquiçada à amarelada; limpeza; cutículas soltas no meio da fibra; brilho normal; maciez natural; e comprimento mínimo de um metro.
Tipo 2	Coloração amarela à ligeiramente pardacenta; defeitos de maceração ou beneficiamento, representados pela presença de cutículas esparsas e aderidas à fibra; brilho normal; leve aspereza nas extremidades da fibra e comprimento mínimo de um metro
Tipo 3	Coloração amarelada à pardacenta; defeitos de maceração ou beneficiamento, representados pela presença de cutículas aderidas à fibra, esparsas concentrações de substâncias pécticas e calosidades; brilho normal; ligeira aspereza em toda a extensão da fibra; e comprimento mínimo de um metro.
Tipo 4	Coloração variada; defeitos de maceração ou beneficiamento, representados pela aderência de cutículas, concentrações de substâncias pécticas e calosidades; brilho normal; aspereza em toda a extensão da fibra; e comprimento mínimo de um metro

Fonte: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 1982 (adaptado).

Posteriormente as fibras são encaminhadas para as indústrias para serem beneficiadas (MARTNS NETO, 2011; MARGEM, 2013).

2.2. Matriz cimentícia

Historicamente utiliza-se matriz cimentícia como material de construção nas mais diversas aplicações da engenharia civil principalmente devido a facilidade de produção, a capacidade de ser moldado em fôrmas e possuir boa trabalhabilidade (AGUIAR, 2016).

A matriz obtida de cimento Portland comumente é um produto de baixo custo, que possui boa durabilidade e resistência mecânica à compressão, além de apresentar elevada rigidez, todavia possui baixa resistência à tração, ruptura frágil e capacidade de deformação bastante limitada (RODRIGUES, 2015).

Dessa forma, Oliveira (2017) define que matriz cimentícia é um produto oriundo da mistura homogênea de cimento, agregado miúdo e água. Ao se misturar esses materiais obtém-se uma pasta de consistência plástica moldável, cujo endurecimento ocorre em decorrência da reação química de hidratação do cimento, o

que promove, por sua vez, aumento da resistência à compressão com o passar do tempo.

Todavia, o uso de cimento Portland para produção de matriz cimentícia resulta em uma pasta de elevada alcalinidade devido a presença de portlandita na forma de hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. O $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é obtido pela hidratação do cimento Portland comum (SILVA, 2002).

A elevada alcalinidade da pasta de cimento é um fator limitante quanto ao uso de fibras vegetais como reforço, pois o pH alcalino da matriz degrada as fibras vegetais, que possuem pH ácido. Assim, estudos no intuito de reduzir a alcalinidade da matriz, e conseqüentemente diminuir a degradação da fibra e aumentar durabilidade de compósitos com fibras vegetais tem sido realizado e alcançado bons resultados (OLIVEIRA, 2017).

Tem-se utilizado pozolana, tanto para melhorar as propriedades físico-mecânicas da matriz cimentícia, como para reduzir a alcalinidade da pasta de cimento. Entre as pozolanas mais comum encontram-se a sílica ativa ou micros sílica (obtida da fabricação de ligas metálicas, cinzas de cascas de arroz e de restos de colheitas de grãos) e a metacaulinita, obtidos por meio da calcinação e moagem de argilas caulínicas (OLIVEIRA, 2013).

2.2.1. Reações pozolânicas

A NBR 12653/1992 define como pozolanas os materiais silicosos ou silicoaluminosos que possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, por si sós, mas quando finamente divididos e na presença de água, à temperatura ambiente, reagem com o hidróxido de cálcio e formam compostos com propriedades aglomerantes. Classifica, também, os materiais pozolânicos em naturais, que são de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido ou de origem sedimentar e em artificiais, que são resultantes de processos industriais ou provenientes de tratamento térmico (argilas calcinadas) com atividade pozolânica. Ainda de acordo com a NBR 12653:2012, os materiais pozolânicos são divididos em três classes: N, C e F. Na Tabela 5 estão apresentadas as exigências químicas para as diferentes classes descritas pela NBR 12653 (ABNT, 1992).

Tabela 5 – Exigências químicas dos materiais pozolânicos

Propriedades	Classes		
	N	C	F
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % mín.	70	70	50
SO ₃ , % máx., % máx.	4	5	5
Teor de umidade, % máx.	3	3	3
Perda ao fogo, % máx.	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máx.	1,5	1,5	1,5

Fonte: NBR 12653, 1992.

Oliveira e Barbosa (2006) ressaltam que uma das propriedades da pozolana é a capacidade de o material se combinar com o hidróxido de cálcio, transformando-se quimicamente em silicatos e aluminatos de cálcio hidratados.

A hidratação dos silicatos do cimento Portland produz hidróxido de cálcio, que por sua vez, pode ser consumido pelas reações pozolânicas, formando o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e diminuindo a alcalinidade da pasta de cimento (MELO FILHO, 2012).

A adição de pozolana ou substituição parcial do cimento nas pastas cimentícias tem se mostrado benéfica, pois melhora as propriedades da pasta endurecida. Assim, segundo Santos (2006), a utilização de pozolanas junto ao cimento proporciona:

- Devido as reações pozolânicas ocorre uma menor quantidade calor de hidratação devido a troca de reações exotérmicas que ocorrem durante a hidratação do cimento;
- Devido a estabilização do hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do clínquer Portland e a formação de C-S-H com menor relação CaO/SiO₂, que possui menor alcalinidade, ocorre aumento da resistência ao ataque ácido;

- Maior durabilidade, uma vez que o produto da reação pozolânica auxilia no impedimento da reação álcali agregado e consequente redução do diâmetro dos poros da pasta hidratada, minimizando o ataque do material por substâncias externas como cloretos e sulfatos.

A micro sílica, cinza volante, metacaulinita, resíduo cerâmico, entre outros materiais tem sido utilizado devido a sua atividade pozolânica, pois promovem uma estrutura menos porosa e mais densa ao ser misturados com cimento Portland e, conseqüentemente, aumenta a resistência química, à compressão e impermeabilidade, bem como ainda reduz o calor de hidratação do cimento e o risco de fissuração térmica, além do maior consumo de hidróxido de cálcio por meio das reações pozolânicas resultando na formação de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) que diminui a alcalinidade da matriz cimentícia (MARQUÊS, 2009; MELO FILHO, 2005, 2012).

Oliveira (2013) destaca que a metacaulinita existe em grande disponibilidade no Brasil e com baixo custo, o que representa uma boa alternativa econômica para a produção de material cimentício, pois reduz o impacto ambiental produzido pela indústria da construção do cimento, diminuindo, assim, a quantidade de CO₂ lançada na atmosfera.

Outro aspecto, é a grande disponibilidade de argila caulinítica, matéria-prima para a produção de metacaulinita, na região Amazônica. O que torna o uso de metacaulinita regional econômica e tecnicamente viável para produção de matriz cimentícia.

Quanto à temperatura de calcinação para que as argilas cauliníticas desenvolvam propriedades pozolânicas, para Davidovits (1999) o ideal é que as temperaturas estejam entre 700°C e 800°C, por um período de 6 horas, enquanto as pesquisas de Oliveira e Barbosa (2006) apresentam a calcinação do caulim com temperaturas variáveis de 700°C, 800°C e 900°C por um período de 2 horas. De acordo com Fitos *et. al.* (2015), a metacaulinita é obtida a uma temperatura variando entre 650°C e 800°C, durante 3 horas.

2.2.2. Compósito cimentício livre de hidróxido de cálcio

Uma das formas de obtenção de uma pasta cimentícia livre de hidróxido de cálcio é substituindo a quantidade de cimento por uma pozolana, em especial por metacaulinita, que apresentou melhores resultados. Pois o objetivo principal da adição de metacaulinita é promover reações pozolânicas, que consomem o hidróxido de cálcio formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e conseqüentemente, obtém-se assim, um compósito livre de hidróxido de cálcio (MELO FILHO, 2005).

Alguns autores realizaram a substituição de cimento por material pozolânico o obtiveram sucesso em produzir compósito livre de hidróxido de cálcio, entre eles se destacam:

- Toledo Filho et al (2003) substituíram parcialmente cimento por sílica ativa em compósitos com fibras naturais de sisal e coco;
- Mello Filho (2005) substituiu parcialmente cimento por metacaulinita em compósitos com fibras longas de sisal;
- Toledo Filho et al (2009) utilizaram resíduo de tijolo cerâmico moído e metacaulinita como substituição parcial do cimento em compósitos com fibras longas de sisal;
- Rodrigues et al (2010) utilizaram cinza da casca do arroz (30%) como material pozolânico em compósitos cimentícios com reforço da popa da fibra de bambu;
- Mello Filho (2012) substituiu parcialmente o cimento por metacaulinita em compósitos com fibras naturais de sisal;
- Oliveira (2013) substituiu 50% do cimento por metacaulinita em compósitos reforçados com fibras vegetais de malva e juta.

Baseando-se nestas pesquisas, optou-se por utilizar a metacaulinita da região próxima à Manaus como material pozolânico, em substituição parcial (50%) ao cimento Portland, no intuito de aumentar a resistência mecânica do compósito, reduzir a quantidade de hidróxido de cálcio disponível na matriz cimentícia e conseqüentemente diminuir a agressividade sobre as fibras vegetais de malva.

2.2.3. Durabilidade de compósitos cimentícios com fibras naturais

O estudo de fibras vegetais para reforçar placas cimentícias tem sido pesquisado por anos, haja visto que um dos primeiros estudos foi realizado em 1895, pelo Austríaco Ludwig Hastschek, que desenvolveu o fibrocimento ao misturar cimento, fibras de amianto e água (AGUIAR, 2016).

O objetivo da adição de fibras vegetais em compósitos é melhorar as propriedades mecânicas de matrizes cimentícias, cuja principal finalidade é reforçar a pasta de cimento, que normalmente é quebradiça após o início das fissuras no compósito (AGOPYAN et al., 2005).

Entretanto, estudos conduzidos por Savastano Jr. e Agopyan (1999) constataram que a zona de transição da interface fibra-matriz cimentícia é porosa, rica em portlandita e apresenta espessura de até 100 μm , o que compromete a durabilidade e longevidade de compósitos cimentícios com fibras vegetais.

A durabilidade e longevidade dos compósitos reforçados com fibras vegetais também está associada à resistência dos compósitos aos ataques externos, como, por exemplo, temperatura, variações de umidade, ataques de sulfetos ou cloretos, ou ataques internos, como, por exemplo, a aderência e compatibilidade entre fibras e matriz cimentícia, e a variações volumétricas (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2010).

Assim, em ambientes úmido e quente, como na região amazônica, compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais estão sujeitos a sofrerem uma redução da ductilidade, a favorecer o processo de carbonatação e a promover uma redução da resistência na pós-fissuração (RAMLI et al., 2013; TOLEDO FILHO et al., 2009).

Outro aspecto que compromete a durabilidade dos compósitos cimentícios com fibras vegetais é a afinidade destas por água, uma vez que as fibras vegetais

tendem a absorver a água presente na matriz. Assim, com absorção ocorre uma expansão volumétrica das fibras, que posteriormente ao o processo de cura, esta água presente na fibra, retorna para a matriz novamente, implicando em retração volumétrica das fibras. Este processo provoca um aumento da relação água/ cimento na região interfacial entre a fibra/matriz, e conseqüente o destacamento da fibra em relação a matriz cimentícia (RODRIGUES, 2015),

Todavia, a durabilidade e longevidade dos compósitos cimentícios com reforço de fibras vegetais podem ser aumentadas com algumas medidas técnicas, como, por exemplo, o incremento de pozolana na matriz cimentícia ou tratamento químico das fibras vegetais (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2010).

2.2.4. Tratamentos para melhorar tensão fibra-matriz de fibras naturais

A matriz cimentícia obtida na forma tradicional, misturando-se cimento Portland, areia e água, é deletéria às fibras vegetais. Sendo necessário, portanto, realizar tratamentos tanto na matriz como nas fibras para melhorar a tensão fibra-matriz em compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais.

Os tratamentos visam melhorar a aderência entre fibra e matriz e reduzir a degradação das fibras vegetais, de modo a obter-se um compósito com maiores resistências mecânicas e maior durabilidade. Tratamento com introdução de pozalanas nas matrizes cimentícias é uma das opções de tratamento já estudadas (AGUIAR, 2016).

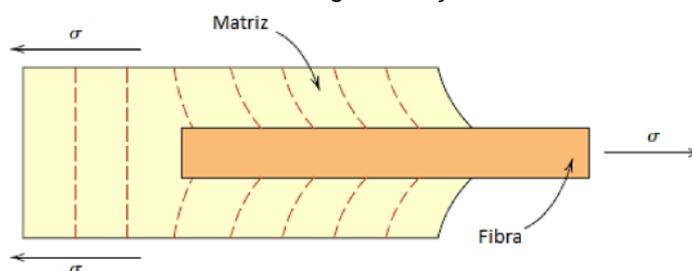
Marques (2015) utilizou solução de hidróxido de sódio para tratamento das fibras vegetais, enquanto que Kolarová et al. (2013) utilizou tratamento com plasma. Oliveira (2013) utilizou adição de argila calcinada na matriz cimentícia e Melo Filho (2012) substituiu parcialmente o cimento na matriz por metacaulinita e resíduo de tijolo moído.

Entretanto, uma substituição excessiva do cimento por pozolana, apesar de melhorar a durabilidade dos compósitos reforçados com fibras vegetais, pode também reduzir as interações entre as fibras e a matriz cimentícia (ZHOU et al., 2013). Por

isso, Melo Filho (2012) recomenda que a substituição do cimento por uma pozolana não seja superior a 50%.

A região interfacial também determina as propriedades dos compósitos, pois é através dela que os esforços atuantes na matriz são transmitidos ao reforço (SILVA, 2003), este padrão de deformação pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Padrão de deformação na matriz ao redor de uma fibra que está submetida à aplicação de uma carga de tração



Fonte: Callister e Rethwisch (2012)

De acordo com Melo Filho (2005), pode-se melhorar a tensão de aderência da interface fibra/matriz ao se executar algumas operações, como:

- Limpeza da superfície dessas fibras eliminando gorduras e camadas de restos de resinas e graxas;
- Reação das fibras com substâncias que proporcionassem às fibras vegetais uma menor capacidade de absorção de água;
- Reação das fibras com substâncias que tornem a superfície das mesmas mais protegidas do meio externo, propiciando uma maior rugosidade para uma melhora na transferência de tensões;
- Um processo de moldagem que traga a melhor homogeneidade de distribuição das fibras no interior da matriz.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA

Este capítulo aborda os materiais e equipamentos utilizados no desenvolvimento da pesquisa, além dos procedimentos e ensaios realizados.

O planejamento metodológico envolve, basicamente, duas etapas. A primeira etapa está relacionada ao beneficiamento e caracterização de alguns dos materiais, como o caulim, e ao preparo das fibras para aplicação como reforço, em diferentes disposições e percentuais volumétricos nos compósitos. A Figura 5 contém os compósitos produzidos, conforme a diferença da disposição do reforço. Na segunda etapa há a produção dos laminados cimentícios e a caracterização mecânica por flexão dos mesmos. A Figura 6 apresenta a metodologia adotada no presente estudo.

Figura 5 – Compósitos produzidos de acordo com o volume de fibras

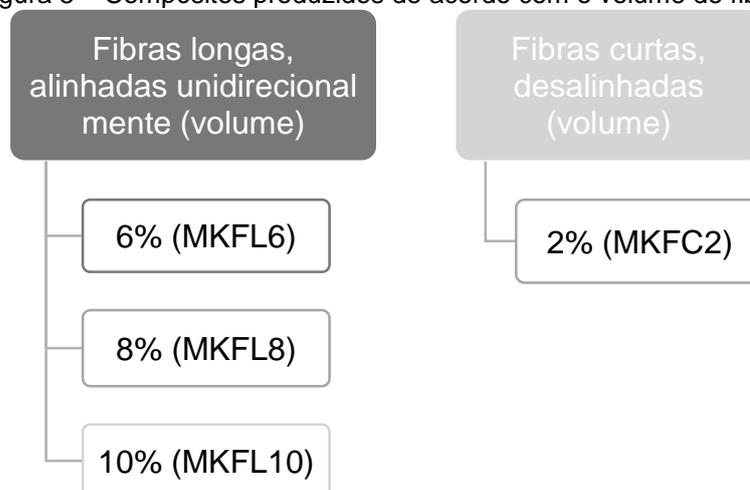
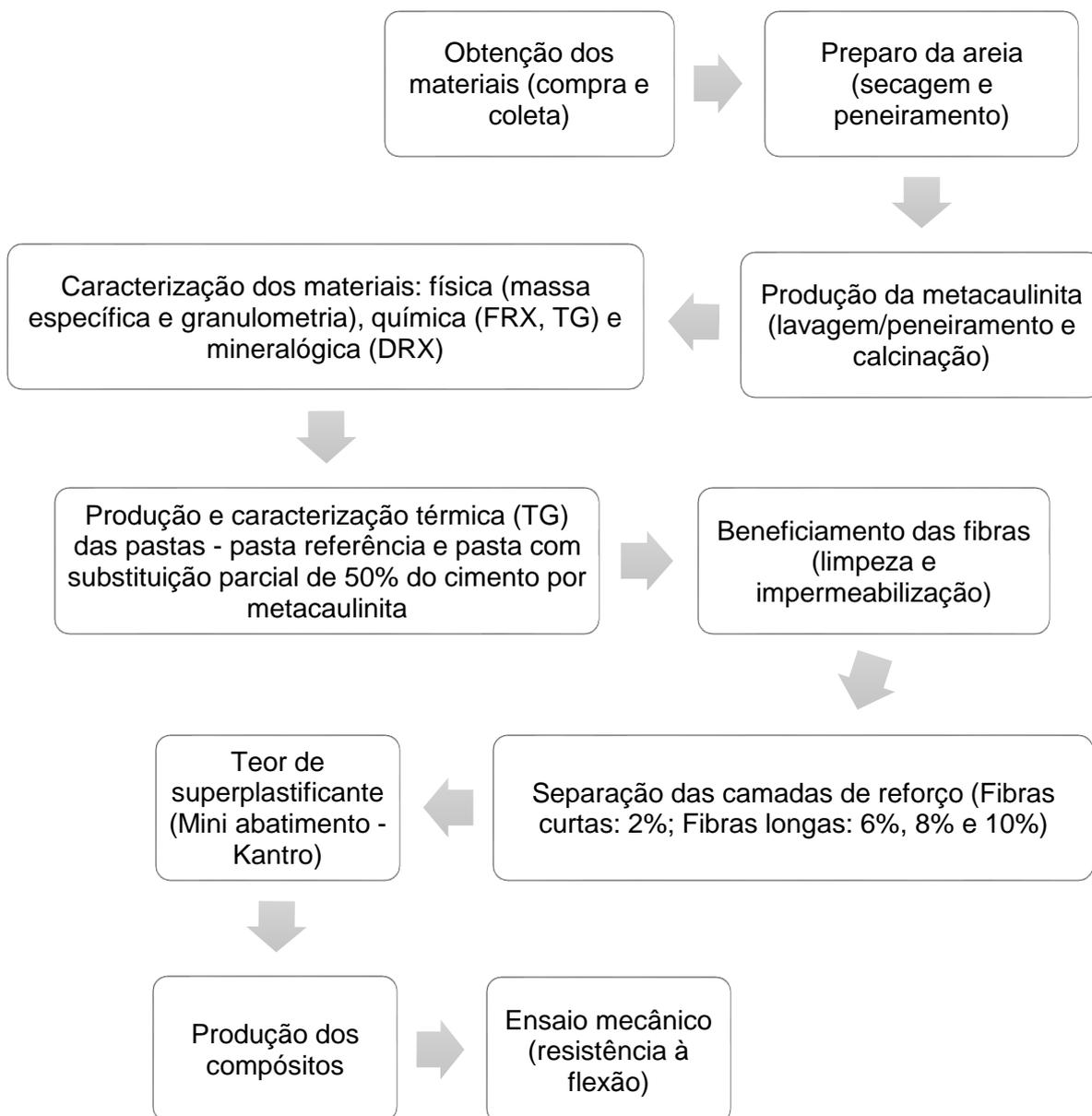


Figura 6 – Metodologia adotada



3.1. Materiais

Os compósitos possuem uma matriz constituída por 5 materiais: Cimento *Portland*, areia, metacaulinita, água e aditivo superplastificante. Como reforço foram utilizadas fibras de malva.

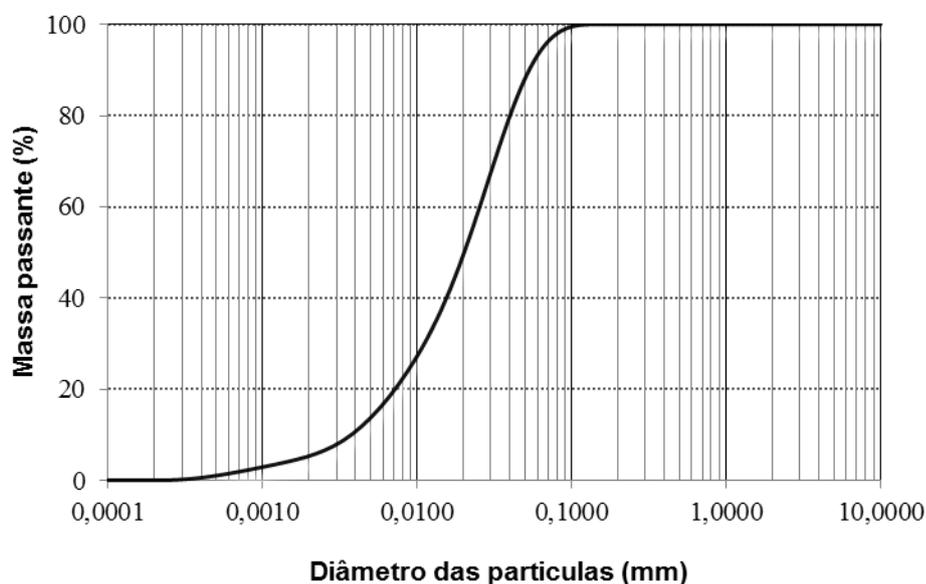
3.1.1. Cimento Portland

Utilizou-se um cimento comum do tipo CP I-S-40 (NBR 5732), da marca CEMEX, adquirido no comércio da cidade de Manaus. Este cimento possui entre 95% e 99% de clínquer e no máximo 5%, em massa, de compostos secundários (pozolana). A tabela 7 e a Figura 7 apresentam, respectivamente, as principais propriedades e a curva granulométrica deste material.

Tabela 6 – Propriedades do cimento CP I-S-40

Propriedades	Valor	Norma
Massa específica (g/cm ³)	3,19	NBR 16605:2017
Índice de finura (%)	4,42	NBR 11579:2012
Tempo de início de pega (min.)	156	NBR 16607:2018

Figura 7 – Curva granulométrica do CP I-S-40



A análise granulométrica do cimento mostra que 50% das partículas possuem diâmetro inferior a 21 μm.

3.1.2. Agregado miúdo

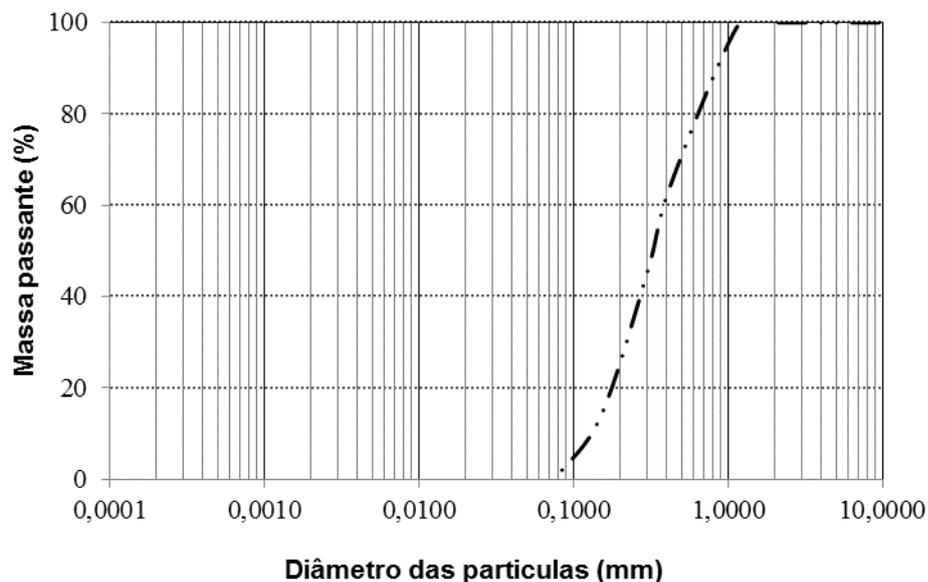
Materiais com granulometria inferior a 1,19mm influenciam a área de contato entre as partículas dos aglomerantes, tornando o produto final mais homogêneo, de acordo com Melo Filho (2012). Portanto, como agregado miúdo, utilizou-se areia de rio, comercializada na cidade de Manaus, passante em peneira de nº 16 (malha com abertura de 1,19mm – NBR NM 248/2003). A areia foi quarteada e seca em estufa à 100 °C por 24 horas.

A areia foi caracterizada quanto à massa específica e distribuição granulométrica. A determinação da massa específica se deu por meio do frasco Chapman, e a granulometria foi obtida adotando o procedimento da NBR NM 248/2009. Os resultados são apresentados na Tabela 8 e na Figura 8, respectivamente, bem como as demais propriedades que caracterizam este material.

Tabela 7 – Propriedades da areia utilizada

Propriedades	Valor	Norma base
Massa específica real (g/cm ³)	2,61	DNER-ME 194/98
Teor de umidade (%)	0,00	NBR 9775:2011
Índice de vazios (%)	38,14	NM 45: 2006
Teor de absorção (%)	3,33	NM 30:2001
Teor de impurezas orgânicas	<i>Cor igual à solução padrão</i>	NM 49:2001

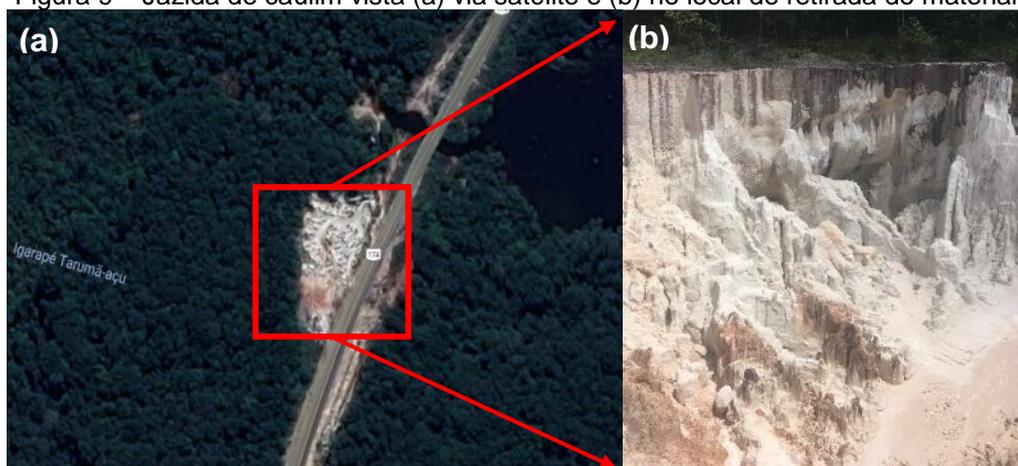
Figura 8 – Curva granulométrica da areia



3.1.3. Metacaulinita

A metacaulinita foi obtida através da calcinação do caulim. O caulim utilizado é proveniente de uma jazida na rodovia BR-174, conforme Figura 9, situada a 45 quilômetros da cidade de Manaus, cuja as coordenadas são $2^{\circ} 35' 10.014''$ S $60^{\circ} 1' 57.346''$ W.

Figura 9 – Jazida de caulim vista (a) via satélite e (b) no local de retirada do material.



Fonte: (a) Google Maps, 2018

O material em torrões, conforme retirado da jazida, foi mantido submerso em água durante 24 horas. Após esse período, deu-se início ao processo de lavagem, simultaneamente ao peneiramento, sendo passado em peneira nº 200 (abertura da

malha de 0,075mm) com água corrente. O material passante pela peneira ficou em repouso para decantação, foi retirado o excesso de água, e colocado em estufa à 100°C durante 24 horas. Após a secagem, parte do material, que se encontrava aglomerado, foi destorroado manualmente.

O caulim foi calcinado em forno tipo mufla (fabricante GP científica), Figura 10, à temperatura de 750°C, com duração total de 6 horas, sendo que o forno demora cerca de 90 minutos para estabilizar na temperatura desejada. O resfriamento se deu no próprio forno.

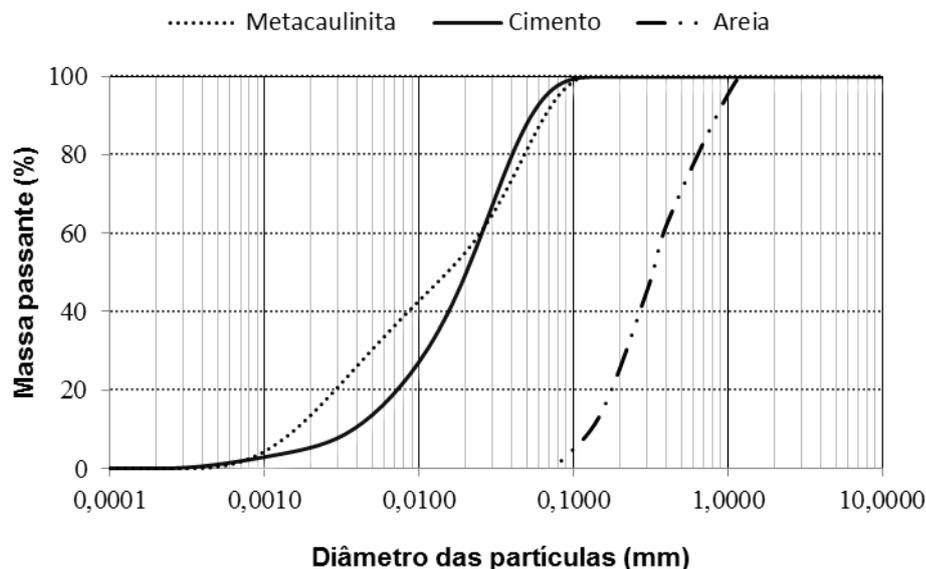
Figura 10 – Caulim no forno mufla, a ser calcinado.



A temperatura e o tempo de calcinação foram definidos com base no estudo de Portela (2016), que trabalhou com o mesmo caulim.

A massa específica da pozolana é de 2,67 g/cm³ e foi determinada com base na NBR NM 23:2000, pelo frasco de Le Chatelier. Realizou-se a análise granulométrica da metacaulinita produzida, por sedimentação em dispersão com defloculante, procedimento normatizado pela NBR 7181. A Figura 11 apresenta a curva granulométrica dos materiais secos utilizados na pesquisa.

Figura 11 – Curvas granulométricas dos materiais secos



3.1.4. Água e aditivo superplastificante

A água utilizada na mistura é proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Manaus, e suas características estão contidas na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades do aditivo químico

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

Fonte: Cavalcante (2017).

Como aditivo químico utilizou-se o ADVA™ CAST 525, da marca Grace, que é um superplastificante de última geração, a base de policarboxilato (PCE), classificado como tipo II, de pega normal (SP II-N) de acordo com a ABNT NBR 11768:2019. A

dosagem do aditivo foi obtida experimentalmente por meio do ensaio de mini abatimento – Kantro. A Tabela 9 apresenta algumas propriedades deste aditivo.

Tabela 9 – Propriedades do superplastificante ADVA CAST 525

Propriedades	Valor
Dosagem recomendada (%)	0,15 a 0,80
Massa específica g/cm ³	1,06
pH a 25°C	3,00 – 5,50
Teor de sólidos (%)	30

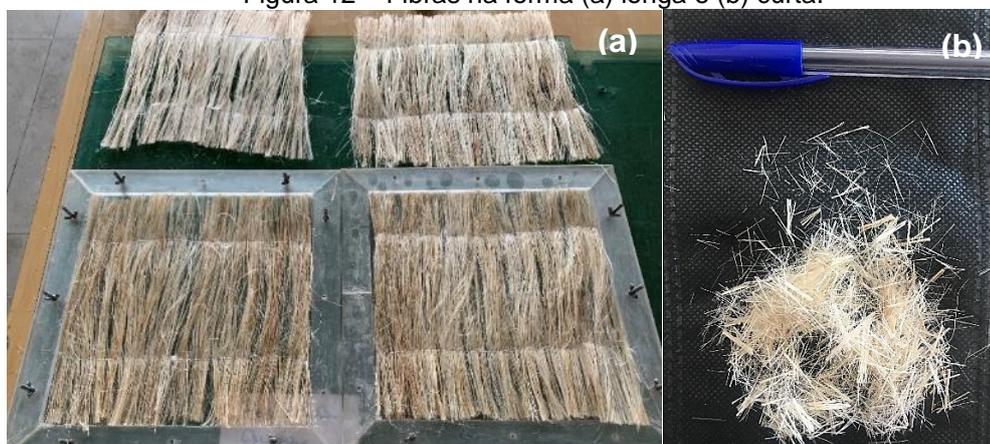
Fonte: Fabricante GCP (2016).

3.1.5. Fibra natural

A fase dispersa dos compósito produzidos são de fibras longas e fibras curtas. O material foi doado pela empresa Brasjuta da Amazônia, do município de Manacapuru, distante cerca de 100 km da cidade de Manaus.

Repetiu-se o processo de limpeza adotado por Melo Filho (2012), no qual as fibras foram limpas e penteadas. Conforme mostrado na Figura 12, as fibras longas foram cortadas com comprimento de 40 centímetros (dimensão do molde de produção dos compósitos) e as fibras curtas foram cortadas com aproximadamente 1 centímetro de comprimento.

Figura 12 – Fibras na forma (a) longa e (b) curta.



3.2. Métodos

3.2.1. Termogravimetria

A análise térmica por termogravimetria (TG/DSC) mostra a faixa de temperatura em que a caulinita transforma-se em metacaulinita e dá início à sua recristalização. O ensaio visa, ainda, apresentar se houve o consumo do hidróxido de cálcio da pasta de cimento, devido a adição de pozolana.

O ensaio consiste no aquecimento da amostra em velocidade constante, sendo esta amostra monitorada por uma balança, que computa as variações de massa em função da temperatura. Os resultados são expressos em curvas de variação de massa versus temperatura ou tempo (Silva, 2013).

Portanto, foram analisadas amostras de caulim e amostras de pasta de cimento, aos 28 dias, sendo uma de referência – sem adição da pozolana, e uma com substituição parcial de 50% do cimento por metacaulinita. As pastas foram produzidas e mantidas em sacos plásticos vedados, sem contato com o ambiente, até a idade da realização do ensaio.

O procedimento foi realizado em um SDT Q600 da Ta Instrument, localizado no laboratório de Ensaio Físico-Químicos/FT/UFAM, conforme Figura 13.

Figura 13 – Equipamento utilizado para análise termogravimétrica



O recipiente que recebe a amostra é um cadinho de alumina de 90 microlitros, sem tampa, e foi aferido aproximadamente 10 mg de material. As condições de ensaio

foram com taxa de aquecimento de 10 °C/min até a temperatura final de 1000°C, com fluxo de gás nitrogênio 5.0 de 30 ml/min.

3.2.2. Espectroscopia de fluorescência de raios X

A fluorescência de Raios-X (FRX) é uma técnica não destrutiva, que permite identificar os elementos químicos que constituem uma ampla variedade de tipos de amostras, sob a forma de sólidos, líquidos, pastas e pós soltos.

Este procedimento consiste em uma fonte de raios-X, que irradia a amostra e causa uma fluorescência dos raios X característicos de cada elemento. Tendo conhecimento dos ângulos de reflexão e as intensidades de radiação, os elementos podem ser identificados e quantificados (DUTRA & GOMES, 1984).

O ensaio foi realizado com amostras de 50g de metacaulinita, em um espectrômetro modelo EPSILON 3, da marca PANalytical, no Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos – LAMAC, na Universidade Federal do Amazonas – UFAM, Figura 14.

Figura 14 – Espectrômetro de fluorescência de Raios X da PANalytical - Epsilon 3XL



Fonte: Huss (2018).

3.2.3. Difração de raios X

A caracterização das fases mineralógicas presentes foram identificadas através do ensaio de difratometria de Raio-X (DRX), também com o intuito de confirmar se a eliminação da caulinita por meio da calcinação foi satisfatória. As medidas de difração de Raio-X foram realizadas no Laboratório de Materiais (LabMat) da Universidade Federal do Amazonas.

As amostras foram preparadas por prensagem manual no porta amostra, seguido de exposição aos raios-X em um equipamento PANalytical modelo Empryan, Figura 15. A análise das amostras se deu em ângulos de varredura 2θ , variando de 4° a 90° .

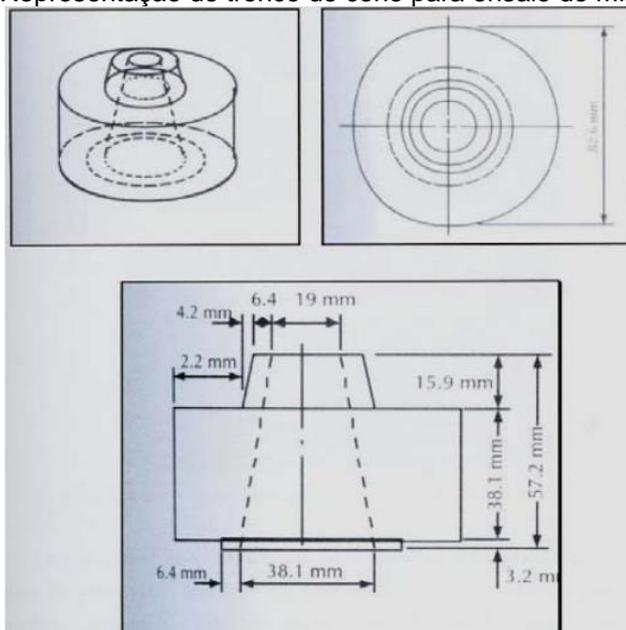
Figura 15 – Equipamento utilizado na difratometria de raios-X.



3.2.4. Mini abatimento – Kantro

Para determinar o teor ideal de aditivo a ser incorporado na matriz, realizou-se o ensaio de mini-abatimento, descrito por Kantro (1980). Trata-se de um método similar ao Slump Test, com molde de dimensões reduzidas, como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Representação do tronco de cone para ensaio de mini abatimento



Fonte: Kantro (1980).

As pastas possuem relação água/cimento de 0,40 e o ensaio foi realizado com teores de aditivo superplastificante entre 0,2% e 0,8%, em intervalos de 0,1%.

Para os tempos de 1, 5 e 60 minutos, sobre uma superfície de vidro, o tronco de cone é preenchido com a pasta e em seguida é elevado, promovendo o espalhamento da mistura. Foram medidos 4 diâmetros, dentre os quais foi definido um valor médio que representa o espalhamento alcançado.

Figura 17 – Execução do ensaio de mini abatimento



3.3. Produção dos laminados

O processo de produção e cura dos compósitos foi executado no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas.

Com base nos dados utilizados por Melo Filho (2005), adotou-se traço 1:1:0,4 (material cimentício: areia: água), com teor de superplastificante de 0,4%, conforme ensaio de mini-abatimento. A matriz é composta por partes iguais, em massa, de cimento Portland e metacaulinuta.

Primeiramente foi feita a mistura manual dos materiais secos, por 1 minuto, e depois despejada no recipiente metálico do misturador (argamassadeira de bancada). Acrescentou-se $\frac{1}{4}$ da água de amassamento, para umedecer o material antes de ligar o equipamento. O início da homogeneização da argamassa durou cerca de 5 minutos, a uma velocidade de 115 rpm, com simultâneo e gradual acréscimo do restante da mistura líquida (água de amassamento e superplastificante). A mistura foi realizada por mais 5 minutos, com velocidade de 237 rpm.

Determinou-se 0,5 centímetro de espessura final para todos os laminados produzidos, sendo que o processo de moldagem difere quanto à forma em que foi empregada o reforço.

O desmolde foi realizado 24 horas após a produção. Os laminados foram mantidos em cura úmida por 28 dias, e imersos em água nas últimas 24 horas antes da realização do ensaio mecânico.

Para realizar o ensaio de flexão os laminados foram submetidos a corte, ficando com dimensões de 200mm x 40mm (comprimento x largura), e pintados com tinta de cor branca, à base d'água, para melhor visualização das fissuras geradas no ensaio.

3.3.1. Fibras Curtas

Esse reforço se encontra disperso na matriz. Após a produção da argamassa, as fibras foram inseridas e misturadas. A conformação do compósito se deu em um

molde acrílico de 350mm x 350mm, posicionado verticalmente, formado por duas placas conectadas por parafusos e com vedação de borracha nas laterais. A introdução da mistura é realizada por uma abertura na parte superior. A Figura 18 apresenta o molde acrílico visto de cima, antes de inserir o material, e a vista frontal, com a mistura inserida.

Figura 18 – Placa acrílica para moldagem dos compósitos reforçados com fibras curtas



A princípio, seriam moldados compósitos com teores de 2%, 4% e 6% de fibras curtas, porém, após realização da primeira moldagem, verificou-se que teores elevados de fibras impossibilitariam a inserção da mistura no molde. Por fim, com fibras curtas, foi produzido e analisado o compósito com teor de 2% (MKFC2) em massa.

3.3.2. Fibras Longas

Neste caso, a aplicação do reforço foi dividida em duas camadas, que estão intercaladas entre as três camadas de argamassa.

Para uma distribuição uniforme das fibras no compósito e, também, para facilitar o processo de produção do mesmo, as camadas foram previamente pesadas e individualmente costuradas, conforme mostra a Figura 19.

Figura 19 – Uma camada de fibra longa, com detalhe da costura realizada.



Após a costura, cada camada recebeu tratamento polimérico, com umedecimento das fibras, para impermeabilização das mesmas.

A moldagem foi feita em um molde acrílico horizontal, com dimensões de 400mm x 400mm. O processo consistiu em colocar uma camada de argamassa, depois posicionar uma camada de tecido, e assim sucessivamente, até que se atingiu-se a terceira camada de argamassa, Figura 20.

Figura 20 – Última camada de argamassa do laminado com reforço de fibras longas.

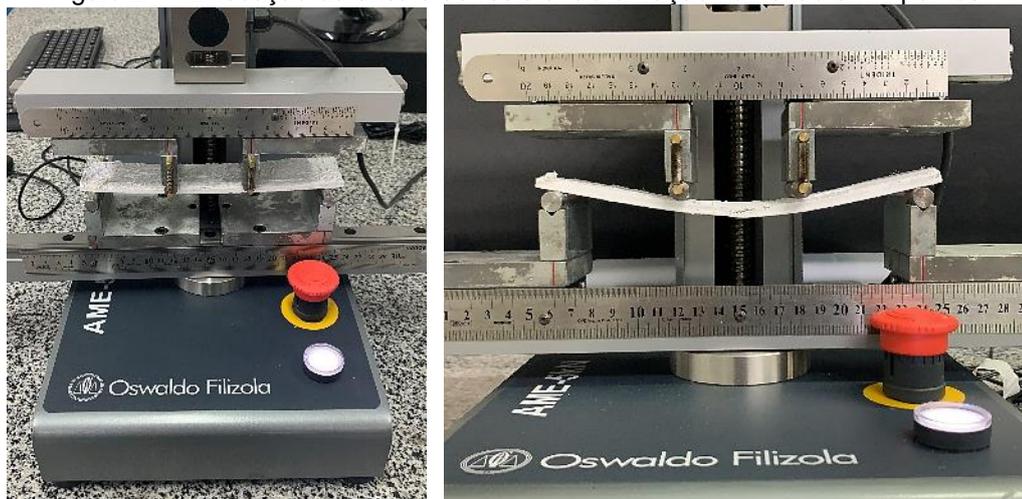


3.4. Resistência à flexão

Para determinação da resistência à tração na flexão foram ensaiados três amostras de cada tipo de compósito produzido.

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal, modelo AME, da marca Oswaldo Filizola, com capacidade de 5 kN (500 kgf), conforme Figura 21. O corpo de prova, apoiado em dois pontos distando 180mm um do outro, recebeu uma carga, aplicada a uma velocidade constante de 0,5 mm/min, velocidade esta padronizada para todos os ensaios realizados nesta pesquisa.

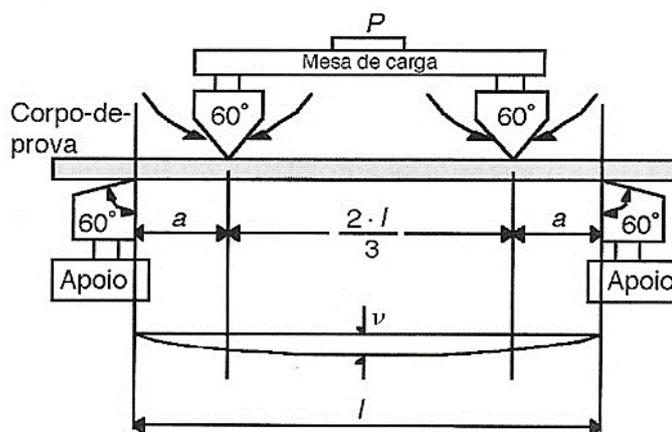
Figura 21 – Execução do ensaio de resistência à tração na flexão em 4 pontos.



O equipamento forneceu os dados do ensaio em função da carga aplicada (N) e da deflexão gerada (mm). Essa carga é medida instantaneamente por uma célula de carga, e a deformação é medida durante todo ensaio por um extensômetro.

Foram calculados os resultados, em função da tensão equivalente de flexão (MPa). A Equação 3 fornece o módulo de ruptura para o ensaio de flexão em 4 pontos e barra de seção transversal retangular, conforme a ASTM E855-90, que têm como base a resistência dos materiais, de acordo com a Equação 1 e Equação 2. A demonstração da análise para o ensaio de flexão em quatro pontos pode ser observada na Figura 22.

Figura 22 – Análise da Tensão para o Ensaio de 3 Pontos



Fonte: Baptista – USP (2017)

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

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

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

Onde:

M = momento fletor

y = distância até a linha neutra

 I_z = momento de inércia em relação à linha neutra σ = tensão de tração na flexão;

P = carga aplicada;

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

b = largura da amostra;

h = espessura da amostra;

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

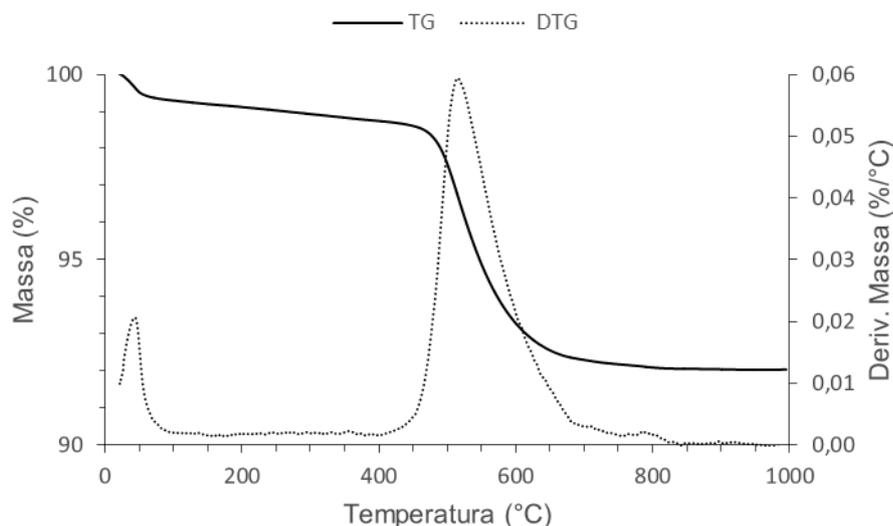
São apresentados e analisados os resultados obtidos nos procedimentos experimentais nos materiais utilizados e nos diferentes compósitos produzidos.

4.1. Termogravimetria

Na Figura 23 é possível verificar que a curva de termogravimetria (TG/TGA) apresenta perdas de massa significativas, representadas por dois picos na curva derivada (DTG). As porcentagens das variações de massa que ocorrem são obtidas empiricamente a partir das curvas de TG.

O primeiro pico está à temperatura de 43,26°C, que corresponde à eliminação de moléculas de água adsorvida sobre a superfície externa das partículas da caulinita, com perda de massa de 0,71% no intervalo inicial de 21°C à 100°C. A existência de outro tipo de água é descartada, visto que a caulinita não apresenta cátions entre as camadas ou água intercalada naturalmente (CHENG et al., 2012).

Figura 23 – Análise térmica diferencial e termogravimétrica do caulim



O segundo pico encontra-se à 514,55°C, e se refere à desidroxilação da caulinita, atribuída à formação de metacaulinita. Na faixa de temperatura onde ocorre este segundo pico, houve uma perda de massa de 6,31%, entre 450°C e 700°C. Após esta última faixa, não são verificadas alterações significativas. Tais análises comprovam que a temperatura de calcinação adotada, 750°C, é satisfatória.

No decorrer do ensaio, de 21°C à 1000°C, foi totalizada uma redução de 7,98% da massa total da amostra.

Estudos que envolvem material pozolânico em misturas cimentícias foram desenvolvidos por Cordeiro, Rocha e Toledo Filho (2013), com indicação das faixas de decomposição térmica dos produtos de hidratação do cimento Portland, conforme pode ser visto na Tabela 10.

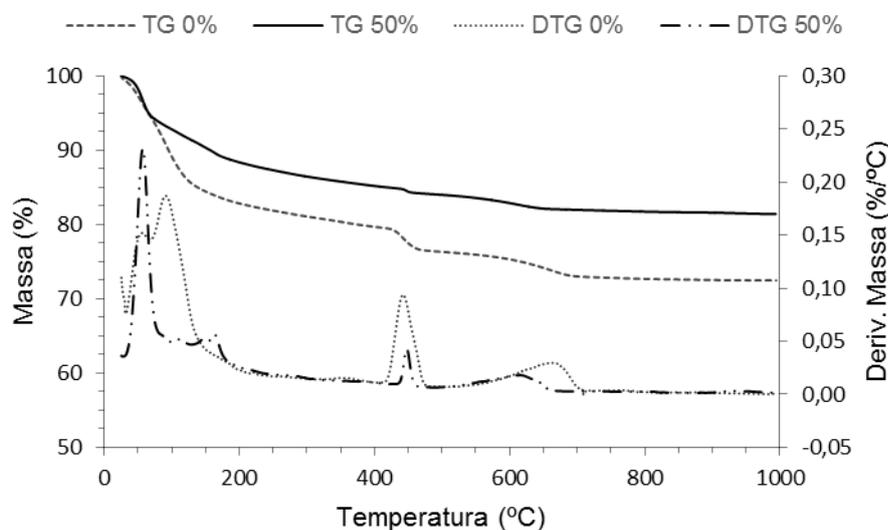
Tabela 10 – Decomposição térmica dos produtos de hidratação do cimento

Compostos	Faixa de temperatura (°C)
Etringita (fase Aft)	76-84
Silicato de cálcio hidratado (C-S-H)	104-140
Sílico-aluminato de cálcio hidratado (CASH)	157-163
Aluminato de cálcio hidratado (CAH)	230-240
Portlandita	460-465
Calcita (CC)	620-645

Fonte: Cordeiro, Rocha & Toledo Filho (2013).

O resultado do ensaio de termogravimetria da pasta cimentícia com substituição parcial de 50% do cimento por metacaulinita, aos 28 dias, e da pasta de referência, sem metacaulinita (0%) é apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Análise térmica diferencial e termogravimétrica das pastas de cimento, com substituição por metacaulinita(50%) e sem substituição (0%), aos 28 dias



Nota-se que a DTG evidencia três intervalos de perda de massa. De 21°C a 250°C há a eliminação de água adsorvida e quimicamente combinada, a decomposição da etringita e dos compostos hidratados.

Entre 400°C e 500°C, tem-se a decomposição da portlandita, situação onde ocorre a desidroxilação do hidróxido de cálcio. Segundo Taylor (1997), o teor de hidróxido de cálcio pode ser obtido com base na perda de massa medida na análise

termogravimétrica, visto que sua decomposição térmica em óxido de cálcio e água é caracterizada por uma perda de massa, quando exposto a temperaturas entre 380°C e 550°C.

E entre 550°C e 750°C ocorre a descarbonatação, decomposição do carbonato de cálcio, formação de óxido de cálcio e gás carbônico. As perdas de massa das três faixas de temperatura analisadas estão contidas na Tabela 11.

Tabela 11 – Variação de massa das pastas submetidas à análise termogravimétrica (TG)

Temperatura (°C)	Perda de massa (%)	
	Pasta 0%	Pasta 50%
21-250	18,16	12,71
400-500	3,37	1,19
550-750	3,11	1,73
0-1000 (total)	27,55	18,61

A pasta com substituição parcial do cimento possui melhor estabilidade térmica, quando comparada à pasta sem pozolana, com perdas de massa menos significativas ao longo dos trechos. Em 450°C, a curva DTG da amostra com metacaulinita apresenta um pico reduzido, com uma perda de massa 65% menor que a outra amostra, portanto, comprova a eficiência da atividade pozolânica no consumo do hidróxido de cálcio.

4.2. Espectroscopia de fluorescência de raios X

A composição química, em porcentagem, da metacaulinita é apresentada na Tabela 12. Pode-se observar que os principais óxidos que a compõem são SiO₂ (55,40%) e o Al₂O₃ (40,84%). Tais elementos estão relacionados ao argilomineral caulinita e ao mineral quartzo, conforme é apresentado posteriormente na análise de DRX.

Portanto, este material se enquadra nas condições específicas da NBR 12653 como sendo de Classe N – pozolanas naturais e artificiais, como argilas calcinadas, onde a porcentagem mínima de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ deve ser de 70%.

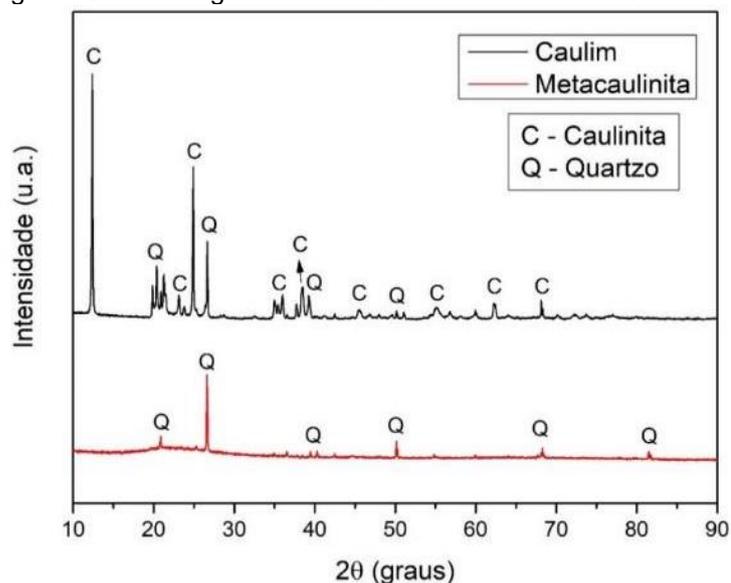
Tabela 12 – Análise química da metacaulinita

Elemento		Concentração (%)
Dióxido Óxido de Silício	SiO ₂	55,40
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	40,84
Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	1,77
Óxido de Fósforo	P ₂ O ₅	0,75
Titânio	Ti	0,67
Óxido de Potássio	K ₂ O	0,23
Óxido de Cálcio	CaO	0,21
Vanádio	V	0,02

4.3. Difração de raios X

No difratograma do caulim, Figura 25, observa-se a presença de quartzo (formulação química SiO₂) e minerais dos grupos da caulinita (formulação química Al₂(SiO₅)(OH₄)). Do ponto de vista mineralógico, este material é constituído principalmente de uma fase amorfa, provavelmente sílica opalina, e pelas fases caulinita, quartzo (areia quartzosa) e muscovita como impurezas principais.

Figura 25 – Difratograma de raios X do caulim e da metacaulinita

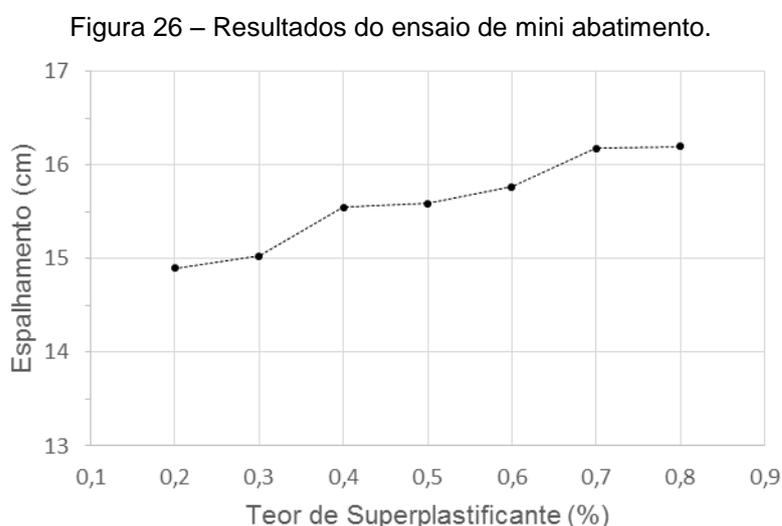


Fonte: Pereira (2019).

É possível confirmar a transformação da caulinita em metacaulinita, que desaparece no difratograma após a calcinação, tendo em vista que se decompõe em sílica não-cristalina (amorfa) (Percival *et. al.*, 1974).

4.4. Mini abatimento – Kantro

No gráfico da Figura 26 é possível verificar o valor do espalhamento da pasta para cada teor ensaiado.



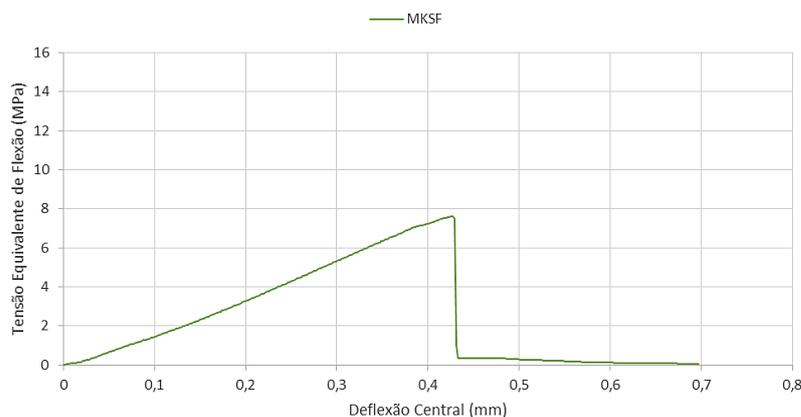
É verificada uma inclinação mais acentuada da curva de 0,3% para 0,4%. Ainda que, para teores elevados, haja um incremento da medida de espalhamento, tendo em vista os pontos de vista econômico e de eficiência, adotou-se o teor de 0,4% de superplastificante na pesquisa.

4.5. Comportamento dos compósitos à flexão

Os resultados e análises dos ensaios de flexão em quatro pontos realizados nos compósitos são apresentados neste item, de acordo com as diferentes disposições e volume dos reforços de cada compósito. No corpo principal do texto estão contidas as curvas típicas, sendo as demais curvas apresentadas no Anexo A.

A curva tensão x deflexão da placa cimentícia com substituição parcial do cimento por pozolana (matriz utilizada na pesquisa), sem reforço (MKSF) é apresentada no gráfico da Figura 27.

Figura 27 – Curva típica de tensão equivalente de flexão x deflexão do MKSF.



A tensão de primeira fissura da placa com 0% de reforço equivale à tensão de flexão máxima, bem como a deflexão equivalente de rompimento, estas duas características são dominadas pela matriz, onde o material apresenta um comportamento linear elástico (MELO FILHO, 2012). Os valores obtidos no ensaio são apresentados na Tabela 13.

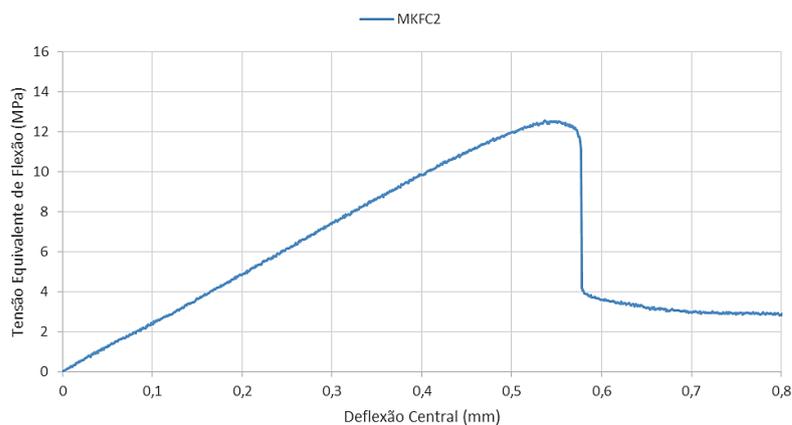
Tabela 13 – Resultado do ensaio de flexão para o MKSF.

CP	1ª Fissuração	
	σ_{1f} (MPa) (CV %)	d_{1f} (mm) (CV %)
MKSF	7,76 (13,80)	0,43 (3,11)

4.5.1. Compósito com fibras curtas

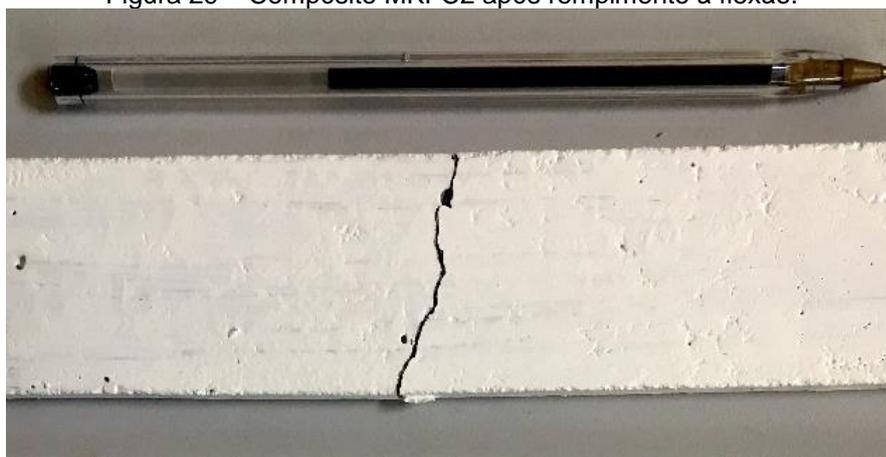
O compósito reforçado com fibras curtas (MKFC2) possui comportamento à flexão similar à placa cimentícia apresentada anteriormente. Na Figura 28 é apresentada a curva típica de tensão e deflexão.

Figura 28 – Curva típica de tensão equivalente de flexão x deflexão do compósito MKFC2.



Os compósitos sofreram ruptura brusca, sem formação de fissuras aparentes, conforme Figura 29, ainda que apresentem certa resistência residual pós fissuração.

Figura 29 – Compósito MKFC2 após rompimento à flexão.



Na Figura 30 estão os gráficos das amostras MKSF e MKFC2 e na Tabela 14 os valores médios da tensão de primeira fissuração (σ_{1f}), deflexão de primeira fissura (d_{1f}) e tensão pós fissuração (σ_{pf}) desses dois laminados.

Figura 30 – Curvas típicas de tensão equivalente de flexão x deflexão do MKSF e do MKFC2

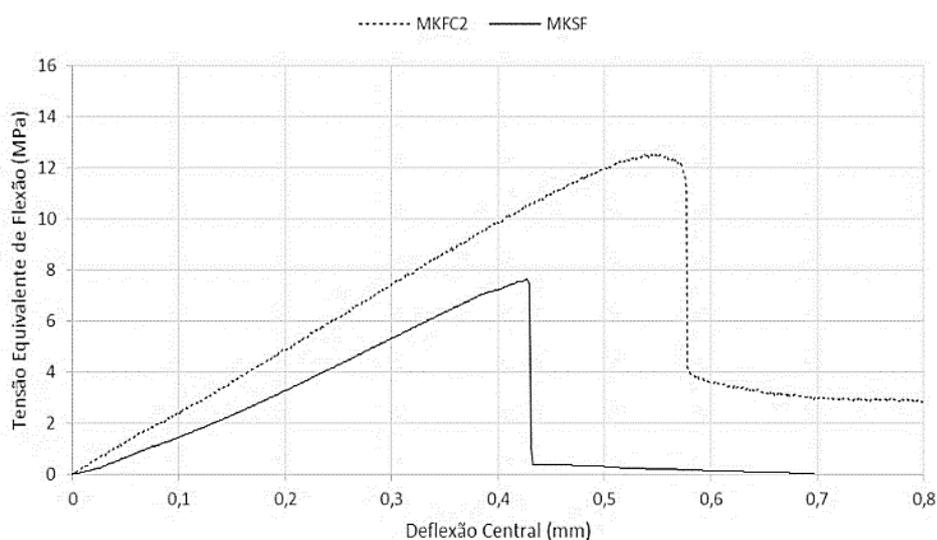


Tabela 14 – Valores médios de tensão e deflexão do ensaio de flexão do MKSF e MKFC2.

CP	1ª fissuração		Pós-fissuração
	σ_{1f} (MPa) (CV %)	d_{1f} (mm) (CV %)	σ_{pf} (MPa) (CV %)
MKSF	7,57 (8,59)	0,43 (3,11)	0
MKFC2	11,94 (12,01)	0,53 (3,13)	2,74 (14,24)

O compósito MKFC2 suportou uma tensão de primeira fissuração 57% maior que o MKSF, e deflexão superior em 23%.

Aos 0,7 mm de deflexão, o MKSF não apresentou tensão equivalente de flexão e, a dispersão de fibras curtas fez com que o MKFC2 mantivesse uma tensão pós fissuração de 2,74 MPa.

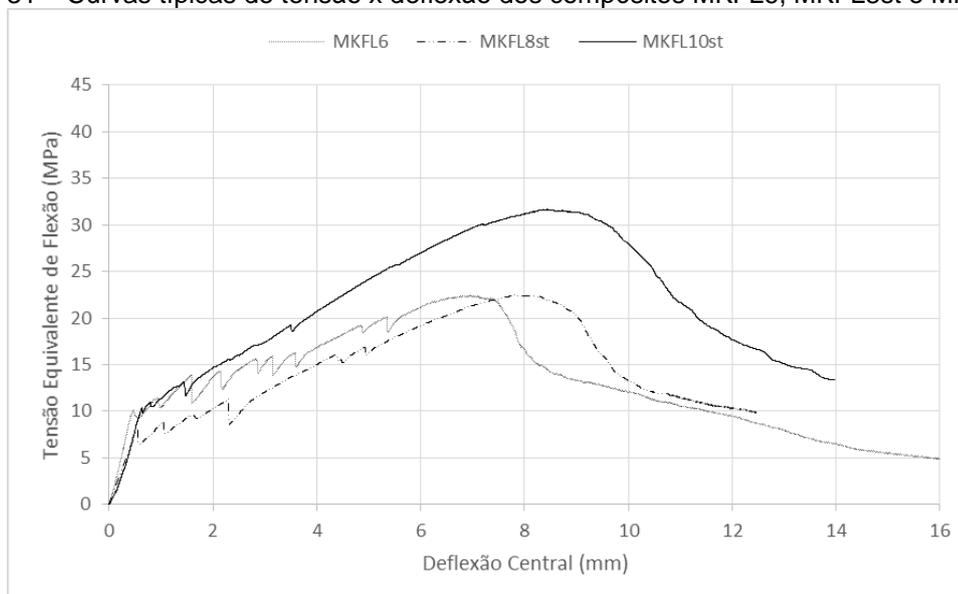
MELO FILHO (2012) produziu um compósito similar utilizando fibras curtas de sisal com teor de 2%, porém, com comprimento de 2,5 cm. O resultado do ensaio de flexão para o compósito desenvolvido nesta pesquisa, com 2% de fibras curtas de

malva, apresentou valores superiores para tensão de primeira fissura, deflexão na primeira fissura e tensão última.

4.5.2. Compósitos com fibras longas

As curvas típicas de tensão equivalente de flexão x deflexão dos compósitos reforçados com 6% (MKFL6), 8% (MKFL8st) e 10% (MKFL10st), sem tratamento das fibras, podem ser observadas na Figura 31.

Figura 31 – Curvas típicas de tensão x deflexão dos compósitos MKFL6, MKFL8st e MKFL10st.



Diferentemente do MKFC2, os laminados reforçados com fibras longas apresentaram um incremento de tensão após a primeira fissuração, caracterizando assim um comportamento de endurecimento na flexão.

Na Tabela 15 encontram-se os valores médios e respectivos coeficientes de variação de tensão de primeira fissuração (σ_{1f}), deflexão de primeira fissura (d_{1f}), máxima tensão atingida ($\sigma_{\text{máx}}$) e deflexão referente à máxima tensão ($D_{\text{máx}}$).

Tabela 15 – Valores médios de tensão e deflexão do ensaio de flexão dos compósitos MKFL6, MKFL8st e MKFL10st.

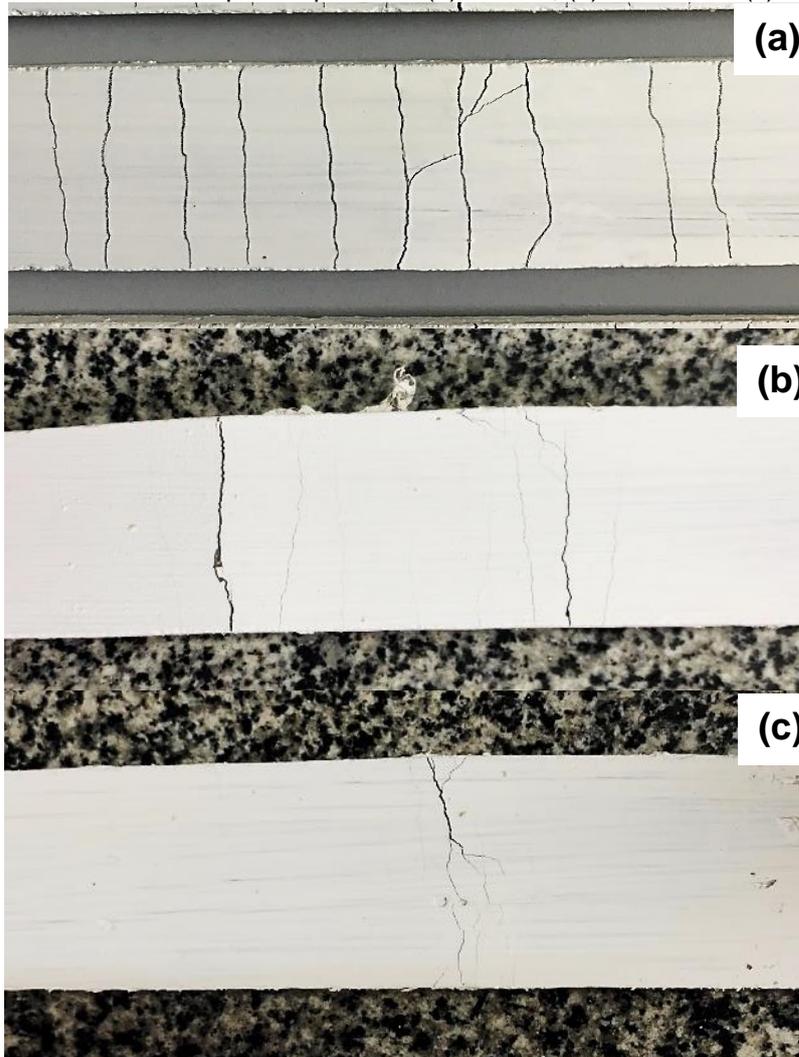
CP	1ª fissuração		Máximo	
	σ_{1f} (MPa) (CV %)	d_{1f} (mm) (CV %)	$\sigma_{máx}$ (MPa) (CV %)	$D_{máx.}$ (mm) (CV %)
MKFL6	11,55 (14,58)	0,49 (7,06)	24,59 (14,51)	6,91 (11,50)
MKFL8st	7,57 (8,59)	0,89 (8,59)	19,01 (10,80)	10,15 (13,39)
MKFL10st	10,13 (2,54)	0,69 (10,22)	32,28 (7,74)	8,16 (2,26)

Nota-se que, dentre os três compósitos, o MKFL6 apresentou maior tensão de primeira fissura, o que pode ter ocorrido pela dificuldade de conformação das placas para teores mais elevados, porém, sua deflexão de primeira fissura foi inferior às demais.

Entre a primeira fissura e a tensão máxima ocorreram quedas de carga mais frequentes na curva do MKFL6 e maior formação de fissuras, conforme Figura 32(a), enquanto o MKFL10st manteve a ascensão de carga mais constante, com fissuração bem reduzida, Figura 32(c). Em plano intermediário encontra-se o MKFL8st, que possui curva com comportamento similar ao MKFL6, porém, com menos variações de carga e menor quantidade de fissuras do que este, Figura 32(b).

O MKFL10st se destacou quanto à tensão última, que atinge um valor 69% superior à menor das tensões, do MKFL8st, e maior tensão residual.

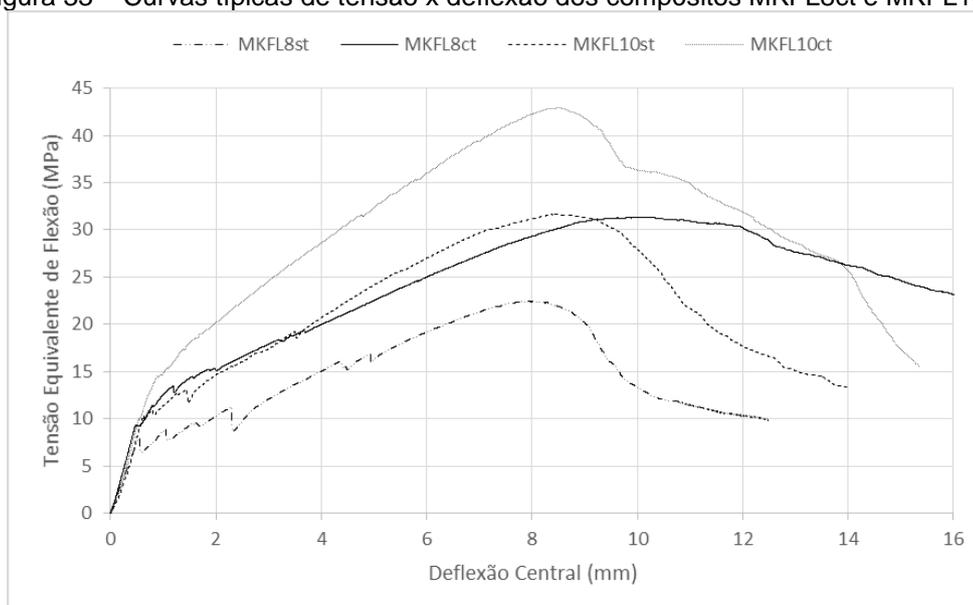
Figura 32 – Fratura dos corpos de prova do (a) MKFL6, (b) MKFL8st e (c) MKFL10st.



4.5.3. Influência do tratamento das fibras

Para os compósitos reforçados com 8% e 10% de fibras longas foram feitas as análises do comportamento dos mesmos com impermeabilização do reforço. A Figura 33 mostra o gráfico resultante do ensaio.

Figura 33 – Curvas típicas de tensão x deflexão dos compósitos MKFL8ct e MKFL10ct.



Os valores médios das obtidos e seus respectivos coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultado do ensaio de flexão para os compósitos MKFL8

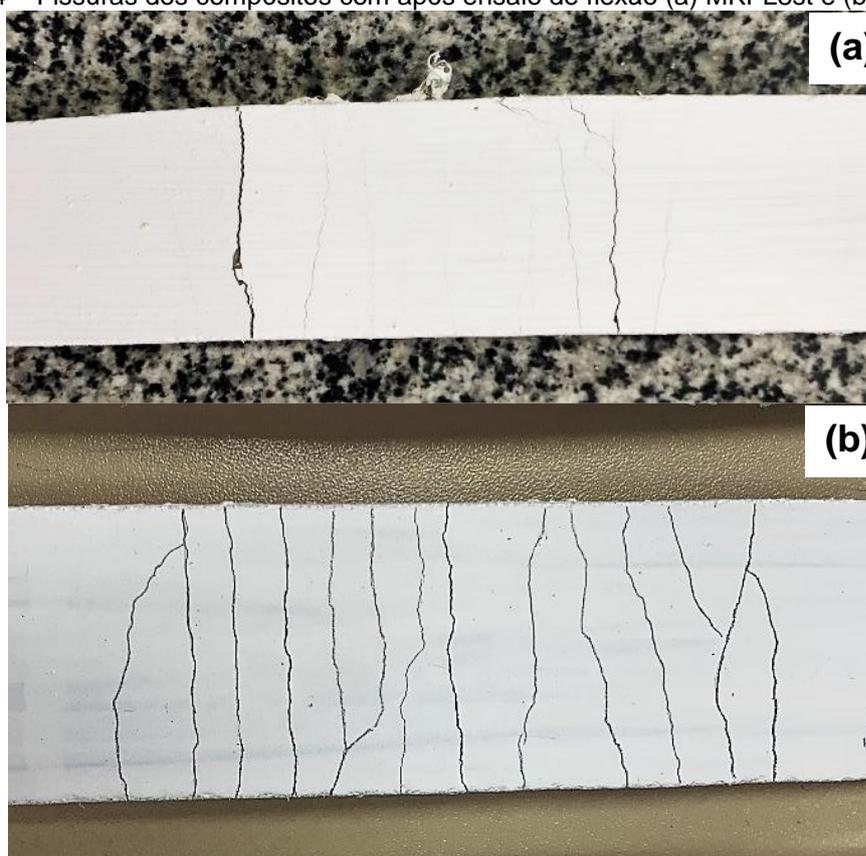
CP		1ª fissuração		Máximo	
		σ_{1f} (MPa) (CV %)	d_{1f} (mm) (CV %)	$\sigma_{máx}$ (MPa) (CV %)	$D_{máx.}$ (mm) (CV %)
8%	MKFL8ct	10,21 (6,27)	0,60 (12,68)	33,55 (20,79)	10,18 (13,03)
	MKFL8st	7,57 (8,59)	0,89 (8,59)	19,01 (10,80)	10,15 (13,39)
10%	MKFL10ct	14,61 (4,03)	0,95 (17,48)	43,09 (8,20)	9,38 (8,57)
	MKFL10st	10,13 (2,54)	0,69 (10,22)	32,28 (7,74)	8,16 (2,26)

O compósito MKFL8ct apresentou resultados similares ao compósito MKFL10st, ambos suportam tensão de primeira fissuração e tensão máxima de flexão aproximadamente 25% superiores aos do MKFL8st.

A pesquisa de MELO FILHO (2012) com compósitos reforçados com 10% de fibras de sisal atingiu uma resistência última à flexão de 24,38MPa, enquanto o presente estudo apresentou 43,09MPa para o compósito com 10% de fibras tratadas. O que condiz com as propriedades destas fibras, pois apesar das fibras de sisal possuírem uma resistência à tração superior às fibras de malva, estas últimas, por sua vez, possuem diâmetro reduzido, o que promove melhor interação entre a fase matricial e dispersa do compósito.

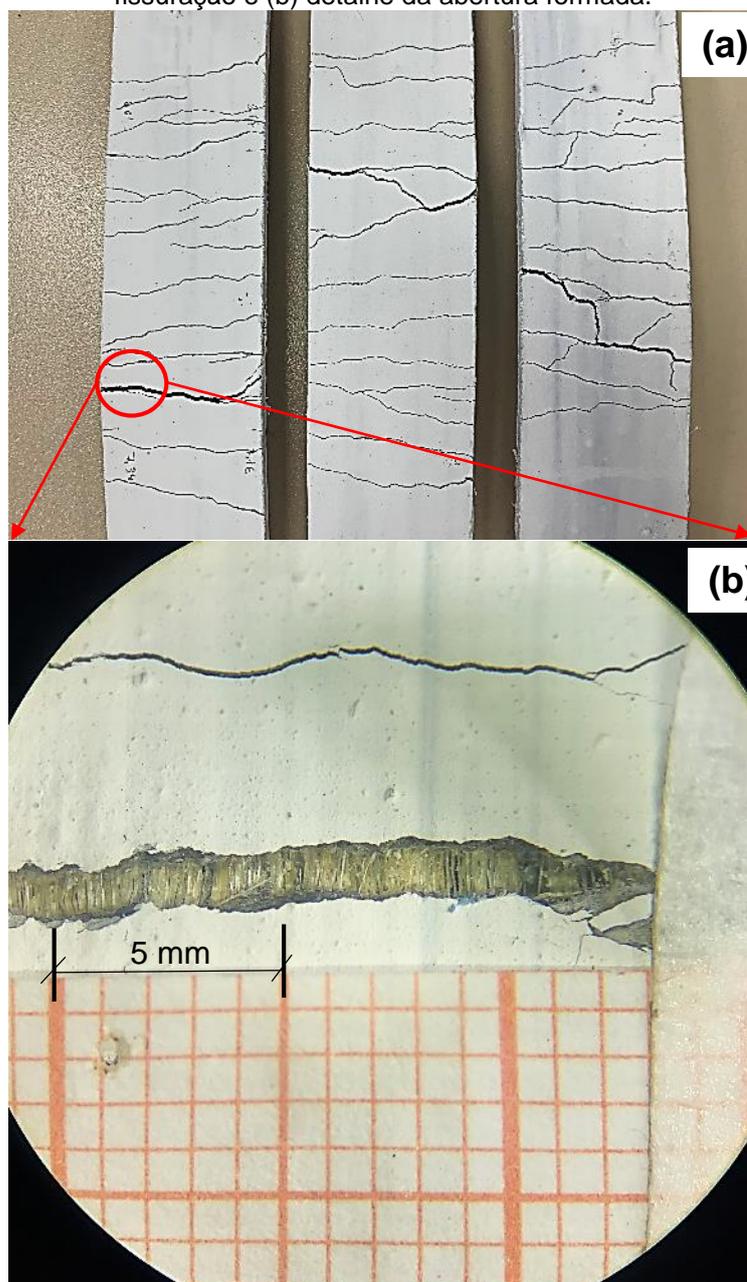
Na Figura 34 tem-se o estado das fissuras formadas nos corpos de prova com 8% de fibras, sendo menor a quantidade de fissuras do MKFL8st, porém, com abertura maior.

Figura 34 – Fissuras dos compósitos com após ensaio de flexão (a) MKFL8st e (b) MKFL8ct



Na Figura 35(a) é possível observar o estado de múltipla fissuração do compósito MKFL10 após a finalização do ensaio de flexão e na Figura 35(b) o detalhe de uma das fissuras formadas, estando visível a camada de reforço, com regularidade de distribuição das fibras neste ponto e a evidência de que não ocorreu o rompimento das mesmas.

Figura 35 – Compósito MKFL10ct após ensaio de flexão com (a) comportamento de múltipla fissuração e (b) detalhe da abertura formada.



Outro fator que pode ser observado nas curvas típicas de flexão, com relação à impermeabilização das fibras, é que os compósitos que receberam este tratamento apresentaram maior tensão residual pós fissuração. Portanto, na Tabela 17 tem-se o comparativo de tensões, aos 12mm de deslocamento.

Tabela 17 – Valores típicos de tensão de pós fissuração em 12mm de deflexão

Compósito	σ_{pf} (MPa)
MKFL8st	10,28
MKFL8ct	30,23
MKFL10st	17,67
MKFL10ct	31,91

As curvas com mais eventos de perdas de tensão são aquelas em que o reforço do laminado não foi submetido ao tratamento polimérico. A uniformidade ao longo da ascensão das tensões pode ser resultante de uma melhor interação na interface fibra-matriz, com transferência de esforço, e menor fragilidade das fibras. Os compósitos MKFL8ct e MKFL10ct possui uma maior tensão residual equivalente, quando comparados àqueles com mesmo volume de fibras sem tratamento, apresentando 19,95MPa e 14,24MPa a mais aos 12 milímetros de deflexão.

Dentre estes compósitos analisados, o MKFL8st é o que possui as menores médias de tensão de primeira fissuração e tensão máxima de flexão, sendo que o MKFL10ct apresenta os maiores valores, superior ao MKFL8st em 92% com relação à tensão de primeira fissuração e 126% com relação à tensão máxima de flexão atingida nos ensaios.

CAPÍTULO 5

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos na pesquisa, é possível concluir que:

- A calcinação do caulim atendeu à necessidade do estudo, com desidroxilação da caulinita e obtenção de uma estrutura amorfa;
- O tratamento da matriz com substituição de 50%, em massa, do cimento por metacaulinita apresentou um reduzido teor de hidróxido de cálcio, o que colaborou para melhor conservação das fibras e, ainda, a diminuição do custo de produção dos compósitos, por reduzir o uso do cimento Portland;
- A adição de fibras curtas dispersas aleatoriamente na matriz colaborou para um compósito com resultados de resistência à flexão melhores do que o laminado sem reforço, apresentando tensão máxima em torno de 11,87MPa, e uma média de 2,96MPa pós fissuração.
- Os resultados dos ensaios mecânicos de tração na flexão indicam que o compósito com volume de 10% de fibras longas, com tratamento polimérico, apresentou melhor comportamento, com tensão de primeira fissuração e tensão máxima, com médias de 14,61MPa e 43,09MPa respectivamente;

Como sugestão para futuras análises, recomenda-se o estudo:

- De diferentes argilas cauliníticas e, talvez, outra porcentagem de substituição, para o tratamento da matriz, a fim de eliminar completamente o hidróxido de cálcio;
- Da aplicação de tratamento para fibras curtas e para o volume de 6% de fibras longas;
- De demais teores de fibras curtas, para determinar o volume ideal, bem como o aperfeiçoamento do processo de moldagem;
- De um maior número de amostras, a fim de reduzir o coeficiente de variação nos resultados dos ensaios;
- De durabilidade, adotando as técnicas de envelhecimento natural e acelerado, e de caracterização física e química dos compósitos e fibras após idade de 28 dias;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 7581 - Telha ondulada de fibrocimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 11578: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

_____. NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro, 2011a.

_____. NBR 12317: Verificação do desempenho de aditivos para o concreto. Rio de Janeiro, 2011a.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JR, H. Uso de materiais alternativos a base de fibras vegetais na construção civil: experiência brasileira. Seminário Iberoamericano, p. 23-40, 1997.

AGOPYAN, V., SAVASTANO JR, H., JOHN, V. M., CINCOTTO, M. A. Developments on vegetable fibre-cement based material in São Paulo, Brazil: an overview. Cement and Concrete Composites, v. 27, p. 527 – 536, 2005.

AGUIAR, Alcineia Silva de. Estudos das propriedades físicas e mecânicas de placas cimentícias reforçadas com fibras longas de malva. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, 2016.

ASTM C393. C393-06: Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure, 2006.

BAPTISTA, C. Notas de Aula – Ensaio Mecânicos. Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/40921531-4-ensaio-de-flexao-ensaios-mecanicos-prof-carlos-baptista-eel.html>>. Acessado em: 15 de julho de 2018.

BENVINDO, A. D., & ANTONIO, F. F. (2010). Introdução ao Tratamento de Minérios. Em A. D. BENVINDO, J. S. ALVES, & S. A. CRISTINA, Tratamento de Minérios 5ª edição (pp. 3-18). Rio de Janeiro: CETEM/MCT.

CALLISTER, William D. Jr.; RETHWISCH, David G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012. 817 p.

CALLISTER, William D. Jr.; RETHWISCH, David G. Ciência e Tecnologia de Materiais: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2013.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

CAVALCANTE, D. G. C. Estudo das características física, mecânica e química de compósitos cimentícios reforçados com tecido de juta e malva tratado e adição de

materiais pozolânicos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas – PPGEC, Amazonas, 2017

CBCS - Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. Aspectos da construção sustentável no Brasil e promoção de políticas públicas: Subsídios para a promoção da construção civil sustentável. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2014.

CÉSAR, T. N. M. B. et al. Mechanical Behavior of Polymer Composites Reinforced by Sisal and Malva Particulate Fibers Adding Wood Waste. SAE Technical Paper, 2016.

CORDEIRO, G. C.; ROCHA, C. A., & TOLEDO FILHO, R. D. (2013). Influence of stone cutting waste and ground waste clay brick on the hydration and packing density of cement pastes. IBRACON - Structures and Materials Journal, v.6, n.4, pp. 661-680.

CUNHA, J. S. C. et al. Estudo de compósitos poliuretânicos reforçados com fibras de Malva. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Metalúrgica) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

DAVIDOVITS, J. "Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology", Proceedings of the Second International Conference Geopolymère "99", p. 9-40, Saint-Quentin, France, 1999.

DUTRA, C., & GOMES, C. (1984). A fluorescência de raios X na geologia. Em Técnicas analíticas aplicadas à geologia (pp. 84-120). São Paulo: Edagard Blücher.

DWECK, J.; BUCHLER, P. M.; COELHO, A. C. V.; CARTLEDGE, F. K. Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate. Thermochemica Acta, n. 346, p. 105-113, 2000.

DWECK, J., CUNHA, A. L. C., PINTO, C. A., GONÇALVES, J. P., BÜCHLER, P. M. Thermogravimetry on Calcined Mass Basis – Hydrated Cement Phases and Pozzolanic Activity Quantitative Analysis, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v.97, 2009.

ESMERALDO, M. A.. Preparação de novos compósitos suportados em matriz de fibra vegetal/natural. Dissertação (Mestrado em Química Inorgânica) – Departamento de Química Orgânica e Inorgânica, Universidade Federal do Ceará. 119f. 2006.

FARUK, O.; BLEDZKI, A. H.; FINK, H. P.; SAIN, M.; Biocomposites reinforced with natural fibers, Progres in Polymer Science. Centre for Biocomposites and Biomaterials Processing, University of Toronto, 33 Willcocks, p.1552-1596, Canadá, 2012.

FIDELES, M. E. A. Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

FITOS, M. et al. Pozzolanic activity of thermally and mechanically treated kaolins of hydrothermal origin. Applied Clay Science, v. 116, p. 182-192, 2015.

GRACE. Aditivos para concreto. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/grace/adva_cast525>. Acesso em: 15 abril 2017.

HENRIQUES, J. D. de O. et al. Avaliação da viabilidade técnica de produção de telha de fibrocimento usando fibras alternativas. *Blucher Chemical Engineering Proceedings*, v. 1, n. 2, p. 9417-9424, 2014.

HILL, C.; HUGHES, M.. Natural fibre reinforced composites opportunities and challenges. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, v. 4, n. 2, p. 148-158, 2010.

HUSS, F. O. Estabilização química de solos para fins rodoviários. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Amazonas, Amazonas, 2018.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste: a miniature slump test. *Cement, Concrete and Aggregates*, Orlando, v. 2, , 1980.

KOLAROVÁ, K., VOSMANSKÁ, V., RIMPELOVÁ, S., & SVORCIK, V. (2013). Effect of plasma treatment on cellulose fiber. *Cellulose*, v. 20, n. 3, p.953-961, 2013.

KLOCK, Umberto et al. *Química da madeira*. Curitiba: UFPR, v. 3, 2005.

LAVOINE, N. et al. Microfibrillated cellulose—Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review. *Carbohydrate polymers*, v. 90, n. 2, p. 735-764, 2012.

LEÃO, A. Produção de juta e malva envolve 15 mil famílias no norte do país. *Revista Globo Rural*. Globo, 2010. Entrevista concedida a Luís Roberto Toledo. Disponível em: <http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,,ERT146775-18078,00.html>>. Acesso em: 18 agosto 2017.

MARGEM, J. I. Estudo das características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de malva. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense. 139f. 2013.

MARINELLI, A. L. et al. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 18, n. 2, p. 92-99, 2008.

MARTINS NETO, S. F. Material compósito de matriz frágil reforçado com fibras naturais de sisal e malva: caracterização e correlações das propriedades mecânicas. 2011, p. 94. Dissertação (Mestrado) Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

MARQUES, M. G. d S.. Caracterização das propriedades da fibra vegetal de arumã para aplicação como reforço a matriz cimentícia. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J M. Evolução em tecnologia do concreto. In: *Concreto, Microestrutura, Propriedades e Materiais*, v. 3, 2008.

MELO FILHO, J. A. Desenvolvimento e Caracterização de Laminados Cimentícios Reforçados com Fibras Longas de Sisal. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

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

MELO FILHO, J.A., SILVA, F.A., TOLEDO FILHO, R.D. Degradation Kinetics and Aging Mechanisms on Sisal Fiber Cement Composite Systems, *Cement & Concrete Composites*, v.40, 2013.

MONTEIRO, S. N.; MARGEM, F. M.; SANTOS, L F L. Impact resistance of polyester composites reinforced with ramie waste fibers. In: *Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology - REWAS 2008*, 2008, Cancun, Mexico. *Proceedings of the 2008 Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology - REWAS 2008*. Warrendale, PA, EUA: The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), 2008. v. 1. p. 505-510.

NEVES JUNIOR, A., TOLEDO FILHO, R. D., FAIRBAIRN, E. M. R., DWECK, J. Early Stages Hydration of High Initial Strength Portland Cement Part I. Thermogravimetric Analysis on Calcined Mass Basis, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 108, 2012.

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

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

OLIVEIRA, M. P. de, BARBOSA, N. P. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland em argamassas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.10, n.2, p.490–496, 2006.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 2, p. 575-581, 2011.

PADILHA, J. A. S. et al. Argamassa leve reforçada com polpa de sisal: compósito de baixa condutividade térmica para uso em edificações rurais. *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v.21, n.1, p.1-11, jan. 2001.

PERCIVAL, H. J.; DUNCAN, J. F.; FOLSTER, P. K.. Interpretation of the kaolinite-mullite reaction sequence from infrared absorption spectra, *J. Am. Ceram. Soc.* 57, 2 (1974).

PEREIRA, M. C. M. Desenvolvimento de painéis sanduíche com núcleo de concreto leve com caroço de açaí e laminados cimentícios reforçados com fibras de juta. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas. 2019.

PINHEIRO, M. F. de C. A.. Compósitos avançados reforçados com fibras naturais para a construção. Dissertação em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Portugal, 2008.

PORTELA, G. O. S.; Compósito Geopolimérico Reforçado com Tecido de Juta. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas. 2016.

PRASAD, S. V.; PAVITHRAN, C.; ROHATGI, P. K. Alkali treatment of coir fibre – polyester composites. *Journal of Applied Polymer Science*, New York, v.18, p.1443-1454, 1983.

RAMLI, H., HOEKWAN, W., ABAS, N. F. Strength and durability of coconut-fibre reinforced concrete in aggressive environments. *Construction and Building Materials*, v. 38, p. 554-566, 2013.

REBELO, V. S. M.. Efeitos da mercerização em fibras de Piaçava Amazônica (*Leopoldinia piassaba*) para produção de painéis de partículas de média densidade. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas. 2016.

ROCHA, C. A. A., CORDEIRO, G. C., TOLEDO FILHO, R. D. Influence of Stone Cutting Waste and Ground Waste Clay Brick on the Hydration and Packing Density of Cement Pastes, *Ibracon Structures and Materials Journal*, v.6, 2013.

RODRIGUES, A. S.; PINTO, D. L.; OLIVEIRA, F. L. M.; CORREIA, G. V. B.; BENJAMIN, W. S. Produção de telha sem amianto usando fibras de coco verde e cinzas de cana-de-açúcar. In: 9º Encontro de Tecnologia UNIUBE, 2015. Disponível em: <<http://www.uniube.br/eventos/entec/2015/arquivos/aprovados/35.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2018.

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

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

SANTOS, S. Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho. 2006, p.267. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SATYANARAYANA, K. G.; ARIZAGA, G. G.C.; WYPYCH, Fernando. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers - An overview. *Progress in polymer science*, v. 34, n. 9, p. 982-1021, 2009.

SAVASTANO JR, H.; LUZ, P. H. C.; NOLASCO, Adriana Maria. Seleção de resíduos de alguns tipos de fibra vegetal, para reforço de componentes de construção. *Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis*, v. 1, p. 107-120.

SAVASTANO JR, H., AGOPYAN, V. Transition Zone Studies of Vegetable Fiber Cement Paste Composites. *Cement and Concrete Composite*, v. 21, p. 49-57, 1999.

SAVASTANO JR., H.; AGOPYAN, V.; NOLASCO, A. M.; PIMENTEL, L. L. Plant fibre reinforced cement components for roofing. *Construction and Building Materials*, v. 13, n. 8, p. 433-438, 1999.

SHIHONG, L.; BENLIAN, Z.; QIYUN, Z.; XIANRONG, B. A new kind of super-hybrid composite material for civil use - ramie fibre/Al. *Composites*, v. 25(3), p. 225-228, 1994.

SILVA, A. C. Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Departamento de Engenharia de Construção Civil/EPUSP - São Paulo, 2002.

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

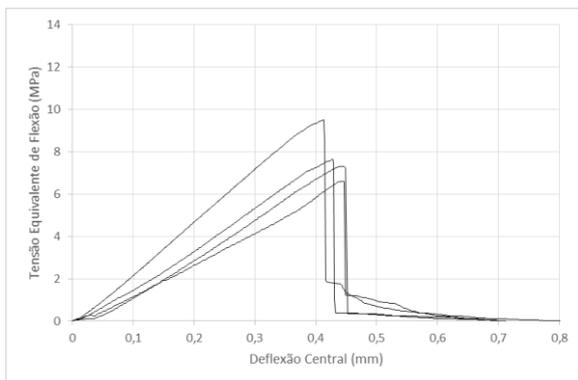
WEDDING, P.; KANTRO, D. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste-A Miniature Slump Test. *Cement, Concrete and Aggregates*, v. 2, n. 2, p. 95, 1980.

VARELA, M. L. *et al.* Otimização de uma metodologia para análise mineralógica racional de argilominerais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN (pp. 387-391), 2005.

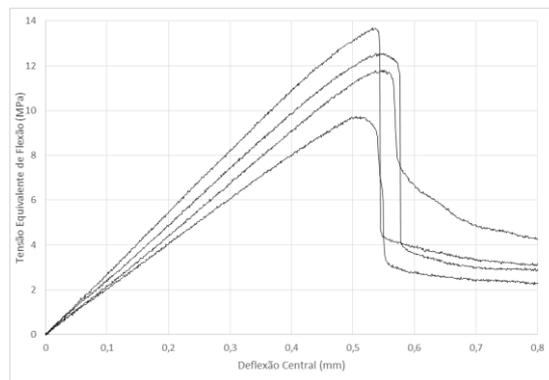
ZHOU, X., GHAFAR, S. H., DONG, W. OLADIRAN, O., FAN, M. Fracture and impact properties of short discrete jute fibre-reinforced cementitious composites. *Materials and Design*, v. 49, p. 35 – 47, 2013.

ANEXO A

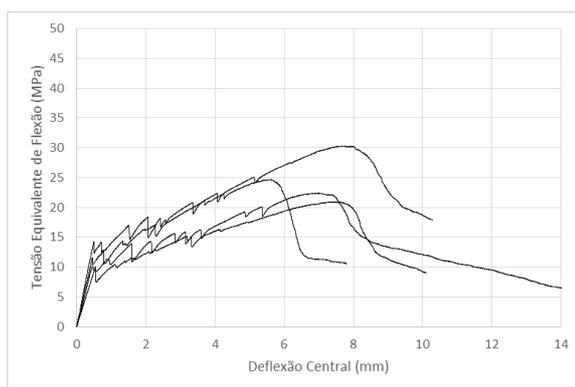
As curvas dos ensaios de flexão em quatro pontos estão apresentadas nas figuras abaixo.



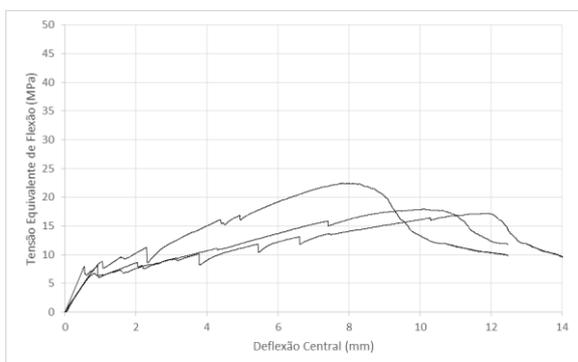
(a)



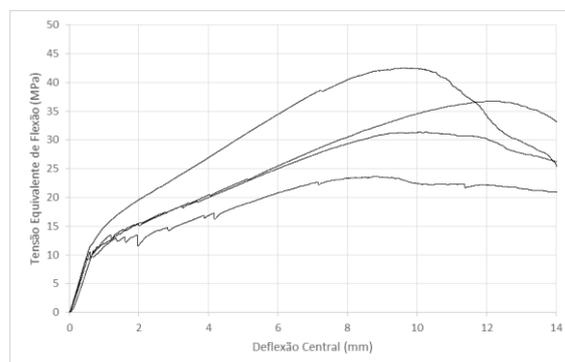
(b)



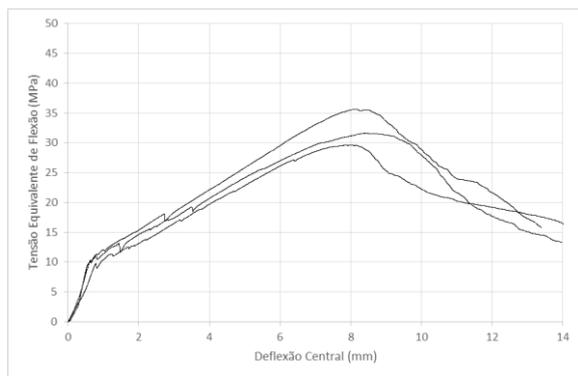
(c)



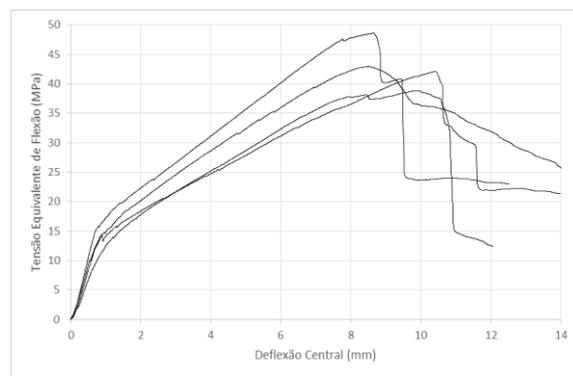
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura A. 1 – Curvas dos ensaios de flexão em 4 pontos do laminado (a) MKSF e dos compósitos (b) MKFC2, (c) MKFL6, (d) MKFL8st, (e) MKFL8ct, (f) MKFL10st e (g) MKFL10ct.