

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ALESSANDRA MONIQUE WEBER

**VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE FIBRA DE CURAUÁ
(*ANANAS ERECTIFOLIUS*) COMO REFORÇO EM COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS LAMINADOS**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2018

ALESSANDRA MONIQUE WEBER

**VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE FIBRA DE CURAUÁ
(*ANANAS ERECTIFOLIUS*) COMO REFORÇO EM COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS LAMINADOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Adalberto Matoski

CURITIBA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

W373v Weber, Alessandra Monique
2018 Viabilidade técnica da utilização de fibra de curauá
(Ananas erectifolius) como reforço em compósitos cimentícios
laminados / Alessandra Monique Weber.-- 2018.
115 f.: il.; 30 cm.

Texto em português, com resumo em inglês
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica
Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. Área de concentração: Construção Civil, 2018

Bibliografia: p. 95-110

1. Ananas erectifolius. 2. Fibras vegetais - Testes.
3. Cimento Portland. 4. Materiais compostos. 5. Argila
caulinítica calcinada. 6. Construção civil. 7. Engenharia
civil - Dissertações. I. Matoski, Adalberto, orient.
II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de
Pós-graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 624

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba
Bibliotecária Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 144

A Dissertação de Mestrado intitulada VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE FIBRA DE CURAUÁ (*Ananas Erectifolius*) COMO REFORÇO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS LAMINADOS, defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Alessandra Monique Weber**, no dia 08 de março de 2018, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Construção Civil, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA:

Prof(a). Dr(a). Adalberto Matoski - Presidente - UTFPR

Prof(a). Dr(a). Arthur Medeiros – UTFPR

Prof(a). Dr(a). Rosilani Trianoski - UFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 08 de março de 2018.

Carimbo e Assinatura do(a) Coordenador(a) do Programa

Dedico este trabalho ao meu companheiro
e melhor amigo, Kalil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Kalil por toda paciência, apoio incondicional e incentivo. Obrigada por sempre me ouvir mesmo sem entender nada, me dar a força que eu precisava (inclusive carregando sacos de cimento), comemorar cada conquista e torcer por mim. Obrigada por tanto carinho.

Aos meus pais Eltrita e Jair por todo amor e que mesmo distantes sempre me apoiaram e me auxiliaram nesse caminho. Por me ensinarem a superar todas as adversidades da vida que me fez chegar até aqui mais forte. Ao meu irmão, amigo e confidente André por cuidar dos meus pais desde que sai de casa.

Agradeço a minha família de Curitiba que me acolheu, foram ouvidos para as lamúrias e uma agradável companhia. Minha gratidão à Suelly, Mustafa, Sálua, Samir e Karime. Em especial aos meus sobrinhos Rayhan e Munir por tornarem alguns momentos da minha vida plenos de alegria.

Ao meu orientador Prof. Dr. Adalberto Matoski por todo aprendizado, orientação e confiança nesse processo.

Aos professores do PPGEC e DACOC que contribuíram com a realização deste trabalho através de conhecimento e auxiliando em ensaios.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais e Construção da UTFPR Ecoville Felipe e Gustavo pela parceria em ensaios, a prontidão em ajudar e em solucionar problemas.

Ao Professor Alan Sulato do Laboratório de Química da Madeira da UFPR que não mediu esforços para me ajudar na caracterização da fibra.

À estagiária Samara do Laboratório de Saneamento que me auxiliou em ensaios de caracterização.

Ao Matheus Alves minha gratidão pela força bruta na realização de ensaios e a companhia no laboratório.

Aos meus colegas, principalmente os da 'salinha' que estavam sempre prontos para auxiliar em problemas técnicos, científicos e emocionais. A companhia de vocês foi fundamental para essa trajetória ser mais leve.

À Luana que se tornou uma grande amiga, por todos os desabafos, pelos momentos bons e ruins e por me orientar neste trabalho. E a todos meus amigos

que estiveram presentes nesse período e me ajudaram esquecer as dificuldades e trouxeram alegria para os meus dias.

Agradeço a empresa Diprotec pelo superplastificante doado, em nome de Maria Goreti. E à Metacaulim do Brasil pela doação do metacaulim.

E todos aqueles que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho, o meu reconhecimento.

*Es ist noch kein Meister vom Himmel
gefallen (Provérbio alemão).*

Nenhum mestre nunca caiu do céu
(Provérbio alemão).

RESUMO

WEBER, A. M. **Viabilidade técnica da utilização de fibra de curauá (*Ananas erectifolius*) como reforço em compósitos cimentícios laminados**. 2018. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

O objetivo deste estudo foi avaliar a viabilidade técnica da utilização da fibra vegetal de curauá (*Ananas erectifolius*) como reforço em compósitos cimentícios laminados e analisar a substituição parcial do cimento por metacaulim. Estes compósitos constituíram-se de matriz cimentícia composta por cimento CP V-ARI, areia, água e superplastificante. O metacaulim foi utilizado para substituição parcial do cimento em 50% objetivando o consumo do hidróxido de cálcio gerado durante a hidratação do cimento. Previamente a produção dos compósitos foi realizada análises das propriedades da fibra de curauá e estudo de dosagem da matriz. Para avaliar a compatibilidade da fibra com a matriz realizaram-se ensaios para verificar o índice de inibição, avaliando se a imersão em água quente das fibras e a adição do aditivo a base de cloreto de cálcio influenciam a mistura. Para a produção dos compósitos laminados, foi investigada a influência da fração volumétrica de fibras no compósito (0%, 5%, 10%, 15% e 20%) e a substituição do cimento por metacaulim. O compósito foi produzido com cinco camadas, intercalando três camadas de matriz cimentícia e duas camadas de reforço de fibra de curauá. Os ensaios visaram avaliar o comportamento físico e mecânico dos compósitos em diferentes dias de idade (7, 28 e 90 dias). Os resultados indicam que a imersão da fibra em água quente e adição de cloreto de cálcio se mostraram eficientes para classificar a fibra vegetal como de baixa inibição com a matriz. Para os compósitos laminados, sua produção foi considerada viável tecnicamente para adições em volume de fibra de curauá até 15%, pois acima desse valor a homogeneização do compósito é prejudicada pelo volume de fibra. A longo prazo a adição de metacaulim como substituto do cimento aumentou em média 120% as propriedades mecânicas de tensão de primeira fissura dos compósitos e reduz entre 8% a 12% a densidade. Os compósitos laminados com adição de fibra de curauá apresentaram propriedades físico-mecânicas compatíveis às de compósitos sem reforço, sendo a fibra de curauá relevante como material de reforço em compósitos de alta resistência.

Palavras-chave: Compósitos. Fibra de curauá. Cimento Portland. Metacaulim.

ABSTRACT

WEBER, A. M. **Technical viability of the use of curauá fiber (*Ananas erectifolius*) as reinforcement in laminated cementitious composites**. 2018. 115 p. Dissertation (Graduate Program in Civil Engineering) - Federal Technology University - Parana. Curitiba, 2018.

The aim of this search was to evaluate the technical viability of the use of curauá fiber (*Ananas erectifolius*) as reinforcement in laminated cementitious composites and to analyze the partial replacement of the cement with metakaolin. These composites constituted a cement matrix composed of CP V-ARI cement, sand, water and superplasticizer. The metakaolin was used to partially replace the cement in 50% aiming the consumption of the calcium hydroxide generated during the cement hydration. Previously the production of the composites was carried out analyzes of the properties of the curauá fiber and matrix dosage study. To evaluate the compatibility of the fiber with the matrix, tests were carried out to verify the inhibition index, evaluating whether the immersion in hot water of the fibers and the addition of the calcium chloride based additive influence the mixture. For the production of the laminated composites, the influence of the volumetric fraction of fibers in the composite (0%, 5%, 10%, 15% and 20%) and the replacement of the cement by metakaolin was investigated. The composite was produced with five layers, intercalating three layers of cementitious matrix and two layers of curauá fiber reinforcement. The tests aimed to evaluate the physical and mechanical behavior of the composites in different days of age (7, 28 and 90 days). The results indicate that the immersion of the fiber in hot water and addition of calcium chloride showed to be efficient to classify the vegetal fiber as of low inhibition with the matrix. For laminated composites, its production was considered technically feasible for additions in volume of curauá fiber up to 15%, because above this value the homogenization of the composite is impaired by the volume of fiber. In the long term, the addition of metakaolin as a substitute for cement increased by an average of 120% the mechanical properties of first crack stress of the composites and reduces the density between 8% and 12%. The composites laminated with addition of curauá fiber presented physical-mechanical properties compatible with those of composites without reinforcement, being the curauá fiber as a reinforcement material in high-strength composites.

Keywords: Composites. Curauá fiber. Portland cement. Metakaolin.

LISTA DE FIGURAS E QUADROS

Figura 1 – Distribuição das camadas no compósito laminado: (a) camadas de fibras unidirecional; (b) camadas de fibras bidirecional.....	26
Figura 2 – Aplicação de compósitos cimentícios laminados em piso elevado	27
Figura 3 – Classificação das fibras.....	29
Figura 4 – Representação esquemática de uma célula vegetal.....	31
Figura 5 – Descrição esquemática da degradação da fibra de sisal no compósito cimentício	34
Figura 6 – Plantação de curauá em Botucatu-SP	35
Figura 7 – Processo de extração da fibra de curauá.....	35
Figura 8 – Peças automobilísticas produzidas com reforço de fibra de curauá.....	36
Figura 9 – Curva de hidratação do cimento comparado ao cimento-madeira	40
Figura 10 – Fluxograma com o procedimento experimental adotado.....	42
Figura 11 – Processo de beneficiamento da fibra de curauá: (a) fibras como foram recebidas; (b) fibras em imersão em água quente; (c) fibras após processo de preparação; (d) fibras cortadas e penteadas para o uso como reforço	45
Figura 12 – Curva granulométrica da areia	46
Figura 13 – Processo de extração em bancada.....	50
Figura 14 – Fibra em solução com ácido sulfúrico	51
Figura 15 – Cinzas obtidas da fibra de curauá após processo de incineração.....	54
Figura 16 – Esquema de suporte para fibra	56
Figura 17 – Ensaio de resistência à tração da fibra de curauá.....	57
Figura 18 – Ensaio de mini abatimento: (a) Mesa e cone para ensaio e (b) medida de espalhamento.....	59
Figura 19 – Ensaio de compressão: (a) Corpos de prova em cura úmida e (b) ensaio de compressão.....	60
Figura 20 – Desenho esquemático de forma utilizada	63
Figura 21 – Produção dos compósitos laminados: (a) primeira camada da matriz; (b) primeira camada de fibra de curauá sobre a matriz; (c) homogeneização da segunda camada da matriz com ajuda de um rolo; (d) moldagem finalizada pronta para vibração.....	64
Figura 22 – Esquema de corte para os corpos de prova.....	65
Figura 23 – Ensaio de flexão em 4 pontos	67
Figura 24 – Difratoograma de raios x para a fibra de curauá <i>in natura</i>	72
Figura 25 – Imagem microscópica do diâmetro da fibra de curauá.....	73
Figura 26 – Análise da influência do teor de superplastificante e cloreto de cálcio no espalhamento.....	75
Figura 27 – Análise da influência do teor de superplastificante e cloreto de cálcio na resistência à compressão.....	76
Figura 28 – Curva de hidratação para pasta referência e fibras com diferentes tratamentos	78

Figura 29 – Compósito laminado com reforço de volume de 10% de fibra de curauá	79
Figura 30 – Análise de tensão de primeira fissura para os painéis laminados	88
Figura 31 – Análise da tensão última para os painéis laminados.....	88
Figura 32 – Influência do volume de fibras no comportamento tensão x deformação nos compósitos sob flexão	89
Figura 33 – Amostras de compósitos laminados após ensaio de flexão direta em 4 pontos	90
Figura 34 – Modo de fratura dos compósitos laminados sem metacaulim com 90 dias de idade, sendo: (a) P5; (b) P10; (c) P15; e (d) P20	91
Figura 35 – Modo de fratura dos compósitos laminados com metacaulim com 90 dias de idade, sendo: (a) P5M; (b) P10M; (c) P15M; e (d) P20M	91
Figura 36 – Análise de comportamento para tensão x volume de fibras de compósitos laminados	92
 Quadro 1 – Ensaio para caracterização química da fibra de curauá	 48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades das fibras.....	28
Tabela 2 – Características físicas e mecânicas do cimento Portland CP V-ARI	43
Tabela 3 – Composição química do cimento Portland CP V-ARI.....	43
Tabela 4 – Composição química do Metacaulim HP ULTRA	44
Tabela 5 – Dados técnicos do superplastificante MC-Powerflow 3100	47
Tabela 6 – Dados técnicos do cloreto de cálcio	47
Tabela 7 – Delineamento experimental.....	58
Tabela 8 – Classificação segundo o índice de inibição	61
Tabela 9 – Delineamento experimental dos compósitos laminados.....	62
Tabela 10 – Caracterização química da fibra de curauá	69
Tabela 11 – Caracterização física da fibra de curauá	71
Tabela 12 – Caracterização mecânica da fibra de curauá	72
Tabela 13 – Valores médios de espalhamento	74
Tabela 14 – Valores médios de resistência à compressão	76
Tabela 15 – Valores médios de temperatura máxima e índice de inibição para pasta com matriz cimentícia e fibra de curauá.....	77
Tabela 16 – Valores médios de densidade dos compósitos laminados com 7, 28 e 90 dias de idade.....	80
Tabela 17 – Valores médios de absorção de água dos compósitos laminados com 7, 28 e 90 dias de idade	81
Tabela 18 – Valores médios de porosidade aparente dos compósitos laminados com 7, 28 e 90 dias de idade	83
Tabela 18 – Valores médios de porosidade aparente dos compósitos laminados com 7, 28 e 90 dias de idade	84
Tabela 19 – Valores médios das propriedades mecânicas obtidas dos compósitos laminados com 7, 28 e 90 dias de idade	85

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

CaCl ₂	Cloreto de cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
CH	Hidróxido de cálcio
CO ₂	Dióxido de carbono
CSH	Silicato de cálcio hidratado
GPa	Gigapascal
h	Hora
mc	Matriz cimentícia
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
µm	Micrometro

CP V-ARI	Cimento de alta resistência inicial
EN	European Standard
I	Índice de inibição
I _c	Grau de cristalinidade
MOR	Módulo de ruptura
PCE	Polímero policarboxilato
pH	Potencial Hidrogeniônico

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BISFA	Bureau International pour la Standardisation des Fibres Artificielles
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux systèmes de construction et ouvrages
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVO GERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.3 JUSTIFICATIVAS	17
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 COMPÓSITOS.....	19
2.1.1 Matrizes Cimentícias.....	20
2.1.1.1 Cimento Portland	20
2.1.1.2 Materiais cimentícios suplementares	21
2.1.2 Aditivos	23
2.1.2.1 Acelerador de pega.....	23
2.1.2.2 Superplastificante.....	24
2.1.3 Tipos de Reforço com Fibras	25
2.1.4 Compósitos Laminados Cimentícios Reforçados com Fibras Vegetais	26
2.2 FIBRAS	28
2.2.1 Fibras Artificiais	29
2.2.2 Fibras Naturais.....	30
2.2.2.1 Componentes da fibra vegetal	31
2.2.2.2 Uso da fibra natural em compósitos.....	33
2.2.2.3 Fibra de curauá	34
2.3 INCOMPATIBILIDADE DO CIMENTO E FIBRA VEGETAL.....	37
2.3.1 Tratamentos	38
2.3.2 Cristalinidade.....	39
2.3.3 Calor de hidratação	40
2.4 DURABILIDADE DOS COMPÓSITOS LAMINADOS CIMENTÍCIOS	41
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	42
3.1 MATERIAIS.....	43
3.1.1 Cimento Portland	43
3.1.2 Metacaulim	44
3.1.3 Fibra de curauá	44
3.1.4 Areia.....	46
3.1.5 Superplastificante.....	46
3.1.6 Cloreto de Cálcio.....	47
3.1.7 Água.....	47
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE CURAUÁ	48
3.2.1 Caracterização química	48
3.2.1.1 Determinação da umidade	49

3.2.1.2 Determinação dos extrativos totais	49
3.2.1.3 Determinação do teor de lignina	51
3.2.1.4 Determinação da solubilidade em água quente e em água fria	52
3.2.1.5 Determinação da solubilidade em hidróxido de sódio	53
3.2.1.6 Determinação do teor de cinzas.....	53
3.2.1.7 pH	54
3.2.2 Caracterização física.....	55
3.2.3 Índice de Cristalinidade	55
3.2.4 Caracterização Mecânica.....	56
3.3 DOSAGEM DA MATRIZ	58
3.3.1 Propriedade Reológica da Mistura Fresca	59
3.3.2 Ensaio de Resistência à Compressão	59
3.3.3 Ensaio de Inibição.....	60
3.4 PRODUÇÃO DO COMPÓSITO LAMINADO	62
3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS PAINÉIS	64
3.5.1 Caracterização Física do Compósito	65
3.5.2 Caracterização Mecânica do Compósito.....	66
3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	67
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE CURAUÁ	69
4.1.1 Caracterização Química.....	69
4.1.2 Caracterização Física	71
4.1.3 Índice de Cristalinidade.....	71
4.1.4 Caracterização Mecânica.....	72
4.2 DOSAGEM DA MATRIZ	73
4.2.1 Propriedade Reológica da Mistura Fresca	73
4.2.2 Ensaio de Compressão.....	75
4.2.3 Ensaio de Inibição.....	77
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO.....	79
4.3.1 Caracterização Física do Compósito	79
4.3.2 Caracterização Mecânica do Compósito.....	85
5 CONCLUSÕES	93
REFERÊNCIAS.....	95
APÊNDICE A - ANOVA.....	111

1 INTRODUÇÃO

A apreensão atual com as adversidades ambientais desencadeou diversas pesquisas e, por conseguinte, o surgimento de novos materiais pensando na racionalização das matérias-primas. No setor da construção civil, as pesquisas abrangem a utilização de diversos tipos de resíduos, de materiais suplementares, com objetivos de maximizar as propriedades do produto, promover sustentabilidade e também reduzir custos.

De acordo com Karbhari e Seible (2000) e Lima (2004) os materiais convencionais como madeira, cimento, cerâmica e aço possuem limitações a seu uso, sendo que em alguns casos não permitem a manutenção ou reabilitação de estruturas, sendo necessária a demolição e reconstrução. Dessa forma, os materiais compósitos no setor da construção civil representam produtos otimizados, onde se podem combinar propriedades oriundas de diversos materiais em um produto.

Os compósitos são compostos por pelo menos dois materiais possuindo uma matriz definida, podendo ser essa polimérica, cerâmica, cimentícia, entre outros materiais. Com o desenvolvimento de novos compósitos cimentícios reforçados, o produto final pode ser utilizado como placas planas ou corrugadas para cobertura, divisórias internas, revestimentos externos, entre outros, desde que atinjam as especificações das normas. Como reforço do compósito pode-se usar fibras ou partículas dos mais diversos materiais, sendo mais comumente utilizado na construção civil o aço, a fibra de carbono, fibra de vidro, entre outros.

A utilização de materiais naturais, como as fibras vegetais, por serem renováveis são atrativas visto que atualmente a preocupação com a degradação ambiental oriunda de processos industriais é crescente. É notável que a adição de fibras vegetais como reforço pode colaborar com aspectos mecânicos do compósito, como a rigidez e resistências, sendo interessante o estudo destes materiais (NETO; PARDINI, 2006). De acordo com Tomczak, Satyanarayana e Sydenstricker (2007) o Brasil apresenta grande produção de fibras naturais e gera um grande número de fibras lignocelulósicas de diversas espécies.

Devido ao baixo custo conforme Zah *et al.* (2007) as fibras vegetais como curauá, sisal, juta e coco são muito interessantes economicamente. Se comparadas com fibras de vidro, por exemplo, por possuírem baixo peso específico essas fibras podem apresentar características mecânicas comparáveis com a fibra de vidro.

Quando trata-se de fibras vegetais, deve-se considerar a vida útil do compósito. A durabilidade pode ser prejudicada devido o consumo de álcalis provenientes da matriz cimentícia pela fibra, que por consequência enfraquece sua estrutura (RODRIGUES, 2015). Para a redução da alcalinidade da matriz cimentícia, estudos como Lima (2004), Melo Filho (2012), Rodrigues (2015), Marques (2015) sugerem a substituição parcial do cimento Portland por materiais cimentícios suplementares.

Os materiais cimentícios suplementares podem ser industrializados como, por exemplo, a escória de alto-forno, sílica ativa e cinzas volantes, e podem ser naturais como argilas vermelhas (CHENG *et al.*, 2017).

Segundo Czarnecki e Day (2010) os materiais cimentícios suplementares maximizam as propriedades da matriz, como redução da temperatura máxima durante a hidratação do cimento, reduz a permeabilidade à água e a penetração de íons químicos, melhorando o acabamento.

Neste contexto o propósito desta pesquisa é o desenvolvimento de compósitos com utilização de reforço de fibra de curauá em matrizes cimentícias e avaliar a substituição parcial de cimento Portland por metacaulim.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica da utilização da fibra vegetal de curauá (*Ananas erectifolius*) como reforço em compósitos cimentícios laminados e analisar a substituição parcial do cimento por metacaulim.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a adição de aditivo acelerador de pega no compósito;
- Avaliar os percentuais de adição de fibra de curauá nos compósitos;
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos reforçados com fibra de curauá;

- Analisar a adição de metacaulim no compósito em substituição ao cimento.

1.3 JUSTIFICATIVAS

A demanda de novas tecnologias para suprimir a falta de materiais que possuem propriedades combinadas, por serem esses incompatíveis, faz do mercado de compósitos um setor em ascensão.

Aliado ao fato da necessidade do setor da construção civil, a substituição dos materiais convencionais considerados não sustentáveis também se tornam objetos de pesquisa, propondo a substituição por materiais que minimizem o custo, sejam biodegradáveis, gerem baixa energia em sua produção e possuam propriedades relevantes. A aplicação de uma matriz cimentícia se torna interessante por ser de ampla utilização na construção civil, mas possuem como limite de uso a sua baixa resistência as tensões normais. Dessa forma a aplicação de fibras como reforço em matrizes cimentícias propõe a melhora dessa propriedade (MARQUES, 2015).

A utilização de resíduos agro-industriais e materiais pozolânicos visam a substituição do cimento Portland e conseqüente diminuição da emissão de CO₂ que ocorre em sua produção. Além disso, o uso de pozolanas atenua a degradação das fibras naturais em matrizes cimentícias (SANTOS *et al.*, 2015). Visando desse modo um produto final mais sustentável, a utilização desses materiais em um compósito resultaria no objetivo proposto, reduzindo o uso de cimento Portland e investindo em materiais renováveis.

Diversas fibras naturais já foram estudadas com este propósito, como a fibra de sisal (Melo Filho, 2012; Lima, 2004), fibra de arumã (Marques, 2015), fibra de malva (Rodrigues, 2015; Oliveira, 2013), fibra de juta (Oliveira, 2013), entre outras. A fibra de curauá de acordo com Leão, Rowell e Tavares (1998) é uma fibra de qualidade que pode ser comparada à fibra de vidro, devido sua resistência mecânica elevada e maciez.

O uso de fibras vegetais em compósitos apresentam diversas aplicações, resultando em compósitos com características de baixa massa específica, baixa

condutividade térmica, resistência ao fogo, impermeabilidade e resistência mecânica (PIMENTEL *et al.*, 2006).

Dessa forma, o estudo de reforços com fibra vegetal renovável em materiais compostos por cimento Portland, assim como sua substituição parcial por materiais cimentícios alternativos é significativo para a análise de viabilidade de aplicação no setor da construção civil.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está dividido em seis capítulos, referidos a seguir.

O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho e descreve o objetivo geral e os específicos do estudo, assim como também as justificativas e a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 relata o referencial teórico da pesquisa contendo informações sobre os compósitos, matriz cimentícia, materiais cimentícios suplementares, aditivos, tipos de reforço, sobre as fibras naturais e artificiais, a incompatibilidade da fibra e matriz, e a durabilidade dos compósitos laminados.

O Capítulo 3 descreve o procedimento experimental usado no trabalho, sendo descritos os materiais utilizados e toda a metodologia proposta.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios propostos e a discussão dos mesmos comparados a outras pesquisas.

O Capítulo 5 descreve as conclusões obtidas com a pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será feita uma revisão de literatura dos principais fundamentos para o entendimento da elaboração do estudo.

Iniciando a abordagem sobre os materiais componentes dos compósitos, a matriz cimentícia, materiais cimentícios suplementares, os aditivos e os tipos de reforço com fibras.

Em seguida será explanado sobre as fibras, sua classificação e suas propriedades visando a aplicação como reforço em compósitos. Finalizando com uma revisão sobre a incompatibilidade da matriz com a fibra e a durabilidade dos compósitos laminados cimentícios, atentando-se a preocupação com a utilização de fibras vegetais.

2.1 COMPÓSITOS

Compósito pode ser definido como um material de multicomponentes que compreende domínios de fases diferentes, sendo que essas fases podem ser líquida ou sólida (WORK *et al.*, 2004). Segundo Mallick (1997), um dos constituintes forma uma fase contínua, chamada de matriz e o outro material principal é um reforço, que pode ser composto de fibras ou partículas.

Os compósitos podem ser de matriz polimérica, matriz cerâmica, matriz de metal, ou ainda de matriz cimentícia. O estudo com matrizes cimentícias em compósitos é interessante na construção civil para o desenvolvimento de materiais com resistência à fissuração. De acordo com Matoski (2005) o cimento é o constituinte ligante que protege a fibra natural do meio, as fibras por sua vez aumentam a resistência do meio e baixam o custo.

O mercado dos materiais compósitos é em sua maior parte dominado pelo setor de transportes e logo em seguida aparece a construção civil, sendo um material em expansão (VENTURA, 2009).

Os materiais compósitos apresentam potencial por conseguir resistência elevada e rigidez, mas com o diferencial de menor peso, ao ser feita a comparação com estruturas convencionais (HAMOUDA; SEYAM; PETERS, 2015).

2.1.1 Matrizes Cimentícias

A matriz cimentícia utilizada em compósitos é constituída basicamente de cimento Portland e água podendo conter agregados finos, superplastificantes e aditivos (TIAN *et al.*, 2017). Conforme Bentur e Mindess (2007), a matriz cimentícia pode ser dividida em dois tipos, sendo o primeiro composto por cimento, areia e água (denominado de argamassa) e o segundo acrescentado de agregado graúdo (denominado concreto). Neste trabalho a matriz cimentícia é denominada de argamassa/pasta, por utilizar-se cimento, areia, água e metacaulim em substituição ao cimento.

Compósitos a base de cimento Portland apresentam várias fases que não são distribuídas homoganeamente, apresentando em algumas áreas a massa de pasta mais densa e em outros pontos mais porosa. Observando a nível microscópico, a sua estrutura é composta pela pasta de cimento hidratada, os agregados, vazios e interfaces (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Brescansin (2003) essa variação da distribuição pode resultar em problemas quanto à durabilidade do compósito e a aderência das fibras vegetais ao serem incorporadas nesse tipo de matriz.

2.1.1.1 Cimento Portland

Segundo Rodrigues (2015) as vantagens da utilização do cimento Portland são de que o material representa um baixo custo para a produção, apresenta características como durabilidade e resistência à compressão, além de possuir rigidez condicente às normas vigentes no Brasil, entre outras propriedades.

O cimento Portland é produzido por minerais argilosos e calcários triturados levados ao forno rotativo, processo esse chamado de calcinação. O clínquer originário desse processo é triturado até resultar em um produto muito fino e então é adicionado o gesso para regular o tempo de pega ou endurecimento inicial (CALLISTER JUNIOR, 2007).

A matriz composta por cimento consiste em partículas discretas com diâmetros de 1 a 100 μm em mistura fresca e durante a hidratação reagem formando partículas coloidais de C-S-H (silicato de cálcio) e cristais de CH (hidróxido de

cálcio). Esta natureza da mistura fresca exerce influência sob a zona de transição, por ter como consequência a produção de espaços com água em torno das fibras (BENTUR; MINDESS, 2007).

Durante a hidratação do cimento ocorre a formação de diversos compostos, mais especificamente a reação da alita com a belita produz Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio) e C-S-H (KIHARA; CENTURIONE, 2005). O hidróxido de cálcio representa de 20 à 25% do volume de sólidos na pasta. Esses cristais não contribuem para a resistência da pasta de forma significativa, mas são responsáveis pela alcalinidade da mistura, com pH igual a 12,5 (SENFF; FOLGUERAS; HOTZA, 2005).

Quanto ao tipo de cimento, Simatupang *et al.* (1988) indicam o uso de cimento de alta resistência inicial (CP V-ARI) para melhorar a compatibilidade do cimento com a fibra vegetal, sendo esta uma técnica muito comum. De acordo com Beraldo e Carvalho (2004), em compósitos de cimento com *Eucalyptus grandis*, o cimento CP V-ARI mostrou melhores resultados do que o CP II-E-32.

2.1.1.2 Materiais cimentícios suplementares

Os materiais que contribuem, por ação química ou física, para a resistência do concreto podem ser chamados de materiais cimentícios (NEVILLE, BROOKS, 2013). Os materiais cimentícios suplementares (SCMs) são utilizados de acordo com Antoni *et al.* (2012) para reduzir o fator de clínquer dos cimentos. Além disso, por influenciar positivamente no grau de hidratação do cimento e reduzir o hidróxido de cálcio (WEI; MEYER, 2014).

Dessa forma, a redução do consumo do cimento é considerada uma solução para o desenvolvimento sustentável, além de que o uso de pozolanas naturais ou artificiais eleva a vida útil da matriz cimentícia modificando suas propriedades (NAJIMI *et al.*, 2012). Zampieri (1989) afirma que materiais de origem vulcânica previamente moídos, quando adicionados à cal e a areia resultaram em argamassas de maior resistência.

Segundo Mohr (2005), o uso de pozolanas atrasa ou minimiza a degradação do compósito cimentício com fibras naturais, sendo que isto ocorre devido a diminuição do pH na solução dos poros, remoção do excesso de CH pela formação de C-S-H e pelo refinamento da estrutura dos poros.

As pozolanas são substâncias silicosas e aluminosas, que podem ser classificadas como naturais ou industriais, resultantes do beneficiamento de argilas, cinzas volantes e escórias (BAUER, 1995). De acordo com Wei e Meyer (2014) o metacaulim é um material silico-aluminoso com alta atividade pozolânica.

Conforme estudo de Lima (2004), o teor de 15% para substituição do cimento por metacaulim é insuficiente para o consumo total do hidróxido de cálcio, sendo necessário teores mais altos, como no mínimo 30%.

Melo Filho (2012) em seu estudo conseguiu uma matriz livre de hidróxido de cálcio utilizando 50% de substituição de cimento Portland por metacaulim de mesma especificação que foi utilizado nesta pesquisa.

O metacaulim é originário do processo de desidroxilação do argilomineral caulinita quando esse atinge o pico endotérmico, sendo submetido a temperaturas entre 450 a 600°C (MARQUES, 2015).

As principais reservas minerais de caulim no Brasil somam um total de 7.056 milhões de toneladas, sendo a produção beneficiada do caulim no Brasil em 2014 de 2.055 mil toneladas representando uma porcentagem de 4,5% da produção do mundo em 2014 (DNPM, 2015).

De acordo com a Metacaulim do Brasil (2017) o produto Metacaulim HP ULTRA contribui em até 14 créditos para a certificação LEED de obras sustentáveis quando utilizado. Ao comparar com o cimento Portland, emite até 90% menos de CO₂ em curto prazo e até pode-se considerar também o efeito em longo prazo, pois a utilização do Metacaulim diminui a manutenção e reconstrução. De acordo com Vicentini, Assunção e Akasaki (2016) o metacaulim tem potencial como substituto parcial do cimento Portland, por melhorar as propriedades da pasta e emitir menos CO₂.

A substituição parcial de cimento Portland por metacaulim acarreta em aumento da resistência à compressão, reduz o pH e ainda a permeabilidade de pastas (FRIAS; CABRERA, 2000; WONG; RAZAK, 2005). Lima e Toledo Filho (2008) afirmaram que com a adição de metacaulim a hidratação do cimento Portland resultará na formação de silicatos de cálcio hidratados que colaboram com o aumento da resistência e durabilidade das pastas.

2.1.2 Aditivos

A utilização de aditivos é definida como um material componente da pasta, além da água, agregados, cimento, fibras, adicionado antes ou durante a mistura da pasta/argamassa ou concreto. Utilizado em quantidade não superior a 5% sobre a massa de material cimentício, os aditivos apresentam como finalidade modificar as propriedades no estado fresco ou endurecido da pasta cimentícia (ASTM C 125, 2003; EN 934-1, 2008).

Conforme Cechin (2017), os objetivos dos aditivos variam conforme o tipo de aditivo, podendo aumentar a plasticidade sem aumentar o uso de água, retardar ou acelerar o tempo de pega e ainda reduzir a exsudação ou segregação em uma pasta ou concreto.

De acordo com Sarzalejo *et al.* (2008) os aditivos indicados para o uso em pastas cimentícias reforçadas com fibras são: superplastificantes, aceleradores de pega e protetores de corrosão.

2.1.2.1 Acelerador de pega

Os aditivos aceleradores de pega são compostos orgânicos ou inorgânicos solúveis em água que possuem como objetivo reduzir o tempo de cura e aumentar a resistência inicial da pasta (ISAIA, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Dos acelerados de pega, o cloreto de cálcio (CaCl_2) é o aditivo mais conhecido e utilizado (MEHTA; MONTEIRO, 2008). O CaCl_2 pode ser adicionado em cimentos de alta resistência inicial ou ao cimento Portland comum, este aditivo acelera o desenvolvimento da resistência inicial da pasta e ainda reduz a alcalinidade da solução (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Alguns autores, como Ma *et al.* (2000), avaliaram o uso de cloreto de cálcio em pastas cimentícias com madeiras e verificaram que o aditivo pode reduzir os efeitos de inibição causados pelos extrativos presentes nesse tipo de material (madeira e fibra vegetal) durante o processo de hidratação do cimento Portland.

De acordo com Amiandamhen, Izekor e Balogun (2016), a utilização do tratamento da fibra com água quente mais a utilização de cloreto de cálcio resultou em melhores propriedades físicas e mecânicas de painéis de cimento reforçados

com a fibra Kenaf (fibra natural de origem africana), quando este foi comparado com painéis apenas com o tratamento de água quente ou apenas com o uso de cloreto de cálcio.

Cechin (2017) concluiu que o tratamento mais eficiente para uso de biomassa de bambu e cana-de-açúcar foi a adição de cloreto de cálcio para o aumento da compatibilidade entre o cimento e as biomassas. Além desta, outros autores como: Aamr-Daya *et al.* (2008), Almeida *et al.* (2013), Okino *et al.* (2004) e Torkaman, Ashori e Momtazi (2014), obtiveram melhora nas propriedades mecânicas utilizando cloreto de cálcio.

2.1.2.2 Superplastificante

Segundo a NBR 11768 (ABNT, 2011) o aditivo superplastificante é um produto com o objetivo de aumentar a fluidez e abatimento da pasta sem alterar a quantidade de água de amassamento e sem modificar a consistência da mistura.

Hirschi e Wombacher (2008) concluíram que ao usar um superplastificante com base de polímeros policarboxilatos (PCE) pode-se chegar a uma boa fluidez com fator água/cimento baixo e alcançar elevada resistência. Collepari *et al.* (1999) citam como vantagens o aumento da trabalhabilidade sem alterar a composição da mistura, reduzir o consumo de água e obter maior resistência e durabilidade, além da redução de água e cimento, redução de custo, sujeira, retração e tensão térmica.

A determinação experimental da dosagem de aditivo a ser utilizado, de acordo com Gomes (2002) deve ser realizada através de ensaios em pastas com o objetivo de fluidez máxima da pasta para um determinado fator água/cimento.

De acordo com Neville e Brooks (2013), agregados leves tendem a diminuir a trabalhabilidade da pasta, no caso dessa pesquisa está sendo utilizado o metacaulim que possui baixa massa específica, o que explica o uso de um superplastificante.

Os superplastificantes não afetam de forma significativa a pega da pasta (NEVILLE; BROOKS, 2013). E de acordo com Aïtcin (2000) a dosagem de superplastificante deve estar entre 1% a 4% de solução de aditivo total em relação à massa de cimento.

Lima (2004) ao utilizar 2% de aditivo superplastificante no traço 0,7:0,3:1 (cimento:metacaulim:areia), teve que aumentar o fator água/cimento de 0,4 para 0,475, devido a mistura não possuir trabalhabilidade suficiente.

2.1.3 Tipos de Reforço com Fibras

Segundo Neto e Pardini (2006) os compósitos cimentícios reforçados com fibras podem ser classificados em três divisões, sendo: multiaxial, camada única ou multicamadas. Os compósitos de camada única podem ainda ser divididos em camadas de fibras contínuas ou fibras curtas. E os compósitos de multicamadas podem ser subdivididos em: compósitos laminados no qual um único tipo de fibra é utilizado para reforço, podendo apresentar orientação definida ou distinta nas camadas; e os compósitos híbridos, nos quais dois ou mais tipos de fibras são utilizadas nas camadas do compósito.

De acordo com Izquierdo (2011), características como quantidade, volume relativo, orientação e comprimento das fibras influenciam no desempenho do compósito. O comprimento e a orientação das fibras vegetais influenciam no resultado das propriedades mecânicas do compósito (BERNARDI, 2003). De acordo com Jaballi, Miraoui e Hassis (2016) e Ventura (2009), ao dispor as fibras longas em uma única direção os resultados das características mecânicas são superiores aos compostos com fibras dispostas aleatoriamente.

Bentur e Mindess (2007) apontam duas características que devem ser consideradas em reforços de fibras em matrizes: a forma das fibras individuais e a dispersão das fibras na matriz. As fibras individuais são caracterizadas por monofilamentos (como o aço) ou por um feixe de filamentos de fibra (fibras sintéticas e naturais). A dispersão das fibras podem ser aleatórias ou contínuas no caso de distribuição contínua, segundo os autores, as fibras podem ser orientadas em uma direção ou mais.

2.1.4 Compósitos Laminados Cimentícios Reforçados com Fibras Vegetais

Segundo Lima *et al.* (2007), os compósitos laminares ganharam destaque a partir do século XVIII, quando Ludwing Hatschek produziu na Áustria placas de cimento com fibras de asbesto, tornando o cimento com amianto popular na construção civil até o seu banimento devido a problemas de saúde relacionado às fibras.

Conforme Marques (2015), um compósito laminado (Figura 1) pode ser definido como um produto constituído por pelo menos dois materiais distintos, que são combinados em camadas (ou lâminas) com o objetivo de resultar em um material homogêneo com propriedades superiores aos materiais isolados. Segundo Callister Junior (2007), o compósito laminado é formado por folhas ou painéis bidimensionais que possuem uma direção de alta resistência escolhida.

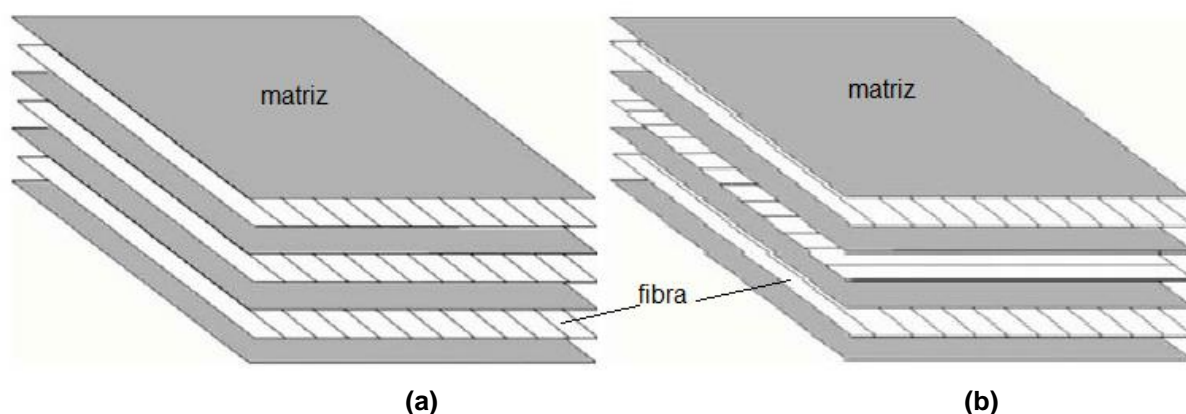


Figura 1 – Distribuição das camadas no compósito laminado: (a) camadas de fibras unidirecional; (b) camadas de fibras bidirecional
Fonte: Adaptado de Lima *et al.* (2007)

A produção desse compósito laminado consiste em moldagem por camadas, sendo lançada a argamassa e então regularizada com rolo, aplicação de fibras em uma direção, adição da próxima camada de argamassa e uniformização com rolo, distribuição de fibras, repetindo até atingir o número de camadas determinada. Para a regularização, pode ocorrer vibração após o lançamento de cada camada, ou no final (LIMA, 2004; MELO FILHO, 2012).

As argamassas de cimento reforçadas com fibras são usualmente aplicadas em chapas finas, com o objetivo de aplicação em revestimento. Para essa aplicação

as fibras são consideradas como reforço secundário, variando em teores de volume de 5 à 15%. Aditivos podem ser adicionados a mistura com o objetivo de melhorar a reologia da pasta (BENTUR; MINDESS, 2007).

Segundo Oliveira (2013), as aplicações para esse produto são diversas, como por exemplo: reforços estruturais, divisórias de ambientes, pisos elevados (Figura 2), elementos de cobertura e pavimentos diversos. Polari Filho, Melo e Barbosa (2003) indicam que os compósitos leves na construção civil podem ser utilizados para enchimento de lajes rebaixadas, isolamento acústico, isolamento térmico em lajes de forro e blocos ou painéis para vedação com redução de carga estrutural.



Figura 2 – Aplicação de compósitos cimentícios laminados em piso elevado
Fonte: Bernardes (2009)

Os compósitos laminados ganham espaço no mercado devido às vantagens de apresentar baixa densidade e alta resistência (ALMEIDA, 2006). A dificuldade em aceitação de novos materiais como os compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais vem do uso do concreto convencional ser de fácil manuseio e produção, assim como baixo custo, garantindo a resistência e durabilidade necessária (AZIZ; PARAMASIVAM; LEE, 1981).

De acordo com Jo, Chakraborty e Yoon (2014), os compósitos cimentícios não respondem bem a esforços, sendo que desde os tempos antigos o conceito de reforço com fibras neste tipo de compósito foi criado para melhorar o desempenho do material.

Segundo Almeida (2006) são diversas as variáveis de projeto desse tipo de compósito, sendo algumas: número de camadas, orientação das fibras e espessura das lâminas, buscando através de análises o melhor desempenho possível.

2.2 FIBRAS

As fibras contribuem para o desenvolvimento de materiais sob medida, mas algumas características influenciam no resultado final do compósito, como: a geometria das fibras, a fração volumétrica e distribuição espacial do arranjo, sendo a principal contribuição do reforço aumentar a rigidez e a resistência do compósito (GANGULY; POOLE, 2004). Segundo Marques (2015) devido ao alto módulo de elasticidade das fibras, seu uso em compósitos é favorável, pois apresenta bom desempenho mecânico. Na Tabela 1 são apresentadas diversas fibras e suas propriedades.

Tabela 1 – Propriedades das fibras

Fibra	Diâmetro (µm)	Densidade (10³ kg/m³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento na ruptura (%)
Aço	5 - 500	7,84	200	500 - 2000	0,5 - 3,5
Algodão	16 - 21	1,5 - 1,6	5,5 - 12,6	287 - 597	7 - 8
Amianto	0,02 - 0,04	3,00	180	3300	2 - 3
Carbono	9	1,90	230	2600	1
Coco	100 - 450	1,15 - 1,45	4 - 13	175	15 - 40
Curauá	60 - 100	1,2	20 - 36	859 - 1404	-
Linho	-	1,5	27,6	345 - 1035	2,7 - 3,2
Juta	200	1,3	26,5	393 - 773	1,5 - 1,8
Nylon	-	1,10	4	900	13 - 15
Sisal	-	1,5	9,4 - 22	511 - 635	2 - 2,5
Vidro	9 - 15	2,60	70 - 80	2000 - 4000	2 - 3,5

Fonte: BLEDZKI; GASSAN (1999); SARZALEJO *et al.* (2008)

Segundo Bledzki e Gassan (1999) as propriedades de fibras naturais podem ser variáveis para um mesmo tipo de fibra, dependendo de fatores climáticos, da idade de colheita e da sua origem por exemplo.

De acordo com BISFA – *The International Bureau for Standardisation of Man-Made Fibres* (2017) as fibras podem ser classificadas em naturais ou artificiais, sendo as artificiais subdivididas em orgânicas ou inorgânicas, conforme Figura 3.

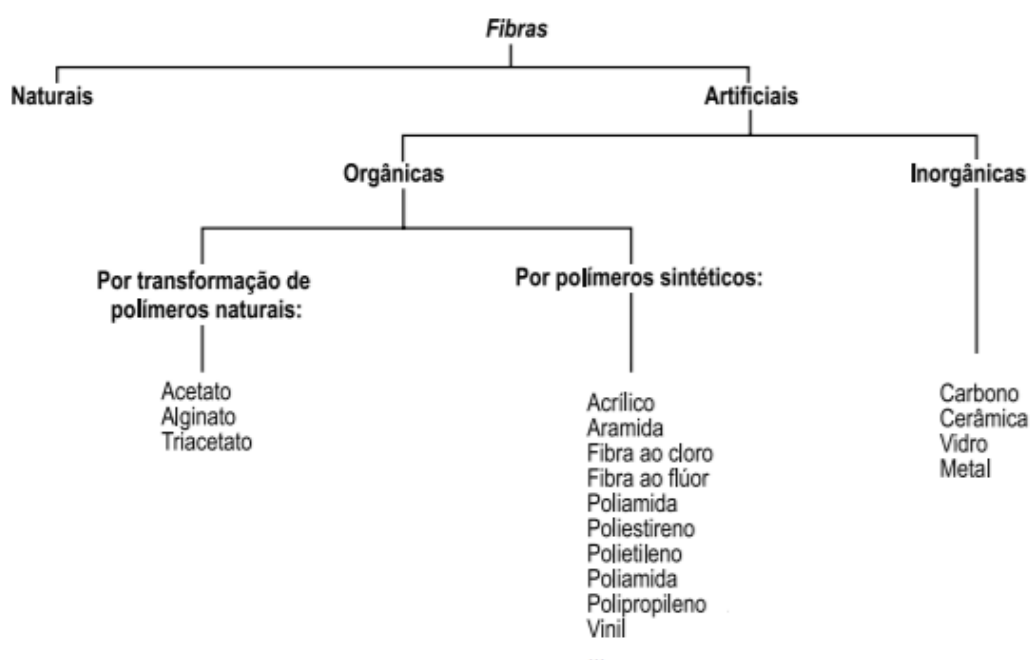


Figura 3 – Classificação das fibras
 Fonte: Adaptado de BISFA (2017)

A seguir será discutido sobre as fibras mais utilizadas como reforço em matrizes cimentícias. Discorrendo sobre as fibras artificiais brevemente e sobre as fibras naturais (que agrupam a fibra de curauá).

2.2.1 Fibras Artificiais

Segundo Marques (2015) fibras inorgânicas são procedentes de processos com alta temperatura ocasionando alterações químicas e físicas em materiais como boro, silício e carbono, resultando em fibras com propriedades mecânicas elevadas.

As fibras artificiais podem ser sintéticas, derivadas de polímeros orgânicos: como celulose, resinas de petróleo, entre outros. Exemplos de fibra sintética são a aramida e o nylon. E as fibras metálicas são derivadas de aços carbonos, suas ligas e alumínio (QUININO, 2015).

As fibras inorgânicas são consideradas fibras de alto desempenho, apresentando elevada resistência térmica e mecânica, sendo usualmente aplicadas em conjunto com outros materiais, como compósitos. Essas aplicações concorrem com os materiais convencionais e apresentam inúmeras vantagens como as propriedades mecânicas elevadas e resistência à agentes químicos (FIBRENAMICS, 2017).

2.2.2 Fibras Naturais

Segundo Essabir *et al.* (2013), as empresas estão cada vez mais voltadas para o cuidado com o meio ambiente e o desenvolvimento de produtos sustentáveis. Entre os materiais ecológicos, conforme Achour, Ghomari e Belayachi (2017), atualmente há um destaque para as fibras provenientes do setor florestal ou agrícola, para a substituição pelas fibras industriais (carbono, vidro e aramida).

Conforme Staiger e Tucker (2008), existem seis categorias de fibras vegetais: fibras provenientes de folhas (sisal e curauá), liberianas (malva, juta, linho e kenaf), fibras de núcleo (cânhamo), fibras de casca (trigo e arroz), fibras provenientes de sementes (coco e algodão) e fibras provenientes de madeira e raízes.

Codispoti *et al.* (2015) descrevem que para o desenvolvimento de novos materiais as fibras vegetais são uma fonte útil, pois apresentam vantagens quando comparadas com as fibras sintéticas. De acordo com Liu *et al.* (2015), as fibras sintéticas utilizadas em compósitos estão perdendo espaço para as fibras naturais devido a escassez da matéria-prima originária do petróleo.

Os materiais celulósicos estão sendo mais procurados para utilização na construção, principalmente como isolante, como por exemplo a palha de arroz e trigo que além de possuírem baixa densidade, ainda possuem boas propriedades de isolamento (WEI *et al.*, 2015).

Segundo Merlini, Soldi e Barra (2011), países tropicais possuem elevada plantação de plantas fibrosas. No Brasil, segundo Marinelli *et al.* (2008), existe um grande número de fibras vegetais de diversas espécies, com diferentes propriedades físicas, mecânicas e químicas.

2.2.2.1 Componentes da fibra vegetal

Para compreender sobre a estrutura das fibras naturais e seus componentes que serão abordados, apresenta-se na Figura 4 uma representação esquemática de célula vegetal. Onde tem-se: LM – lamela média; P – parede primária; S1 – parede secundária externa; S2 – parede secundária média; S3 – parede secundária interna; e L – lúmen (CARVALHO *et al.*, 2009). Incluindo os lúmens, os poros permeáveis são abundantes em fibras vegetais o que acarretam em uma grande absorção de água (SAVASTANO JUNIOR, 2000).

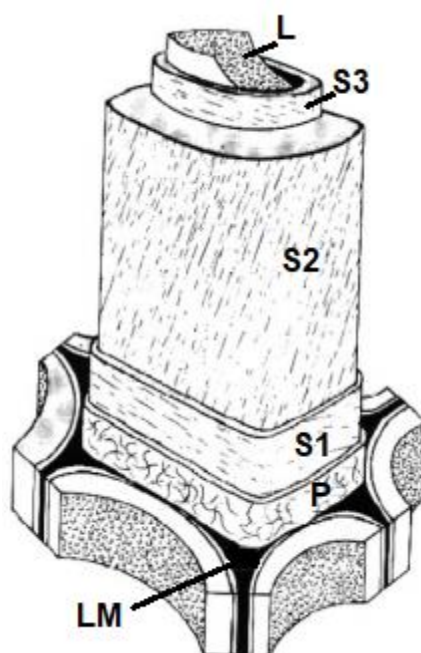


Figura 4 – Representação esquemática de uma célula vegetal
Fonte: Adaptado de Fengel e Weneger (1989) *apud* Carvalho *et al.* (2009)

É a parede celular que confere diversas propriedades e características a fibra, como por exemplo, a resistência mecânica, proteção contra agentes biodegradadores e o controle do nível de umidade (BUCKERIDGE; SANTOS; SOUZA,

2010). De acordo com Rowell (2012), a constituição química da parede celular vegetal é basicamente composta por celulose, hemiceluloses e lignina.

Segundo Smook (1992), a celulose $(C_6H_{10}O_5)_n$ é um polissacarídeo constituído de carbono, oxigênio e hidrogênio. A elevada resistência de materiais celulósicos se deve ao processo de síntese da celulose, no qual as ligações poliméricas formam cadeias longas onde as moléculas permanecem próximas originando ligações químicas secundárias intermoleculares.

Rowell (2012) explica que a celulose é a responsável pela resistência das fibras, conforme seu grau de polimerização. De acordo com Bledzki e Gassan (1999), as propriedades mecânicas dependem do tipo de celulose que a fibra possui, pois cada tipo de celulose apresenta sua própria geometria, variando assim as propriedades mecânicas para cada uma. Fibras com menor grau de polimerização tendem a ser mais solúveis, que neste caso, utilizada como reforço pode perder sua resistência mecânica devido a decomposição (SILVA, 2002).

As hemiceluloses se diferem das celulosas em vários aspectos, não sendo uma forma de celulose. As hemiceluloses apresentam várias unidades de açúcar diferentes, possuem um grau considerável de ramificação corrente e seu grau de polimerização é até dez vezes inferior quando comparado com o da celulose (BLEDZKI; GASSAN, 1999).

A lignina é um polímero que enrijece a parede celular e apresenta características de proteção a ataques microbianos (MOHANTY; MISRA; DRZAL, 2005). Segundo Marques (2015), é a lignina que deixa a parede celular rígida e impermeável. A estrutura da lignina é bem mais complexa do que a da celulose e das hemiceluloses, devido as diversas combinações possíveis entre as diferentes unidades precursoras (MARABEZI, 2009).

Conforme Moraes, Nascimento e Melo (2005), os extrativos são considerados componentes secundários da fibra e podem ser extraídos em soluções orgânicas. Os extrativos totais em altos teores podem ser responsáveis pela incompatibilidade entre a fibra e o cimento Portland, podendo impedir a cura do cimento (BERALDO; SAMPAIO, 2002).

Solubilidade em água fria extrai componentes inorgânicos, taninos, açúcares e gomas (CASTRO, 2015), e a solubilidade em água quente além de extrair os solúveis em água fria remove o amido presente na fibra vegetal (TAPPI, 1999). Hachmi e Moslemi (1989) indicam que se a solubilidade em água quente obtiver

valores superiores a 7% a fibra vegetal pode ser considerada desqualificada para o uso com cimento.

Os componentes inorgânicos encontrados nas cinzas da fibra são cálcio, potássio e magnésio, podendo ainda em algumas espécies ser encontrada sílica (CASTRO, 2015; FENGEL, 1989). Na presença de sílica essa poderia reagir e formar uma quantidade extra de gel C-S-H, responsável pela resistência do cimento (BIRICIK *et al.*, 1999).

2.2.2.2 Uso da fibra natural em compósitos

A utilização de fibras naturais tem como objetivo principal diminuir o custo e reduzir o peso do compósito (NETO; PARDINI, 2006). Salvo algumas exceções, em que a fibra de origem natural terá como função reforçar mecanicamente o compósito, pois quando comparadas com fibras sintéticas suas propriedades mecânicas são geralmente inferiores (MOHANTY; MISRA, DRZAL, 2002).

De acordo com Brandt (2008), as fibras naturais são um recurso renovável e, segundo Rodrigues (2015), podem ser divididas em: minerais, animais e vegetais. Segundo o autor, as fibras minerais são formadas por cadeias cristalinas, como a fibra de asbesto, as fibras de origem animal são oriundas de cadeias proteicas, como a lã e a seda, e por fim as fibras vegetais são de origem celulósica, como a fibra de coco, sisal e curauá.

De acordo com Bledzki e Gassan (1999), as fibras vegetais apresentam como vantagens uma fonte praticamente ilimitada por ser uma matéria-prima renovável e a vantagem de ser um material de natureza menos abrasiva, que fibras de vidro, por exemplo, o que facilita na reciclagem de materiais ou materiais compostos no geral. Agopyan e Savastano Junior (1997) complementam que essas fibras como reforço em matrizes cimentícias apresentam maior resistência ao impacto, possibilidade de trabalho pós-fissuração e favorecimento no isolamento acústico do material.

Gram (1983) em seus estudos com fibra de sisal apontou que com o ataque alcalino, ocorre a dissolução e decomposição das hemiceluloses e da lignina localizadas na lamela média, rompendo assim a ligação e ocorrendo a

transformação para fibras individuais (Figura 5). Este rompimento das células acarreta em perda na eficiência do reforço.

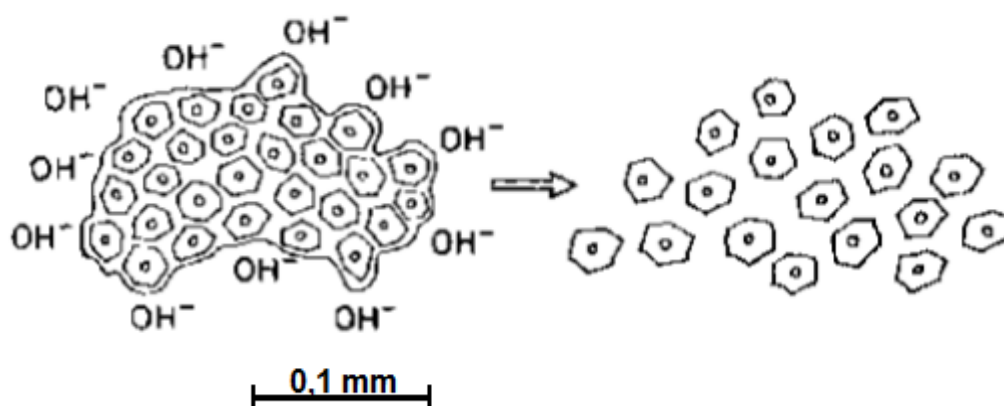


Figura 5 – Descrição esquemática da degradação da fibra de sisal no compósito cimentício
Fonte: Adaptado de Gram (1983)

Algumas vantagens para a utilização das fibras naturais são sua natureza não abrasiva, sua biodegradabilidade, o baixo consumo de energia, o baixo custo e sua baixa densidade (CORRALES *et al.*, 2007).

Segundo Mohr (2005), é difícil falar sobre um teor ótimo de fração volumétrica de fibras, pois são utilizados diferentes tipos de fibras e diversos métodos de produção. De acordo com Izquierdo (2011), quanto maior a quantidade de fibras no compósito, maior será a interceptação de microfissuras resultando em melhoria na tenacidade, resistência e tensão máxima. Por outro lado, com o aumento de fibras no compósito também ocorrerá maior absorção de água e dificuldade de aderência entre a fibra e matriz.

A higroscopia das fibras naturais é uma desvantagem de se utilizar uma fibra de origem natural, pois resultará em uma maior absorção de água do compósito (ALMEIDA, 2012). Com o objetivo de combater as desvantagens do material e de melhorar a interação da fibra com a matriz, são propostos tratamentos para aplicar na fibra.

2.2.2.3 Fibra de curauá

A fibra é proveniente da planta curauá (*Ananas erectifolius*) (Figura 6) da família das bromeliáceas, característica da região Norte e Centro-Oeste do Brasil,

sendo cultivada primeiramente em Santarém no Pará e são consideradas fibras de alta resistência (FERREIRA *et al.*, 2011; MONTEIRO *et al.*, 2006).



Figura 6 – Plantação de curauá em Botucatu-SP
Fonte: Adaptado de Soltan *et al.* (2017)

De acordo com Leão, Sartor e Caraschi (2006) o Brasil produziu 150 toneladas da fibra de curauá no ano de 2003. Na Figura 7 apresenta-se o processo de extração da fibra a partir das folhas da planta.



Figura 7 – Processo de extração da fibra de curauá
Fonte: Bilcati (2015)

Com relação a outras fibras como sisal ou juta, a fibra de curauá ainda é pouco explorada, tanto em suas propriedades como também para a produção de compósitos (SOLTAN *et al.*, 2017). Quando comparada com essas fibras, a fibra de curauá apresenta bons resultados em suas propriedades como alongamento à ruptura, resistência à tração e baixa densidade (ALMEIDA JUNIOR *et al.*, 2013). Segundo Zah *et al.* (2007), a fibra de curauá apresenta o mesmo custo que outras fibras vegetais, mas a sua resistência à tração e à flexão são maiores do que as fibras de coco, juta e sisal. Devido a esses motivos, a fibra de curauá é considerada um material promissor para substituir as fibras sintéticas (CASTRO; RUVOLO-FILHO; FROLLINI, 2012).

Antigamente, as fibras de curauá eram utilizadas para a fabricação de cordas e desde 1993 a fibra de curauá começou a ser utilizada no setor automobilístico brasileiro para a produção de almofadas de assentos e painéis de carros, caminhões e ônibus (Figura 8) (TOMCZAK; SATYANARAYANA; SYDENSTRICKER, 2007; ZAH *et al.*, 2007). De acordo com Zah *et al.* (2007), é pelo interesse da indústria automobilística que a plantação da fibra de curauá aumentou nos últimos anos.



Figura 8 – Peças automobilísticas produzidas com reforço de fibra de curauá
Fonte: Adaptado de Siqueira (2006)

Conforme Caraschi e Leão (2000), a fibra de curauá apresenta grande potencial na indústria, apresentando como composição 73,6% de celulose, 9,9% de hemiceluloses e 7,5% de lignina.

A fibra de curauá na matriz cimentícia, de acordo com Picanço e Ghavami (2008), ocasionou aumento da ductilidade do compósito após a fissuração da matriz, dessa forma o compósito continua a absorver energia.

Soltan *et al.* (2017) ao verificar as propriedades da fibra de curauá, obteve módulo de elasticidade de 40 GPa, sendo favorável para aplicação na engenharia estrutural. Segundo os autores as propriedades físicas, químicas e mecânicas da fibra podem sofrer variâncias significativas devido a sua idade, processo de extração e condições da planta.

2.3 INCOMPATIBILIDADE DO CIMENTO E FIBRA VEGETAL

Em compósitos cimentícios com adição de fibras vegetais, uma das preocupações sobre a durabilidade do material envolve a incompatibilidade que há entre a matriz frágil e a fibra (SAVASTANO JUNIOR, 2000). De acordo com Zucco (1999), a incompatibilidade é derivada da água de amassamento solubilizar açúcares entre outros inibidores presentes na fibra e em contato com o cimento inibir a pega.

Os cristais de hidróxido de cálcio provenientes da hidratação do cimento são os responsáveis pelo ataque alcalino na fibra, pois penetram nas fibras fragilizando-as e provocando perda de aderência com a matriz, o que conseqüentemente acarretará em diminuição da resistência do material. Para evitar ou minimizar o ataque alcalino, pode-se modificar a matriz ou as fibras (SAVASTANO JUNIOR, 2000).

O pH da fibra vegetal pode ser considerado também um fator para causa de inibição durante a cura do cimento. Durante a cura do cimento o pH da solução passa a ser acima de 12 e os extrativos de material vegetal frequentemente possuem pH ácido. Dessa forma, o pH é afetado e pode alterar a estabilidade dos elementos durante a hidratação, resultando em conseqüentemente um efeito negativo na cura, solubilidade e estabilidade dos elementos da hidratação do cimento, tendo um efeito negativo na cura (AGGARWAL; SINGH, 1990).

A formação de grandes cristais de portlandita (Ca(OH)_2) pode acarretar na decomposição das fibras vegetais, o que resultará em perda da capacidade de reforço nas idades mais avançadas (CARASEK, 2007).

2.3.1 Tratamentos

São diversos os tratamentos que podem ser feitos em fibras vegetais objetivando melhorar a compatibilidade com a matriz cimentícia, como por exemplo: imersão em água fria, imersão em água quente, imersão em hidróxido de sódio em diferentes concentrações, mineralização, hornificação, entre outros (CASTRO *et al.*, 2014; FAN *et al.*, 2012; GARCEZ *et al.*, 2016; MARQUES, 2015; MELO FILHO, 2012).

Pode-se considerar a introdução de um material pozolânico na matriz cimentícia como um tratamento para a compatibilidade do cimento e a fibra vegetal. De acordo com Karade (2010), como o material lignocelulósico não apresenta compatibilidade satisfatória com o cimento, uma opção para o aumento dessa compatibilidade é utilizar aceleradores de pega, como cloreto de cálcio, hidróxido de sódio ou carbonato de sódio.

A aderência entre a fibra e a matriz é um fator importante no compósito, sendo este comportamento beneficiado através de tratamentos que removam materiais amorfos na fibra, resultando em uma superfície externa limpa e áspera (ACHOUR; GHOMARI; BELAYACHI, 2017).

Conforme Pongprayoon, Yanumet e Sangthong (2008), para melhorar a aderência da fibra/matriz pode-se: realizar limpeza da superfície das fibras para eliminar gorduras e restos de resinas; proteção das fibras com camadas que auxiliem a redução da absorção de água; e ainda o aumento da rugosidade superficial da fibra.

Bilcati (2015) ao analisar compósitos com fibra de curauá com diferentes tratamentos obteve resultados superiores para os compósitos com fibras tratadas com água fria e água quente quando comparado com tratamento em hidróxido de sódio.

A merceirização (tratamento alcalino) propõe modificações químicas na fibra natural para facilitar sua interação com a matriz do compósito. Apesar de ser um

tratamento considerado barato, deve-se preocupar com as agressões ambientais utilizando estes componentes tóxicos (SANCHEZ *et al.*, 2010).

Quando a hemicelulose é removida a partir de tratamentos alcalinos, as fibrilas obterão a capacidade de se rearranjar ao longo da direção da deformação da tração, resultando em um suporte de cargas de tensão superior nas fibras (GASSAN, 2002).

No entanto, de acordo com Blankenhorn *et al.* (1999) e Coutts e Campbell (1979), os tratamentos com silanos, silicatos de cálcio, emulsões acrílicas, entre outros, ao invés de aumentar a resistência à flexão e a tenacidade (como esperado) quando comparada com fibras *in natura* não apresentaram alterações significativas e algumas vezes até acarretaram em redução das propriedades do compósito.

2.3.2 Cristalinidade

A estrutura das fibras de celulose apresentam fases cristalinas e fases amorfas. Elevadas propriedades de densidade, rigidez e resistência são proporcionais ao grau de cristalinidade da fibra (HU; HSIEH, 2001).

O índice de cristalinidade é relevante ao estudo, pois as características de desempenho da fibra de curauá dependem de sua cristalinidade. Segundo Callister Junior (2002) o grau de cristalinidade pode influenciar as propriedades mecânicas, pois a cristalinidade afeta a extensão de ligações intermoleculares entre os segmentos de cadeias adjacentes.

Existem várias tecnologias para determinação da cristalinidade como por exemplo: difração de raios-x, ressonância magnética, infravermelho e espectroscopia (LENGOWSKI *et al.*, 2013).

O método de obtenção do grau de cristalinidade (IC) proposto por Segal *et al.* (1959) *apud* Achour, Ghomari e Belayachi (2017) apresenta como premissa que há duas fases do material celulósico: cristalino e amorfo. A quantidade de material cristalino é representada pela altura do pico de difração mais elevado e a quantidade de material amorfo é representada pela altura da intensidade mínima entre os picos principais. O IC é simplesmente a diferença entre estas duas intensidades, dividido pela intensidade do pico mais alto.

2.3.3 Calor de hidratação

A reação de hidratação do cimento promove a liberação de calor, dessa forma medindo o total de calor liberado ao longo do tempo pode-se observar o comportamento de hidratação do cimento. Essa é uma forma de avaliar a compatibilidade entre a matriz cimentícia e a fibra vegetal (LIMA, 2009).

De acordo com Cechin (2017), substâncias presentes em materiais lignocelulósicos como as hemiceluloses, amidos, açúcares, fénois e outros extrativos podem inibir a reação de hidratação do cimento.

Karade, Irle e Maher (2006) indicam que além dos extrativos, as cinzas presentes em fibras/madeiras podem influenciar na hidratação do cimento pois apresentam impurezas orgânicas, podendo apresentar elementos como cálcio e potássio que conseguem afetar a hidratação inicial do cimento.

Segundo Hachmi e Campbell (1989), a curva do calor de hidratação formada pelo comportamento de uma mistura composta por cimento, água e madeira e por uma pasta de cimento e água são apresentados na Figura 9.

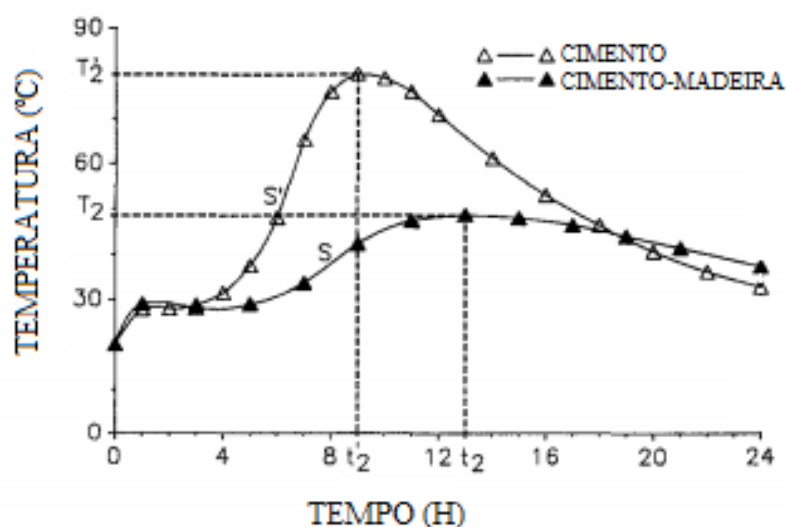


Figura 9 – Curva de hidratação do cimento comparado ao cimento-madeira
Fonte: Adaptado de Hachmi, Moslemi e Campbell (1990)

2.4 DURABILIDADE DOS COMPÓSITOS LAMINADOS CIMENTÍCIOS

A perspectiva de aplicação de compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras naturais é promissora, mas o principal obstáculo para a comercialização deste produto na construção civil é a durabilidade. A capacidade deste produto ser considerado durável será sobre como este resistirá a temperatura, variações de umidade, ataque de sulfato ou cloreto, às alterações volumétricas, entre outros (YAN; CHOUW, 2014).

Devido as reações químicas que ocorrem na matriz cimentícia, pode ocorrer perda de resistência mecânica no compósito. Além da porosidade da matriz que pode afetar a fibra por consequência das variações de umidade, resultando em perda de aderência entre a fibra e matriz (ARDANUY *et al.*, 2011).

Conforme Agopyan *et al.* (2005) e Gram (1983), as fibras naturais sofrerão degradação em compósitos, pois os álcalis provenientes do cimento Portland dissolverão os componentes da fibra natural, como a lignina e hemiceluloses, enfraquecendo sua estrutura.

De acordo com Anjos, Ghavami e Barbosa (2003), são os cristais de hidróxido de cálcio (oriundo da hidratação do cimento) que penetram nas fibras fragilizando-as, o que além de enfraquecer a estrutura também provoca a perda de aderência da fibra com a matriz. Segundo os autores, materiais pozolânicos podem melhorar as propriedades do compósito em longo prazo, tanto no estado fresco como endurecido, pois esses materiais através de suas reações transformam o hidróxido de cálcio em estruturas cristalinas menores e mais resistentes (silicato de cálcio hidratado).

Para maximizar a durabilidade do compósito cimentício com reforço de fibras naturais é indicado a modificação da matriz, utilizando cimentos menos alcalinos e substituições parciais por pozolanas (AGOPYAN *et al.*, 2005), ou também utilizar de tratamentos nas fibras (TORGAL; JALALI, 2010).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O programa experimental deste estudo primeiramente foi composto da caracterização dos materiais utilizados e então ensaios prévios para a determinação da dosagem a ser utilizada seguindo como base os estudos de Melo Filho (2012). Posterior a esta caracterização e determinação de dosagem foram produzidos os painéis e caracterizados por ensaios em diferentes idades: 7, 28 e 90 dias (Figura 10).

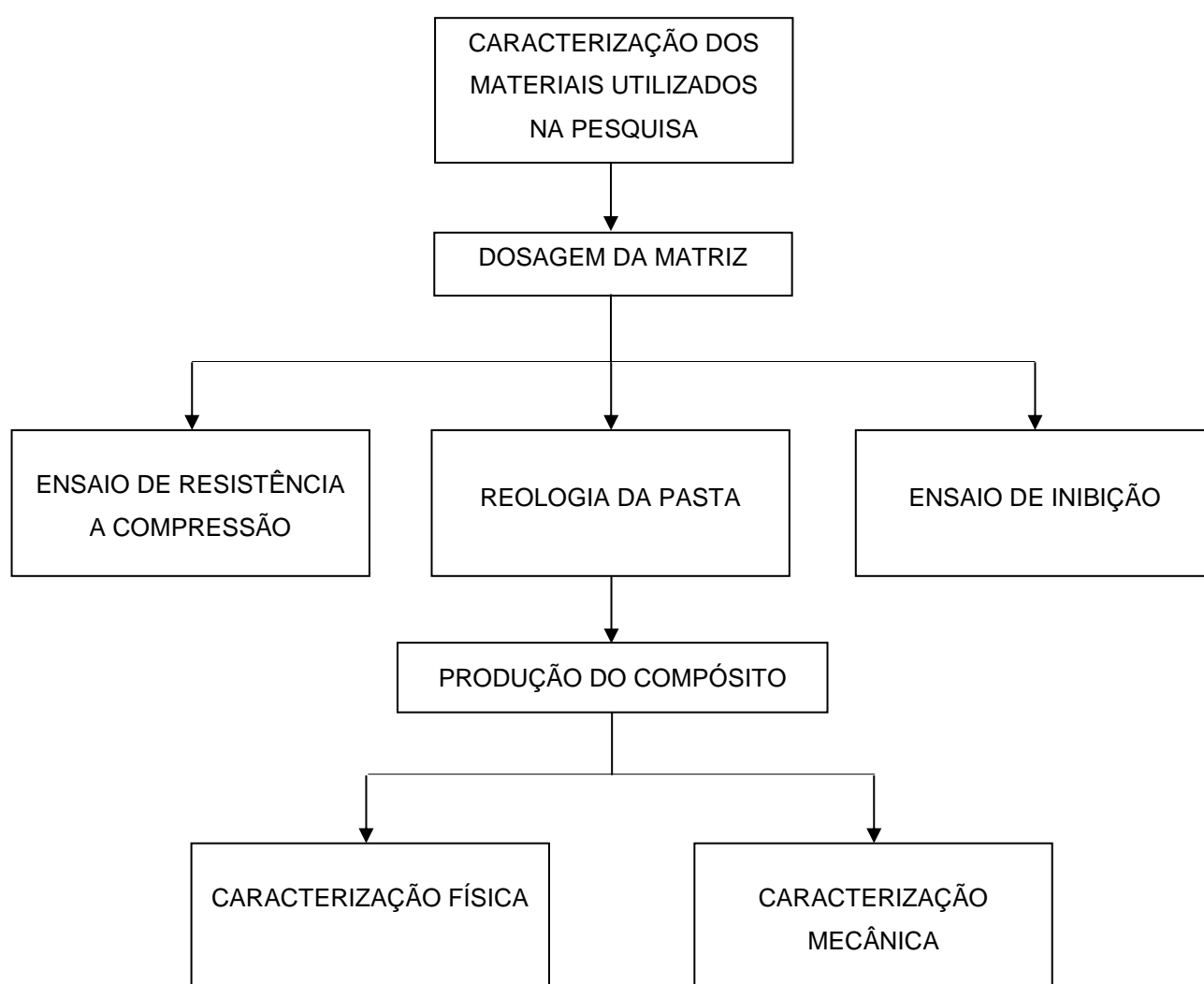


Figura 10 – Fluxograma com o procedimento experimental adotado
Fonte: Autora (2017)

3.1 MATERIAIS

Apresentam-se nessa seção os materiais utilizados na pesquisa, assim como a caracterização destes, indicando dados de fabricantes ou ensaios realizados.

3.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado foi o cimento Portland CP V-ARI (cimento Portland de alta resistência inicial) da marca ITAMBÉ, sendo escolhido por sua cura rápida e tempo de hidratação. O cimento está em conformidade com a norma NBR 5733 (ABNT, 1991). Nas Tabelas 2 e 3 são apresentadas suas características físicas, químicas e mecânicas.

Tabela 2 – Características físicas e mecânicas do cimento Portland CP V-ARI

Expansibilidade à quente (mm)	Tempo de pega (h)		Consistência normal (%)	Blaine (cm ² /g)	Finura (%)		Resistência à compressão (MPa)			
	Início	Fim			#200	#325	1 d	3 d	7 d	28 d
0,00	03:20	04:00	30,3	4630	0,10	0,50	22,1	36,7	42,3	53,6

d: dias

Fonte: ITAMBÉ (2017)

Tabela 3 – Composição química do cimento Portland CP V-ARI

Perda ao fogo (%)	Resíduo Insolúvel (%)	Equivalente Alcalino	Óxido de cálcio livre (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)
3,80	0,79	0,66	1,23	4,07	18,70	2,82	60,3 5	3,66	3,23

Fonte: ITAMBÉ (2017)

3.1.2 Metacaulim

O metacaulim utilizado no trabalho foi o Metacaulim HP ULTRA da empresa Metacaulim do Brasil, com massa específica de 2,55 g/cm³, conforme fabricante. Este material foi doado para a pesquisa e é da mesma fabricante que Melo Filho (2012) utilizou em seu estudo. Este material é considerado uma pozolana de alta eficiência e se enquadra na norma brasileira de materiais pozolânicos NBR 12653 (ABNT, 2014) e na americana ASTM C 618 (ASTM, 2015). Na Tabela 4 é apresentada a composição química do metacaulim especificada pela empresa.

Tabela 4 – Composição química do Metacaulim HP ULTRA

Perda ao fogo (%)	Resíduo #325 (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)
2,7	6,5	59,2	32,8	1,9	1,0	1,4	0,3	0,2	0,2	0,2

Fonte: METACaulim DO BRASIL (2017)

3.1.3 Fibra de curauá

As fibras de curauá (*Ananas erectifolius*) foram doadas pelo Centro de Apoio a Projetos de Ação Comunitária (CEAPAC), localizada na cidade de Santarém no estado do Pará. O material estava disponível em fibras longas (aproximadamente 60 cm) e embaraçadas (Figura 11a), dessa forma, previamente a produção dos laminados, as fibras passaram por processos de beneficiamento em laboratório seguindo a metodologia de Melo Filho (2012), sendo estes: lavagem, secagem, escovação e corte. As fibras passaram por lavagens em água quente à 80 °C (Figura 11b) durante 40 minutos para a eliminação de qualquer tipo de resíduo que possa estar impregnado às fibras, com o objetivo de melhorar a compatibilidade entre a fibra e a matriz cimentícia.

Após a lavagem as fibras foram levadas a secagem natural em temperatura ambiente e posteriormente à estufa à 40°C por 48 horas para redução da umidade

natural que foi absorvida em lavagem (Figura 11c). Em seguida, as fibras passaram por escovação para o desembaraçamento e a separação em fibras individuais, por fim ocorreu o corte dos filamentos no tamanho de 45 cm de comprimento para a utilização nos laminados (Figura 11d).



Figura 11 – Processo de beneficiamento da fibra de curauá: (a) fibras como foram recebidas; (b) fibras em imersão em água quente; (c) fibras após processo de preparação; (d) fibras cortadas e penteadas para o uso como reforço

Fonte: Autora (2017)

A caracterização química, física e mecânica da fibra de curauá é detalhada no item 3.2.

3.1.4 Areia

Foi utilizada areia natural de uma beneficiadora da região de Curitiba, classificada por esta como areia média, sendo escolhida por ser uma areia comercial. O material utilizado foi o que passou na peneira de 1,18 mm, seguindo a metodologia proposta por Melo Filho (2012), devido a granulometria interferir na área de contato entre as partículas, resultando em um compósito mais homogêneo. O material apresentou massa específica de $2,63 \text{ g/cm}^3$ obtida de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2009). Na Figura 12 é apresentado sua curva granulométrica, obtida de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2001), com módulo de finura igual a 2,90.

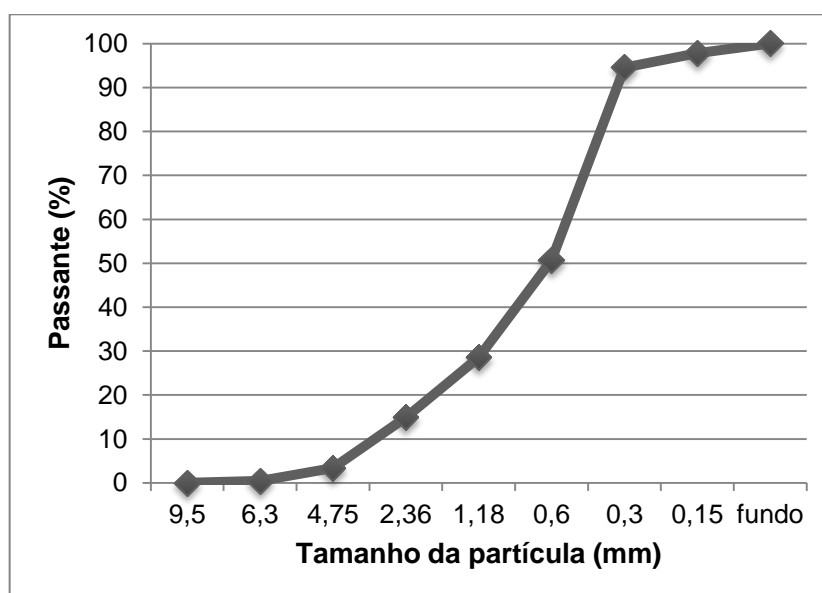


Figura 12 – Curva granulométrica da areia
Fonte: Autora (2017)

3.1.5 Superplastificante

Utilizou-se como aditivo o superplastificante MC-PowerFlow 3100 de alto desempenho, do tipo PCE (polímeros policarboxilatos), por alcançar fluidez superior sem necessitar de aumento do fator água/matriz cimentícia. Sua dosagem foi definida através de ensaios preliminares demonstrados no item 3.3. Os dados

técnicos do superplastificante são apresentados na Tabela 5, conforme ensaios do fabricante.

Tabela 5 – Dados técnicos do superplastificante MC-Powerflow 3100

Característica	Unidade	Valor	Observações
Densidade	g/cm ³	1,07	
Dosagem recomendada	%	0,2 – 5,0	sobre o peso do cimento
pH	%	4,7	

Fonte: MC-Bauchemie Brasil (2017)

3.1.6 Cloreto de Cálcio

O cloreto de cálcio utilizado foi o di-hidratado, produzido pela IPC do Nordeste Ltda em Camaçari, no estado de Bahia. Este aditivo foi escolhido por reduzir o efeito de inibição de fibras vegetais na hidratação do cimento, e a quantidade utilizada foi de 4% em massa em relação à matriz cimentícia (cimento e metacaulim), incorporado na água de amassamento.

Tabela 6 – Dados técnicos do cloreto de cálcio

Característica	Unidade	Valor
Densidade aparente	t/m ³	0,8 à 0,84
pH	%	11,48
Concentração CaCl ₂	%	76,52
Insolúveis em água	%	0,1
Granulometria	mm	< 1,8

Fonte: IPCnor (2017)

3.1.7 Água

A água utilizada na produção da matriz cimentícia é proveniente da rede de abastecimento SANEPAR, de Curitiba, Paraná.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE CURAUÁ

São apresentados neste item os ensaios para a caracterização da fibra de curauá, analisando suas propriedades químicas, físicas e mecânicas.

3.2.1 Caracterização química

A caracterização química da fibra de curauá foi realizada no Laboratório de Polpa e Papel e Química da Madeira do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da Universidade Federal do Paraná. Os ensaios realizados estão demonstrados no Quadro 1.

Ensaio	Norma	Repetições
Umidade	TAPPI T 264 cm-97	2
Extrativos totais	TAPPI T 204 cm-97	2
Lignina	TAPPI T 222 om-06	2
Solubilidade em água quente e água fria	TAPPI T 207 cm-99	2
Solubilidade em hidróxido de sódio	TAPPI T 212 om-02	2
Cinzas	TAPPI T 211 om-02	2
pH	TAPPI T 252 om-12	2

Quadro 1 – Ensaios para caracterização química da fibra de curauá
Fonte: Autora (2017)

A preparação para a realização dos ensaios das amostras seguiu a norma TAPPI T 257 cm – *Sampling and preparing wood for analysis* (2002) no qual o material já moído passou por uma seleção de peneiras.

O material retido na peneira de malha 60 é utilizado para a realização dos demais ensaios.

3.2.1.1 Determinação da umidade

Para a determinação da umidade utilizou-se a norma TAPPI T 264 cm – *Preparation of wood for chemical analysis* (1997). O recipiente utilizado foi retirado da estufa onde foi colocado para secar, então colocado em dessecador para resfriar e então ser pesado. Após isso com a balança analítica tarada colocou-se aproximadamente 2,0000 gramas da amostra de fibra e realizou-se a leitura, sendo esse o peso da amostra úmida (P_u). Para obter-se o peso da amostra seca (P_s) o recipiente foi colocado em estufa a 105°C por pelo menos 48 horas, retirado e posto em dessecador para resfriamento e então pesado, sendo necessário subtrair o peso do recipiente. Para o cálculo do teor de umidade utiliza-se a Equação 1.

$$U = \frac{(P_u - P_s)}{P_u} \times 100 \text{ (\%)} \quad (1)$$

Para obter a porcentagem absolutamente seco (%AS) divide o peso seco pelo peso úmido e multiplica-se por 100.

3.2.1.2 Determinação dos extrativos totais

Para a realização desse ensaio foi seguido a TAPPI T 204 cm – *Solvent extractives of wood and pulp* (1997). Primeiramente pesou-se 2,00 g de material seco e então este valor foi dividido pela porcentagem absolutamente seca (%AS), obtendo assim o peso inicial da amostra úmida (P_{ia}). Para a determinação da massa para o ensaio utiliza-se a Equação 2.

$$P_{as} = P_{ia} \times \left(\frac{\%AS}{100} \right) \quad (2)$$

Para a realização do ensaio transferiu-se esta quantidade de material para um cartucho de extração e então foi feita uma extração de um período de no mínimo 5 horas com solução 1:2 de etanol-tolueno em um balão volumétrico (Figura 13). Depois do cartucho seco o material foi extraído e então transferido para um

Erlenmeyer e adicionou-se, juntamente, 500 ml de água destilada fervendo e este foi colocado no banho-maria por uma hora a 100°C.



Figura 13 – Processo de extração em bancada
Fonte: Autora (2017)

Após isso foi utilizado um cadinho filtrante para a filtragem do material e então este foi seco em estufa por 24 horas. Para o cálculo do teor de extrativos totais utiliza-se a Equação 3.

$$TE_t = \frac{P_{as} - (P_{ac} - P_c)}{P_{as}} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

Em que:

P_{as} : peso da amostra seca;

P_{ac} : peso da amostra seca mais cadinho filtrante;

P_c : peso cadinho filtrante.

3.2.1.3 Determinação do teor de lignina

A determinação do teor de lignina foi determinada de acordo com a norma TAPPI T 222 om – *Acid-insoluble lignin in wood and pulp* (2006). Após determinado o teor de extrativos das amostras, pesou-se 1,00 g seca de cada amostra. A amostra foi colocada em um *Becker* pequeno, no qual foi adicionado 15 ml de ácido sulfúrico 72%, este ficou em contato com a biomassa por 2 horas (Figura 14). Passado esse período, a mistura foi transferida para um *Erlenmeyer* com 560 ml de água destilada, então posto em banho-maria por 4 horas.



Figura 14 – Fibra em solução com ácido sulfúrico
Fonte: Autora (2017)

Então a mistura foi filtrada em um cadinho filtrante, sendo posteriormente secos em estufa por 24 horas e após isso pesado. A lignina insolúvel presente na amostra foi determinada pela Equação 4.

$$T_l = \frac{(P_{ac} - P_c)}{P_{as}} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

Em que:

P_{as} : peso da amostra seca;

P_{ac} : Peso da amostra seca mais cadinho filtrante;

P_c : peso cadinho filtrante.

3.2.1.4 Determinação da solubilidade em água quente e em água fria

A solubilidade em água fria e quente foi obtida conforme TAPPI T 207 cm – *Water solubility of wood and pulp* (1999). Primeiramente com o cálculo da massa da amostra (P_{ia}) transferiu-se o material para um recipiente com 300 mL de água destilada, repousando por 48 horas em temperatura ambiente. Após isso o material foi filtrado com o auxílio da bomba de vácuo e então levado para a estufa por 24 horas. Então obteve-se o peso (P_{ac}) e o teor de extrativos em água fria com a Equação 5.

$$TE_{af} = \frac{P_{as} - (P_{ac} - P_c)}{P_{as}} \times 100 \quad (\%) \quad (5)$$

Em que:

P_{as} : peso da amostra seca;

P_{ac} : peso da amostra seca mais cadinho filtrante;

P_c : peso cadinho filtrante.

Para o teor de extrativos em água quente determinou-se a quantidade de material necessário, conforme anteriormente, para solubilidade em água fria. Este material foi transferido para um *Erlenmeyer* com 100 mL de água destilada e então colocado em banho-maria com a água em ebulição e mantido neste por 3 horas.

Após o tempo, o material foi filtrado seguindo as mesmas instruções anteriores e então levado para secagem em estufa por 24 horas. Por fim, as amostras foram colocadas em dessecador para esfriarem e pesados. O teor de extrativos em água quente foi calculado pela Equação 6.

$$TE_{aq} = \frac{P_{as} - (P_{ac} - P_c)}{P_{as}} \times 100 \quad (\%) \quad (6)$$

Onde:

P_{as} : peso da amostra seca;

P_{ac} : Peso da amostra seca mais cadinho filtrante;

P_c : peso cadinho filtrante.

3.2.1.5 Determinação da solubilidade em hidróxido de sódio

Com a norma TAPPI T 212 om – *One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp* (2002) obteve-se a solubilidade em hidróxido de sódio. Definiu-se a quantidade de amostra conforme citada nos procedimentos anteriores e então a amostra foi transferida para um recipiente com 100 mL de NaOH. O recipiente foi colocado em banho-maria com água em ebulição por 1 hora. Após isso a amostra foi filtrada, desta vez utilizado também 50 mL de ácido acético a 10% para neutralizar e então levadas a estufa para secar por 24 horas e então pesadas. O teor de extrativos em NaOH 1% foi dado pela Equação 7.

$$TE = \frac{P_{as} - (P_{ac} - P_c)}{P_{as}} \times 100 \quad (\%) \quad (7)$$

Onde:

P_{as} : peso da amostra seca;

P_{ac} : Peso da amostra seca mais cadinho filtrante;

P_c : peso cadinho filtrante.

3.2.1.6 Determinação do teor de cinzas

Para o teor de cinzas foi utilizado a TAPPI T 211 om – *Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C* (2002). A massa da amostra foi determinada, conforme os ensaios anteriores, e então transferida para um cadinho de porcelana e este colocado na mufla. O material entrou em combustão e após o fim da chama a mufla foi fechada e aguardou-se 3 horas até a incineração total do material orgânico (Figura 15).



Figura 15 – Cinzas obtidas da fibra de curauá após processo de incineração
Fonte: Autora (2017)

Após pesagem final obteve-se obter o teor de cinzas pela Equação 8.

$$T_c = \frac{(P_{ac} - P_c)}{P_{as}} \times 100 \quad (\%) \quad (8)$$

Em que:

P_{as} : peso da amostra seca;

P_{ac} : Peso da amostra seca mais cadinho;

P_c : peso cadinho de porcelana.

3.2.1.7 pH

Para a determinação do pH da fibra de curauá foram utilizadas as premissas da TAPPI T 252 om – *pH and electrical conductivity of hot water extracts of pulp, paper, and paperboard* (2012), onde foram pesados 2 g de farinha absolutamente seca, as quais foram transferidas para um recipiente sendo posteriormente adicionados 100 mL de água destilada. O material foi conservado sob fervura em banho-maria durante 1 hora e após o resfriamento a temperatura ambiente foram executadas as medições. As leituras foram efetuadas em pHmetro digital após o intervalo de 2 e 24 horas.

3.2.2 Caracterização física

Para a caracterização física da fibra de curauá, foi realizado ensaio para a determinação da densidade básica. Baseando-se na norma TAPPI T 258 om – *Basic density and moisture content of pulpwood* (2002), primeiramente as amostras foram totalmente saturadas para a realização do ensaio e então obtido o volume saturado do material (V_{sat}). Após, as amostras foram levadas a estufa à 100°C por 24 horas, para então pesar a massa seca da amostra (m_s). A densidade básica foi calculada pela Equação 9.

$$\text{Densidade básica} = \frac{m_s}{V_{\text{sat}}} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (9)$$

Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Polpa e Celulose da Universidade Federal do Paraná.

3.2.3 Índice de Cristalinidade

A determinação do índice de cristalinidade da celulose da biomassa vegetal foi realizada no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O equipamento utilizado foi o difratômetro de Raio-x Shimadzu XRD-7000. O índice de cristalinidade foi obtido pelo método de Segal *et al.* (1959) *apud* Achour, Ghomari e Belayachi (2017), este é um processo empírico que usa técnicas de ajuste e transmissão, medindo a intensidade de interferência no plano cristalino 002 e o espalhamento amorfo em 2θ .

O índice de cristalinidade foi calculado utilizando a Equação 10.

$$I_c = \left(\frac{I_{002} - I_{\text{am}}}{I_{002}} \right) \times 100 \text{ (\%)} \quad (10)$$

Onde:

I_c : índice de cristalinidade;

I_{am} : intensidade do mínimo de difração, relacionada à parte amorfa ($2\theta =$ entre 18 a 20°);

I_{002} : intensidade do máximo de difração, relacionada à parte cristalina ($2\theta =$ entre 21 a 23°).

3.2.4 Caracterização Mecânica

Para a caracterização mecânica da fibra de curauá foi realizado ensaio de tração direta, baseado na norma ASTM C 1557 (ASTM, 2003). Para a realização do ensaio foi utilizado um suporte de papel de gramatura 75 g/m², fita de alumínio para a fixação no topo e base e cola de secagem rápida. Foram ensaiadas 6 amostras de fibras de curauá, com comprimento de 70 mm cada, sendo estas engastadas no suporte de papel utilizando cola de secagem rápida e fita adesiva de alumínio em uma faixa de 20 mm superior e inferior ao suporte. O esquema do suporte da fibra para o ensaio é demonstrado na Figura 16.

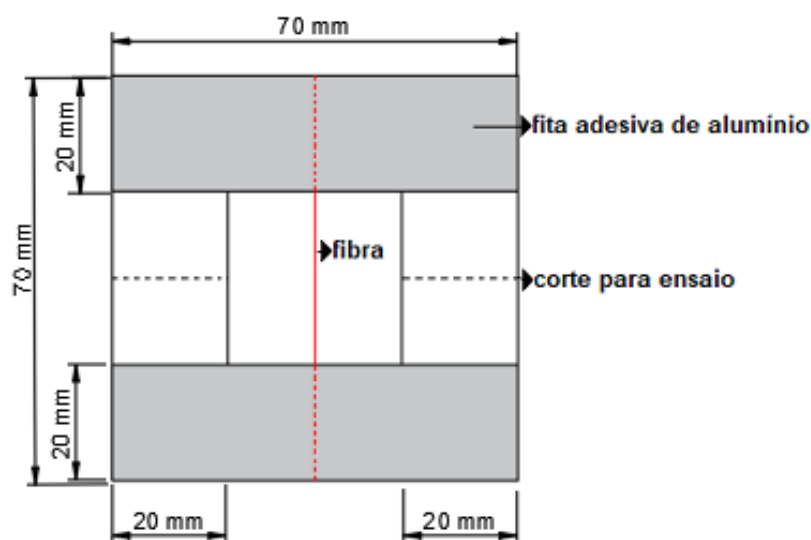


Figura 16 – Esquema de suporte para fibra
Fonte: Baseado em Oliveira (2013)

Utilizou-se a máquina de ensaios EMIC modelo DL 3000 com aquisição de dados por computador (Figura 17).



Figura 17 – Ensaio de resistência à tração da fibra de curauá
Fonte: Autora (2017)

A tensão última de tração foi calculada através da Equação 11. E a área de seção transversal da fibra foi obtida por análises microscópicas, obtidas em microscópio Olympus BX51.

$$\sigma_{\text{tração}} = \frac{P}{A} \text{ (MPa)} \quad (11)$$

Onde:

P: força máxima de tração;

A: área da seção transversal.

3.3 DOSAGEM DA MATRIZ

A matriz foi definida através de análise dos estudos de Melo Filho (2012), sendo definido que a matriz cimentícia em todos os casos corresponde a 50% em massa de cimento Portland CP V-ARI e 50% em massa de metacaulim. O traço foi definido pela relação de matriz cimentícia por areia e foi estabelecido o fator água/matriz cimentícia de 0,40. Análises foram feitas para estabelecer o teor de superplastificante em relação à massa de material cimentante, sendo feitos ensaios de compressão e ensaios de consistência para a definição. O teor de adição de cloreto de cálcio, quando adicionado à mistura foi de 4,0% em relação à massa de material cimentante.

Para a realização dos ensaios a mistura foi preparada em misturador mecânico com a matriz cimentícia, sem a utilização de fibras. Utilizando uma argamassadeira, primeiramente foram misturados os materiais secos (em ordem de colocação: cimento, metacaulim e areia) por 2 minutos até sua homogeneização. O superplastificante e o cloreto de cálcio (quando utilizado), foram diluídos em água e lançado no misturador lentamente, ocorrendo então a mistura dos materiais por 2 minutos, pausando-se o misturador para a retirada de material retido e então liga-se a argamassadeira novamente por 2 minutos.

Conforme Tabela 7 pode-se observar as misturas analisadas para a definição da dosagem final da matriz.

Tabela 7 – Delineamento experimental

Nomenclatura	Traço cimento:metacaulim	Fator a/mc¹	Teor de superplastificante (%)	Teor de cloreto de cálcio (%)
T1C0	1:1	0,40	2,0	0
T1C4	1:1	0,40	2,0	4,0
T2C0	1:1	0,40	2,5	0
T2C4	1:1	0,40	2,5	4,0
T3C0	1:1	0,40	3,0	0
T3C4	1:1	0,40	3,0	4,0

¹ Fator água/matriz cimentícia

Fonte: Autora (2017)

3.3.1 Propriedade Reológica da Mistura Fresca

Para avaliação da reologia da matriz cimentícia foi realizado o ensaio de mini abatimento proposto por Kantro (1980). Este ensaio serve para avaliação da consistência da matriz, pois busca-se uma matriz fluída para a distribuição na forma do painel. Em uma folha de papel milimetrado com uma placa de vidro por cima foi medido o diâmetro de espalhamento. O molde foi preenchido com a matriz e então removido verticalmente, após 1 minuto de espalhamento foram medidos dois diâmetros perpendiculares e o valor médio obtido é o espalhamento da matriz.

Para a realização do ensaio foi utilizado misturas conforme o delineamento exposto na Tabela 7, com duas repetições para cada mistura. Os aparatos de ensaio são apresentados na Figura 18, assim como também uma medida de espalhamento.

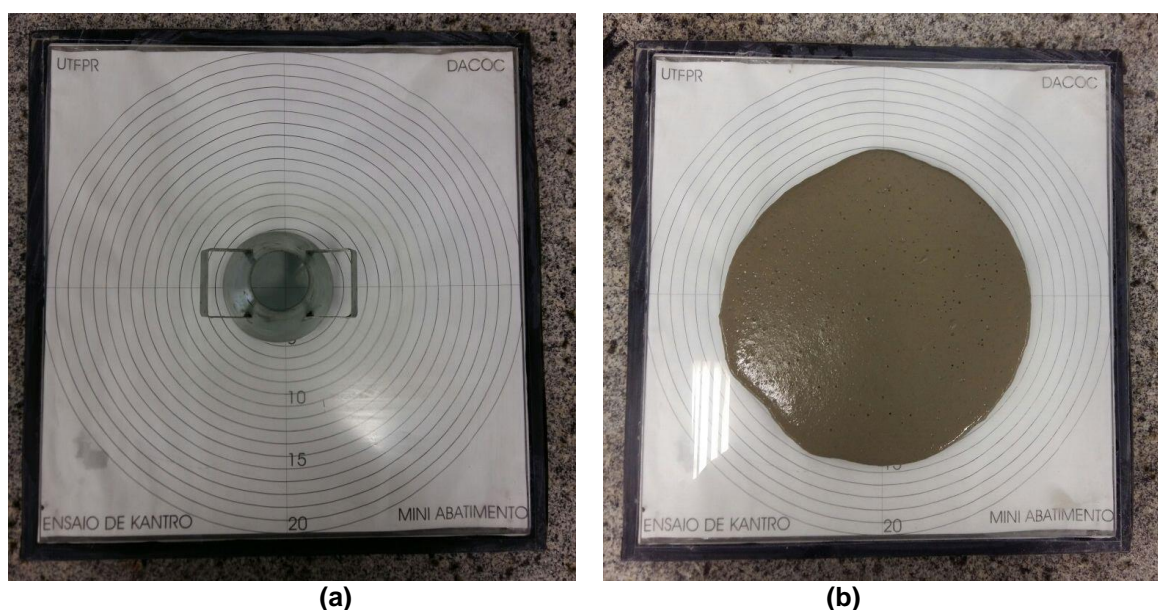


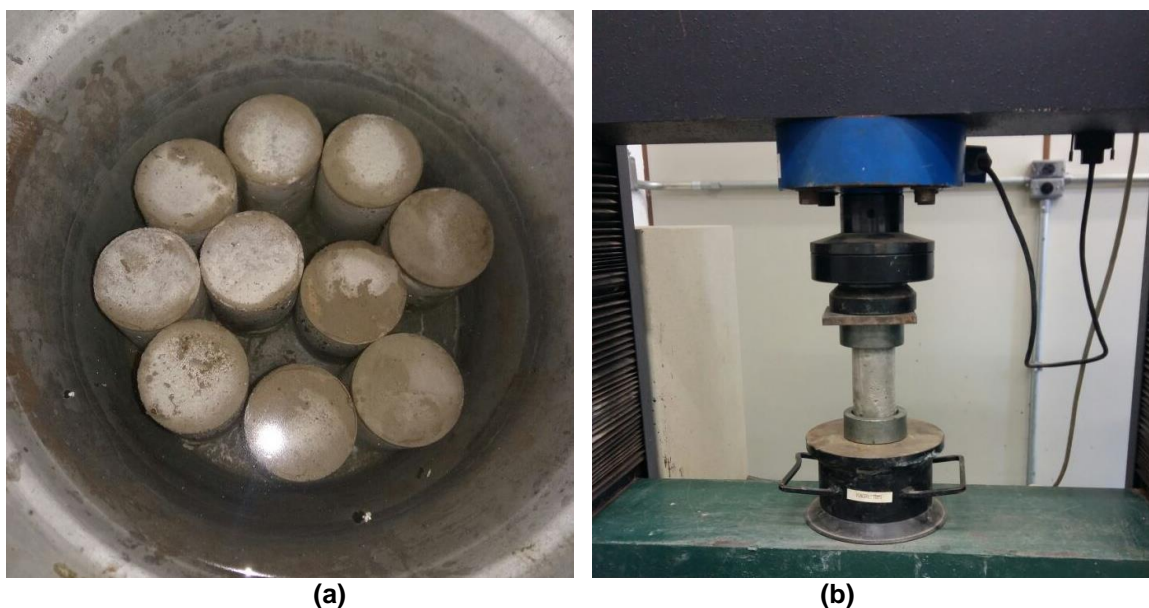
Figura 18 – Ensaio de mini abatimento: (a) Mesa e cone para ensaio e (b) medida de espalhamento

Fonte: Autora (2017)

3.3.2 Ensaio de Resistência à Compressão

Para a manufatura dos corpos de prova foram utilizados moldes cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, sendo moldados cinco corpos de prova por mistura realizada. A confecção dos corpos de prova seguiu a NBR 7215 (ABNT,

1996). Após 28 dias de cura úmida (Figura 19a) os corpos de prova foram ensaiados, seguindo a norma NBR 7215 (ABNT, 1996). O equipamento utilizado foi a máquina universal EMIC, modelo DL 3000 com aquisição de dados por computador. Os corpos de prova foram capeados com peças de neoprene envoltos por formas de aço (em forma de capacete) para que cada corpo de prova fique centrado no eixo do carregamento (Figura 19b).



(a)
(b)
Figura 19 – Ensaio de compressão: (a) Corpos de prova em cura úmida e (b) ensaio de compressão
Fonte: Autora (2017)

3.3.3 Ensaio de Inibição

A realização deste ensaio visa analisar a temperatura de hidratação da matriz cimentícia, verificando se há compatibilidade entre a matriz e a fibra de curauá. As variáveis desse estudo são a presença da fibra de curauá (*in natura* e com o tratamento de imersão em água quente) e o aditivo cloreto de cálcio.

A determinação da compatibilidade é baseada em Hofstrand *et al.* (1984) *apud* Hachmi, Moslemi e Campbell (1990), na qual são utilizadas os valores respectivos de temperatura e tempo de hidratação da pasta padrão (cimento, areia, metacaulim e água) e da pasta com adição da fibra (cimento, areia, metacaulim, água e superplastificante).

O índice de compatibilidade é calculado pela Equação 12.

$$I = \left[\left(\frac{t_2 - t'_2}{t'_2} \right) \times \left(\frac{T'_2 - T_2}{T'_2} \right) \times \left(\frac{S' - S}{S'} \right) \right] \times 100 \quad (12)$$

Em que:

t_2 : tempo para atingir a máxima temperatura (pasta de matriz com fibra);

T_2 : temperatura máxima de hidratação (pasta de matriz com fibra);

S : taxa máxima de variação de temperatura no decorrer do tempo (pasta de matriz com fibra);

t'_2 : tempo para atingir a máxima temperatura (pasta padrão);

T'_2 : temperatura máxima de hidratação (pasta padrão);

S' : taxa máxima de variação de temperatura no decorrer do tempo (pasta padrão).

Baseando-se no resultado obtido pela Equação 12, a interação da fibra com a matriz pode ser classificada em quatro categorias, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Classificação segundo o índice de inibição

Índice de inibição	Classificação
$I < 10$	Baixa inibição
$I = 10$ a 50	Moderada inibição
$I = 50$ a 100	Alta inibição
$I > 100$	Extrema inibição

Fonte: Okino et al. (2005)

O ensaio foi realizado em uma adaptação de calorímetro na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como aparelho aquisitor de dados Master Logger A 202. Os cabos são conectados a um receptor de sinais, no qual os dados são convertidos em valores de temperatura e salvos em computador. As leituras foram realizadas a cada segundo por um período de 24 horas.

Foram realizadas três repetições para cada mistura e após a realização da mistura em argamassadeira, a pasta foi depositada em sacos plásticos e estes

foram colocados em recipiente térmico, onde o cabo de compensação tipo K2x24 foi introduzido na mistura.

3.4 PRODUÇÃO DO COMPÓSITO LAMINADO

Para a produção dos painéis foram analisados os resultados do item 3.3 sobre dosagem da matriz e então definido o teor de superplastificante a ser utilizado para a confecção dos compósitos laminados cimentícios. Para todos compósitos o teor de superplastificante utilizado foi de 3% e teor de cloreto de cálcio igual a 4%. Para analisar o efeito da adição de metacaulim, foram produzidos painéis sem a substituição do cimento por metacaulim. O delineamento experimental dos compósitos está indicado na Tabela 9.

Tabela 9 – Delineamento experimental dos compósitos laminados

Nomenclatura	Traço ¹	Fator a/mc ²	Volume de fibras (%)
P0	1:0:1	0,40	0
P5	1:0:1	0,40	5
P10	1:0:1	0,40	10
P15	1:0:1	0,40	15
P20	1:0:1	0,40	20
P0M	1:1:2	0,40	0
P5M	1:1:2	0,40	5
P10M	1:1:2	0,40	10
P15M	1:1:2	0,40	15
P20M	1:1:2	0,40	20

¹ cimento:metacaulim:areia

² Fator água/matriz cimentícia

Fonte: Autora (2017)

Os compósitos foram moldados com diferentes frações volumétricas de fibras, sendo essas 0, 5, 10, 15 e 20%. A porção de fibras foi distribuída em duas camadas distintas nos compósitos.

As misturas foram produzidas em um misturador mecânico de bancada, primeiramente foram misturados os materiais secos (cimento, metacaulim e areia nesta ordem) por 2 minutos até sua homogeneização. O superplastificante e o cloreto de cálcio foram diluídos em água e lançado no misturador lentamente, ocorrendo então a mistura dos materiais por 2 minutos, retirado o material retido no misturador e misturado novamente por 2 minutos.

Para garantir a espessura determinada, foi realizado o cálculo do peso específico da mistura fresca com a finalidade de calcular a quantidade em gramas de argamassa para cada camada. O laminado foi produzido com cinco camadas intercaladas entre a argamassa e as fibras, sendo as fibras dispostas em um sentido unidirecional.

Para a produção dos compósitos foram fabricadas formas de alumínio no tamanho desejado (450 x 450 mm), com um fechamento que não permitisse a perda do material. Essa forma é apresentada na Figura 20.

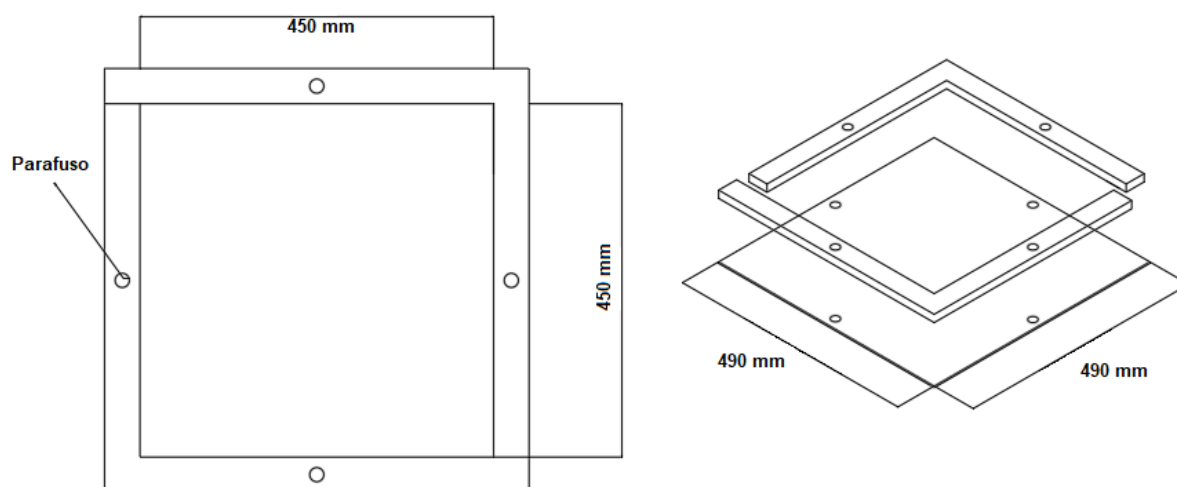


Figura 20 – Desenho esquemático de forma utilizada
Fonte: Autora (2017)

Para a moldagem do laminado foi adicionada a argamassa em massa equivalente a camada e a mesma regularizada com auxílio de espátula e rolo para então adicionar a primeira camada de fibras manualmente. Após as fibras, uma nova camada de argamassa foi adicionada seguindo os mesmos passos até a quinta e última camada. Por fim foi realizada a vibração da forma em uma mesa vibratória pelo período de 1 minuto, conforme método de Melo Filho (2012).



Figura 21 – Produção dos compósitos laminados: (a) primeira camada da matriz; (b) primeira camada de fibra de curauá sobre a matriz; (c) homogeneização da segunda camada da matriz com ajuda de um rolo; (d) moldagem finalizada pronta para vibração
 Fonte: Autora (2017)

3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS PAINÉIS

Foram produzidos painéis de 450 x 450 x 15 mm (largura, comprimento e espessura) e esses foram ensaiados aos 7, 28 e 90 dias de idade com cura em laboratório, sendo caracterizados fisicamente e mecanicamente.

Na Figura 22 é apresentado o esquema de corte dos corpos de provas, sendo identificados pelas siglas: C.M. – para os testes de comportamento mecânico; e C.F. – para os ensaios de comportamento físico.

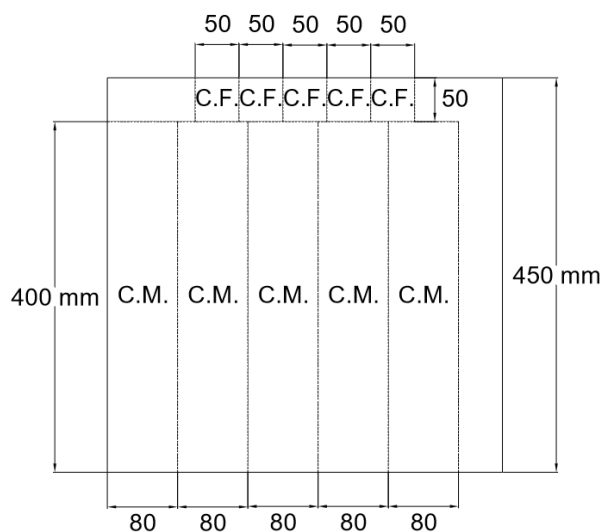


Figura 22 – Esquema de corte para os corpos de prova
Fonte: Autora (2017)

3.5.1 Caracterização Física do Compósito

A caracterização física do compósito foi realizada de acordo com as especificações da ASTM C 948 (ASTM, 2001), sendo feito os ensaios de absorção de água, densidade e porosidade aparente. Conforme determinado anteriormente, o número de repetições para esse ensaio foi de cinco corpos de prova para cada amostra.

Os corpos de prova retirados do laminado com dimensões de 50 x 50 mm foram ensaiados aos 7, 28 e 90 dias de idade, sendo imersos em água a aproximadamente 21°C por 24 horas. Após isso os corpos de prova foram pesados em suspensão em água, calculando assim a massa imersa (A) através de balança hidrostática. Ao retirar da balança hidrostática, os corpos de prova foram secos por uma toalha e pesados novamente, determinando assim a massa da superfície seca saturada (B). Em seguida, os corpos de prova são conduzidos a estufa a 100°C por 48 horas, para no fim ao atingirem a temperatura ambiente determinar a massa seca (C). Com as variáveis obtidas, pode-se determinar as grandezas:

$$\rho_s = \frac{C}{B-A} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (14)$$

$$ABS = \frac{B-C}{C} \times 100 \text{ (\%)} \quad (15)$$

$$P_{ap} = \frac{B-C}{B-A} \times 100 \text{ (\%)} \quad (16)$$

Em que:

ρ_s : densidade seca;

ABS: absorção da água;

P_{ap} : porosidade aparente;

A: massa imersa;

B: massa da superfície seca saturada;

C: massa seca.

3.5.2 Caracterização Mecânica do Compósito

A caracterização mecânica do compósito foi feita por ensaio de flexão em 4 pontos. O ensaio seguiu as especificações da Rilem Technical Committee 49 TRF – *Testing methods for fibre reinforced cement-based composites* (1984). O equipamento utilizado para a realização do ensaio foi a máquina EMIC, com célula de carga de 30 kN e velocidade de deslocamento de 3 mm/min. Os corpos de prova apresentavam dimensões de 400 x 80 mm (comprimento x largura), as cargas foram aplicadas a cada 1/3 do vão (100 mm) (Figura 23). De acordo com a determinação de amostragem mínima foram ensaiados cinco corpos de prova para cada amostra.



Figura 23 – Ensaio de flexão em 4 pontos
Fonte: Autora (2017)

Com os resultados obtidos para cada amostra, foram determinadas a resistência à flexão (σ), de primeira fissura e última, conforme a Equação 17.

$$\sigma_{\text{flexão}} = \frac{6 \cdot M}{b \cdot h^2} \text{ (MPa)} \quad (17)$$

Em que:

M: momento fletor;

b: largura do corpo de prova;

h: espessura do corpo de prova.

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados para a dosagem de matriz foram analisados entre os diferentes teores de aditivo adicionados e posteriormente os diferentes tratamentos para análise de calorimetria. Para a análise estatística dos compósitos laminados as variáveis são a porcentagem da fibra de curauá (0, 5, 10, 15 e 20%) em fração volumétrica e a idade das amostras.

O planejamento experimental foi avaliado por meio da Análise de variância (ANOVA) verificando a existência de diferenças significativas. Para a análise da diferença entre as diversas médias dos dados utilizou-se o procedimento para a comparação de médias Tukey ao nível de significância de 5%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos desta pesquisa, desde a caracterização de materiais até as propriedades do compósito laminado.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE CURAUÁ

Neste item é apresentada toda caracterização feita da fibra de curauá, suas propriedades químicas, físicas e mecânicas, e a discussão desses resultados.

4.1.1 Caracterização Química

São apresentados na Tabela 10 os resultados da caracterização química da fibra de curauá.

Tabela 10 – Caracterização química da fibra de curauá

Ensaio	Valores médios	CVar¹ (%)
Umidade	9,14%	0,31
Extrativos totais	3,17%	8,21
Lignina	10,48%	0,32
Solubilidade em água quente	0,80%	1,54
Solubilidade em água fria	0,24%	8,92
Solubilidade em hidróxido de sódio	11,61%	0,26
Cinzas	0,85%	4,51
pH (2h)	4,82	0,59
pH (24h)	4,74	1,34

¹ Coeficiente de variação

Fonte: Autora (2017)

Ao comparar os valores da fibra de curauá com Bilcati (2015) que fez a análise do material de mesma origem, observa-se que os valores obtidos são

inferiores, como por exemplo, para os extrativos totais a autora obteve 7,07% e o teor médio obtido foi de 3,17%. Essas diferenças de propriedades podem ser obtidas, pois uma mesma espécie de fibra pode possuir propriedades químicas diferentes, devido as suas condições de origem. Pode-se dizer que quanto menor o teor de extrativos totais menor será a incompatibilidade entre a fibra e o cimento.

Observa-se que tanto a solubilidade em água quente como em água fria obtiveram valores baixos, 0,80% e 0,24% respectivamente. Esses teores representam baixas concentrações de elementos que seriam considerados prejudiciais à hidratação do cimento em maior quantidade.

A solubilidade em água quente da fibra de curauá apresentou o valor médio de 0,63%, esses extrativos solúveis em água quente podem ser considerados como o principal inibidor do cimento. Se a quantidade apresentada for superior a 7,00% de solubilidade em água quente, usualmente a fibra será considerada desqualificada para o uso com o cimento.

O teor médio solúvel em hidróxido de sódio foi de 11,61%, eliminando grande porcentagem de carboidratos de baixo peso molecular da fibra. Esses teores são considerados altos, pois eliminam além de extrativos, componentes da fibra como a celulose e hemiceluloses. A eliminação desses componentes não é interessante para o trabalho, pois a celulose e hemiceluloses conferem a fibra propriedades mecânicas significativas para o uso.

Dessa forma, ao utilizar um tratamento para a fibra de curauá como imersão em água quente, imersão em água fria ou em solução com hidróxido de sódio, deve ser analisada estas propriedades. Um tratamento com hidróxido de sódio pode ser eficiente na compatibilidade da fibra com cimento Portland, mas por degradar a fibra pode prejudicar sua estrutura e em consequência suas propriedades mecânicas.

Considerando que nas cinzas de fibras vegetais pode ser encontrado sílica, valor de 0,85% de cinzas na fibra de curauá é baixo para acarretar em algum tipo de efeito benéfico nas propriedades do cimento.

O valor médio do pH após 24 horas foi de 4,74, caracterizando assim um material de base ácida, sendo o cimento Portland um meio alcalino sua hidratação pode ser afetada nesta situação.

4.1.2 Caracterização Física

A densidade básica da fibra de curauá é apresentada na Tabela 11, com valores médios de quatro repetições.

Tabela 11 – Caracterização física da fibra de curauá

Ensaio	Valor médio (g/cm ³)	Cvar ¹ (%)
Densidade básica	0,48	1,80

¹ Coeficiente de variação

Fonte: Autora (2017)

Ao comparar com outras fibras vegetais, como a fibra de sisal estudada por Lima (2004) na qual a sua densidade é de 0,95 g/cm³, a fibra de curauá apresenta uma densidade 50,53% inferior. A densidade de 0,48 g/cm³ pode conferir ao compósito uma propriedade buscada para esse material final que é um produto leve.

4.1.3 Índice de Cristalinidade

O índice de cristalinidade obtido para a fibra de curauá foi de 76,60%, este índice está diretamente ligado com as propriedades mecânicas das fibras, pois quanto maior seu valor, melhor o desempenho em diversas aplicações. Resultando em apenas 23,40% de componentes amorfos, considera-se a fibra de curauá viável para a utilização em compósitos pelo seu alto índice de cristalinidade.

A Figura 24 apresenta o difratograma de raios x para a fibra de curauá.

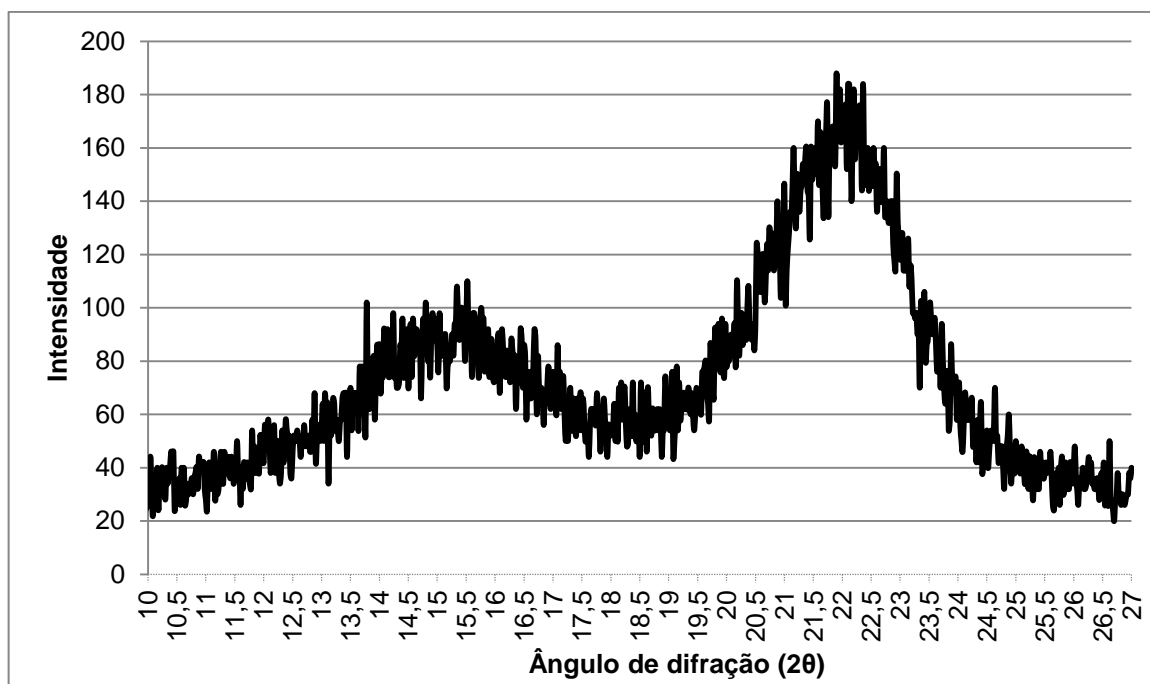


Figura 24 – Difratograma de raios x para a fibra de curauá *in natura*
Fonte: Autora (2017)

4.1.4 Caracterização Mecânica

Os valores correspondentes ao diâmetro da fibra, obtidos através de análise microscópica (Figura 25), variaram entre 55,32 a 124,00 μm . As amostras analisadas foram usadas para o cálculo da seção transversal da fibra de curauá e utilizada para a obtenção dos valores de tensão à tração da fibra.

Para a caracterização mecânica da fibra de curauá os resultados do ensaio de resistência à tração são apresentados na Tabela 12, com valores médios de seis repetições.

Tabela 12 – Caracterização mecânica da fibra de curauá

Ensaio	Valor médio (MPa)	Cvar ¹ (%)
Resistência à tração	542,64	10,19

¹ Coeficiente de variação

Fonte: Autora (2017)

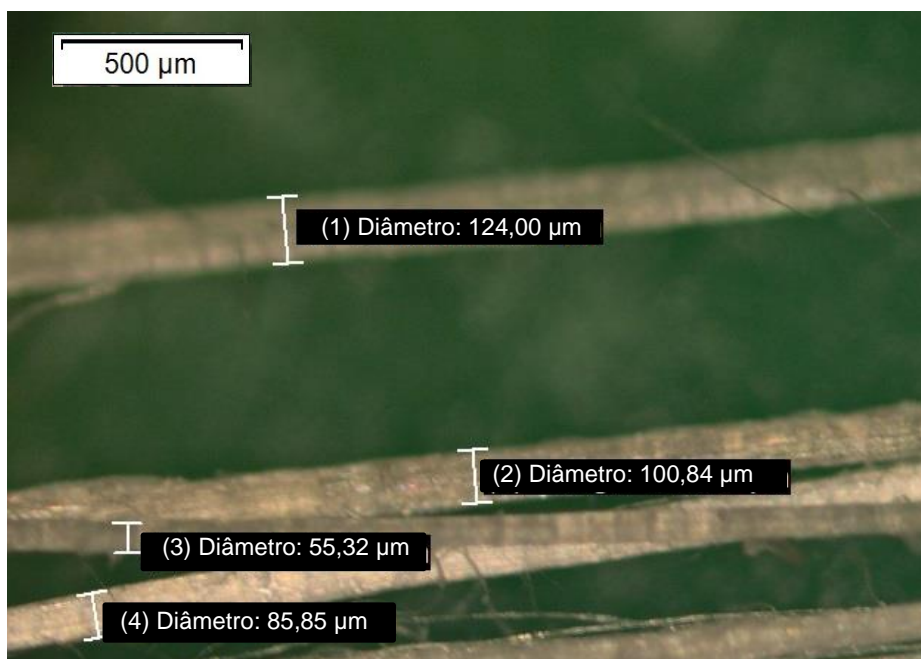


Figura 25 – Imagem microscópica do diâmetro da fibra de curauá
Fonte: Autora (2017)

O valor médio de resistência à tração da fibra de curauá foi de 542,64 MPa, ao ser comparado com valores de Oliveira (2013) que encontrou valores médios de 405,33 MPa para a fibra de juta e 391,47 para fibra de malva, observa-se que a fibra de curauá apresenta média de resistência à tração superior, o que acarretará diretamente em compósitos com propriedades mecânicas superiores.

4.2 DOSAGEM DA MATRIZ

Para verificar se a adição de acelerador de pega cloreto de cálcio influencia positivamente na mistura, bem como a dosagem necessária de superplastificante foram realizados alguns ensaios prévios.

4.2.1 Propriedade Reológica da Mistura Fresca

O espalhamento obtido pelo ensaio de mini abatimento para as diferentes misturas é apresentado na Tabela 13, com valores médios de quatro repetições.

Tabela 13 – Valores médios de espalhamento

Nomenclatura	Teor de adição de superplastificante (%)	Cloreto de cálcio: 0%		Cloreto de cálcio: 4,0%	
		E ¹ (mm)	Cvar ² (%)	E ¹ (mm)	Cvar ² (%)
T1	2,00	78,38 ^{aC}	0,80	76,63 ^{aC}	2,12
T2	2,50	92,25 ^{aB}	1,90	95,50 ^{aB}	0,52
T3	3,00	262,50 ^{aA}	1,90	260,75 ^{aA}	0,29

¹ Espalhamento

² Coeficiente de variação

* Valores em uma mesma linha, seguidos por letras minúsculas idênticas não diferem entre si ao nível de 5 % pelo teste de Tukey, enquanto valores em uma mesma coluna, seguidos por letras maiúsculas idênticas não diferem entre si ao nível de 5 % pelo teste de Tukey.

Fonte: Autora (2017)

Os resultados de Melo Filho (2012) no ensaio de mini abatimento variaram de 280 à 300 mm de espalhamento, se aproximando do traço com teor de superplastificante de 3% neste trabalho onde foram obtidos espalhamentos médios de 262,5 mm sem adição de cloreto de cálcio e 260,75 mm com adição de cloreto de cálcio.

A análise de variância foi realizada para comparar estatisticamente a influência dos teores de superplastificante no espalhamento, afirma-se que há diferenças significativas entre os diferentes teores de superplastificante e que não há diferença significativa na adição de cloreto de cálcio.

Com o objetivo de não aumentar o fator água/matriz cimentícia, o maior espalhamento neste caso indicará a fluidez buscada para trabalhabilidade. A Figura 26 apresenta a variação do espalhamento para os teores de superplastificante, bem como para os teores de cloreto de cálcio.

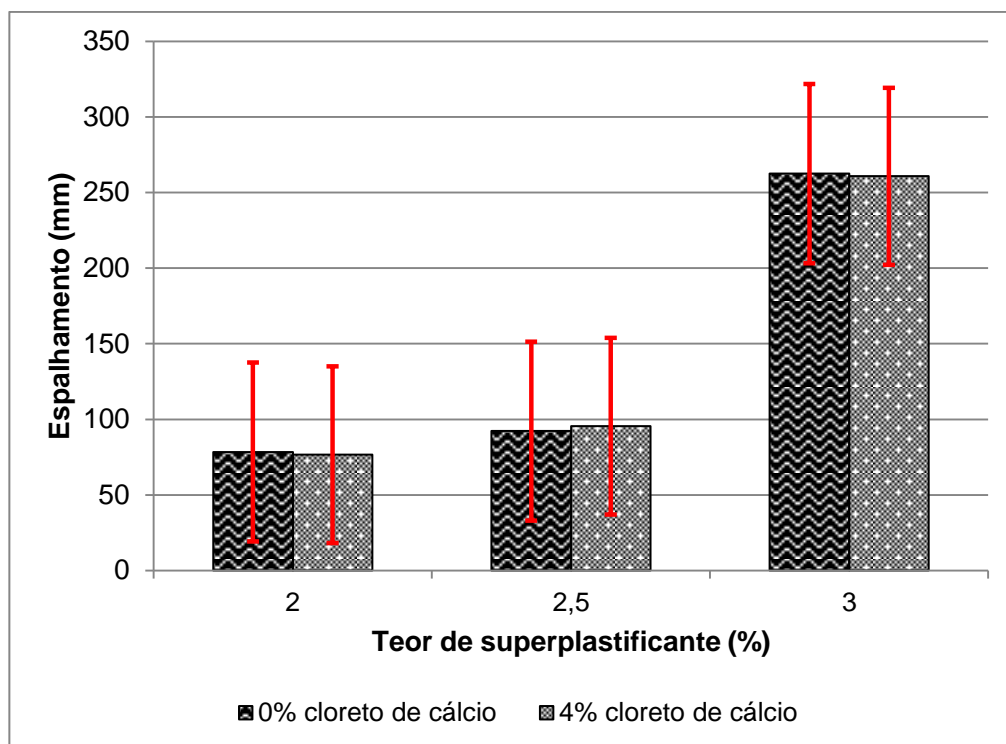


Figura 26 – Análise da influência do teor de superplastificante e cloreto de cálcio no espalhamento
Fonte: Autora (2017)

Observa-se que a adição de cloreto de cálcio não demonstra diferença significativa dentro do mesmo teor de superplastificante, sendo que o teor de adição de 3% de superplastificante elevou o espalhamento em 230%, mostrando-se adequado para a trabalhabilidade procurada para manusear o material.

4.2.2 Ensaio de Compressão

A Tabela 14 apresenta os valores médios de resistência à compressão aos 28 dias de idade da matriz cimentícia, com valores médios de cinco repetições.

Tabela 14 – Valores médios de resistência à compressão

Nomenclatura	Teor de adição de superplastificante (%)	Cloreto de cálcio: 0%		Cloreto de cálcio: 4,0%	
		RC ¹ (MPa)	CVar ² (%)	RC ¹ (MPa)	CVar ² (%)
T1	2,00	48,37 ^{bA}	4,77	59,16 ^{aA}	4,97
T2	2,50	48,30 ^{aA}	15,11	56,81 ^{aA}	16,22
T3	3,00	47,81 ^{aA}	6,14	58,63 ^{bA}	6,87

¹ Resistência à compressão

² Coeficiente de variação

* Valores em uma mesma linha, seguidos por letras minúsculas idênticas não diferem entre si ao nível de 5 % pelo teste de Tukey, enquanto valores em uma mesma coluna, seguidos por letras maiúsculas idênticas não diferem entre si ao nível de 5 % pelo teste de Tukey.

Fonte: Autora (2017)

A adição de cloreto de cálcio demonstra resultados positivos no aumento da resistência, onde verificou-se que a utilização deste aditivo na mistura acarretou em aumentos de até 22,63% na resistência. O comportamento de aumento de resistência pelo acelerador de pega já era esperado pelo fato deste elevar a velocidade do desenvolvimento da resistência.

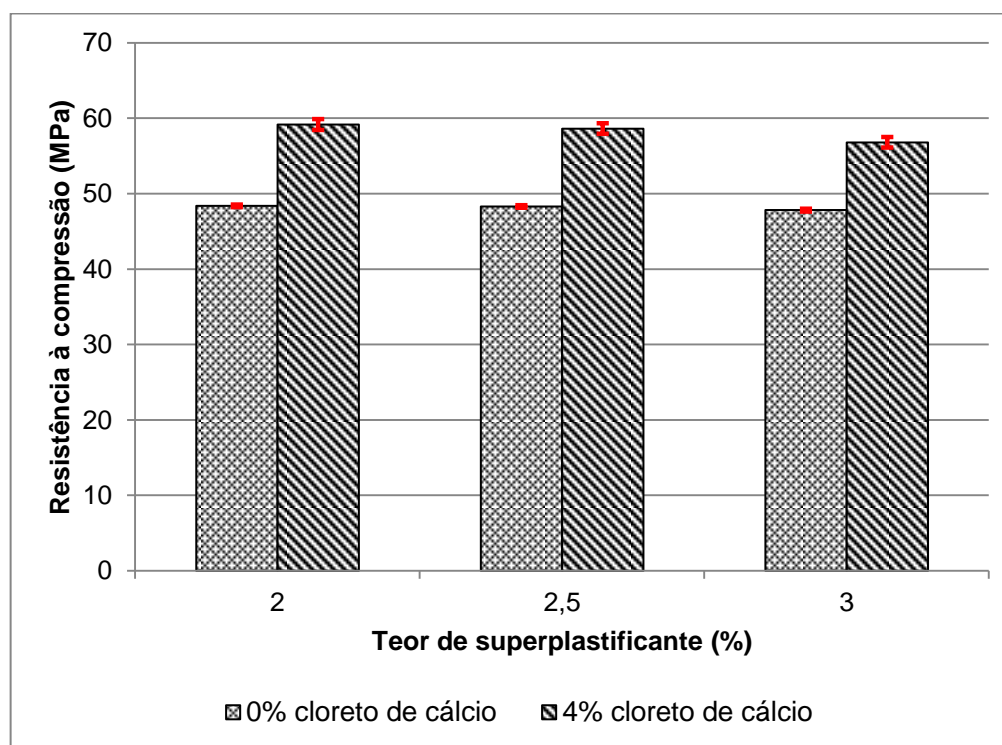


Figura 27 – Análise da influência do teor de superplastificante e cloreto de cálcio na resistência à compressão

Fonte: Autora (2017)

O aumento de teor de superplastificante de 2% para 3% na matriz acarreta em uma diminuição da resistência de 1,16% sem adição de cloreto de cálcio e de 0,90% com a adição de cloreto de cálcio. Não demonstrando valores significativos na alteração da resistência, constatando-se na Figura 27 as análises expostas.

Pela análise da variância verifica-se que não há diferenças significativas ao alterar a dosagem de superplastificante no compósito para o fator de resistência à compressão. Para a adição de cloreto de cálcio, pela análise da variância observou-se que há diferenças significativas na resistência.

4.2.3 Ensaio de Inibição

Apresentam-se os valores médios de temperatura máxima de hidratação e o índice de inibição da fibra de curauá na Tabela 15, com valores médios de três repetições.

Tabela 15 – Valores médios de temperatura máxima e índice de inibição para pasta com matriz cimentícia e fibra de curauá

Nomenclatura	Temperatura máxima (°C)	I¹ (%)	Classificação
Pasta referência	51,65 ^A	-	-
Fibra de curauá (in natura)	28,60 ^C	15,16 ^A	Moderada inibição
Fibra de curauá (água quente)	32,40 ^C	7,70 ^B	Baixa inibição
Fibra de curauá (in natura) + 4% de cloreto de cálcio	41,87 ^B	2,65 ^B	Baixa inibição
Fibra de curauá (água quente) + 4% de cloreto de cálcio	42,13 ^B	1,24 ^B	Baixa inibição

¹ Índice de inibição

* Valores seguidos pela mesma letra dentro da mesma coluna, não se diferenciam estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Fonte: Autora (2017)

É classificado como de baixa inibição as misturas com fibra de curauá imersa em água quente e as fibras *in natura* e com tratamento de água quente que tiveram adições de cloreto de cálcio. O cloreto de cálcio aumenta a compatibilidade entre a fibra e a matriz devido ao fato deste acelerar a pega do cimento, não permitindo dessa forma que a fibra de curauá afete o processo de hidratação do cimento de forma significativa.

O menor índice de inibição foi obtido pela mistura de fibra de curauá com água quente e adição de cloreto de cálcio, sendo esta mistura que apresenta melhor compatibilidade entre a fibra e a matriz.

Na Figura 28 é apresentada a curva de hidratação das misturas.

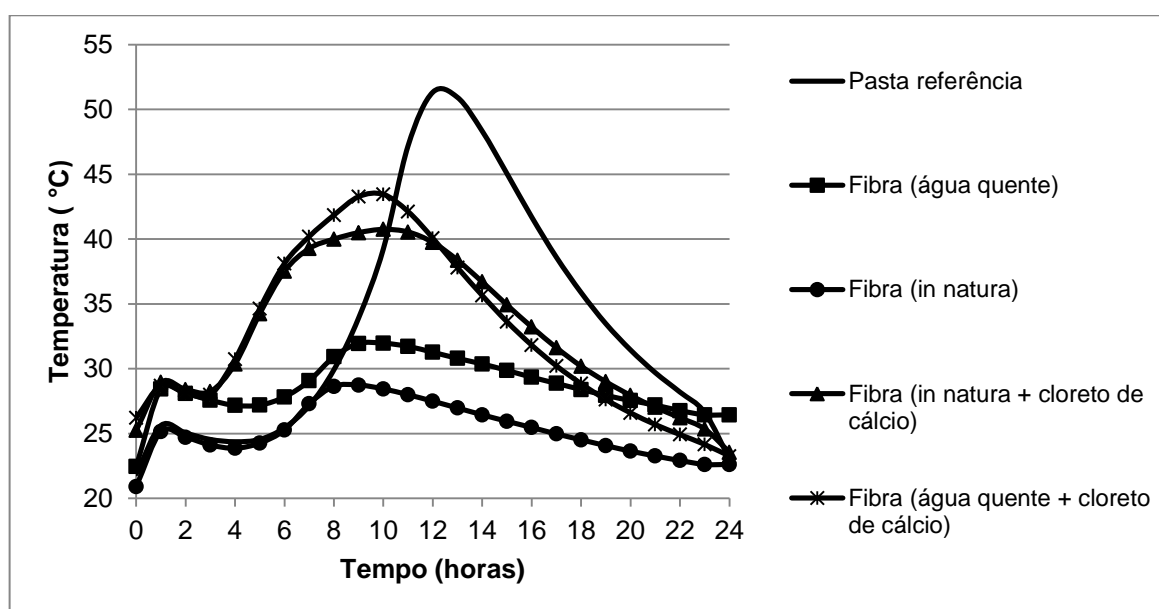


Figura 28 – Curva de hidratação para pasta referência e fibras com diferentes tratamentos
Fonte: Autora (2017)

Pode-se observar na Figura 28 que a curva que se aproxima mais da pasta referência é da fibra tratada com água quente e com adição de cloreto de cálcio, pois estes se aproximaram mais da temperatura máxima atingida pela pasta referência. A curva da mistura com fibra *in natura* com adição de cloreto de cálcio também se aproxima da pasta referência com diferença de menor temperatura máxima atingida.

A análise de variância foi realizada para comparar estatisticamente a influência dos tratamentos propostos na temperatura de hidratação do cimento e

índice de inibição. Sendo assim, pode-se afirmar que há diferenças significativas entre os pré-tratamentos realizados na fibra de curauá.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO

Neste item são apresentados os resultados das análises dos compósitos produzidos (Figura 29), sendo relatadas as análises das propriedades físicas e mecânicas.



Figura 29 – Compósito laminado com reforço de volume de 10% de fibra de curauá
Fonte: Autora (2017)

4.3.1 Caracterização Física do Compósito

Na Tabela 16 são demonstrados os resultados dos valores médios de cinco repetições da densidade dos compósitos laminados nas idades de 7, 28 e 90 dias.

Tabela 16 – Valores médios de densidade dos compósitos laminados com 7, 28 e 90 dias de idade

Nomenclatura	Fibra de curauá (%)	Substituição de cimento por metacaulim (%)	ρ_s (g/cm ³)	CVar ¹ (%)
7 dias				
P0	-	-	1,94 ^A	1,33
P5	5	-	1,91 ^A	1,29
P10	10	-	1,76 ^{BC}	2,44
P15	15	-	1,61 ^D	2,80
P20	20	-	1,47 ^E	3,51
P0M	-	50	1,83 ^B	0,44
P5M	5	50	1,70 ^C	1,81
P10M	10	50	1,58 ^D	2,19
P15M	15	50	1,46 ^E	2,08
P20M	20	50	1,44 ^E	2,73
28 dias				
P0	-	-	1,92 ^A	0,35
P5	5	-	1,89 ^{AB}	0,85
P10	10	-	1,83 ^C	0,37
P15	15	-	1,66 ^{DE}	5,31
P20	20	-	1,64 ^E	3,98
P0M	-	50	1,83 ^{BC}	0,38
P5M	5	50	1,74 ^{CD}	0,70
P10M	10	50	1,62 ^E	1,66
P15M	15	50	1,48 ^F	4,08
P20M	20	50	1,47 ^F	3,38
90 dias				
P0	-	-	2,01 ^A	0,25
P5	5	-	2,00 ^A	0,79
P10	10	-	1,90 ^C	1,92
P15	15	-	1,74 ^{DE}	1,79
P20	20	-	1,71 ^E	5,57
P0M	-	50	1,91 ^B	1,75
P5M	5	50	1,80 ^{CD}	1,15
P10M	10	50	1,68 ^E	1,97
P15M	15	50	1,60 ^F	4,37
P20M	20	50	1,50 ^G	2,22

¹ Coeficiente de variação

* Valores seguidos pela mesma letra dentro da mesma coluna, para a mesma idade, não se diferenciam estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Fonte: Autora (2017)

Os painéis com substituição de cimento por metacaulim quando comparados com os painéis sem a adição (levando em consideração as respectivas adições de fibra) apresenta valores inferiores de densidade em todos os casos. Esta característica é justificada pelo fato do metacaulim ser um material com densidade inferior a densidade do cimento, contribuindo assim para um compósito de densidade inferior. Aos 90 dias de idade a adição de metacaulim reduz entre 8 a 12% os valores médios de densidade.

A adição de fibra de curauá também diminui a densidade do compósito laminado em até 20%, quanto maior a quantidade de fibra adicionada menor a densidade. Aos 90 dias de idade o compósito P20M (20% de fibra de curauá e 50% de substituição por metacaulim) resultou em densidade média de 1,50 g/cm³.

Pela análise da variância constata-se que há diferenças significativas entre os painéis. Observa-se que os painéis P0 e P5 não apresentam diferenças significativas entre si aos 7 dias, 28 dias e 90 dias de idade. Já os painéis P0M e P5M apresentam diferenças significativas aos 7 dias e 90 dias, e não apresentam diferenças aos 28 dias de idade. Aos 90 dias de idade o painel P10M não apresenta diferenças significativas para o P15 e P20, e o painel P5M não apresenta diferenças significativas para o P10 e P15.

De 7 para 90 dias em todos os casos ocorre o aumento da densidade, fato que ocorre devido a hidratação do cimento continuar e ainda pela carbonatação que acarreta no fechamento dos poros e torna o compósito menos permeável.

Os resultados para absorção de água aos 7, 28 e 90 dias de idade são apresentados na Tabela 17, com valores médios de cinco repetições.

Tabela 17 – Valores médios de absorção de água dos compósitos laminados com 7, 28 e 90 dias de idade

(continua)

Nomenclatura	Fibra de curauá (%)	Substituição de cimento por metacaulim (%)	ABS (%)	CVar ¹ (%)
7 dias				
P0	-	-	12,04 ^E	3,53
P5	5	-	13,46 ^{DE}	3,33
P10	10	-	15,83 ^{CD}	6,68
P15	15	-	19,55 ^B	8,44

Tabela 17 – Valores médios de absorção de água dos compósitos laminados com 7, 28 e 90 dias de idade

(conclusão)				
P20	20	-	25,90 ^A	11,58
P0M	-	50	16,18 ^{CD}	1,32
P5M	5	50	18,43 ^{BC}	2,56
P10M	10	50	18,42 ^{BC}	2,99
P15M	15	50	24,82 ^A	5,52
P20M	20	50	25,81 ^A	10,71
28 dias				
P0	-	-	13,31 ^E	2,24
P5	5	-	14,38 ^{DE}	4,97
P10	10	-	14,19 ^{CDE}	2,48
P15	15	-	19,06 ^C	11,26
P20	20	-	19,32 ^C	13,88
P0M	-	50	15,75 ^{CDE}	0,94
P5M	5	50	17,37 ^{CD}	1,21
P10M	10	50	19,25 ^C	8,85
P15M	15	50	24,63 ^B	14,00
P20M	20	50	31,68 ^A	9,32
90 dias				
P0	-	-	10,25 ^E	1,14
P5	5	-	10,27 ^E	2,68
P10	10	-	12,63 ^{CD}	6,98
P15	15	-	16,21 ^{BC}	4,88
P20	20	-	16,79 ^{BC}	24,00
P0M	-	50	13,09 ^{DE}	1,49
P5M	5	50	14,59 ^{CD}	2,01
P10M	10	50	17,13 ^{BC}	6,85
P15M	15	50	19,04 ^B	10,81
P20M	20	50	23,32 ^A	8,13

¹ Coeficiente de variação

* Valores seguidos pela mesma letra dentro da mesma coluna, para a mesma idade, não se diferenciam estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Fonte: Autora (2017)

Os valores médios de absorção de água aumentam conforme a adição de fibra de curauá nos compósitos laminados e também pela substituição de cimento por metacaulim. A situação ideal seria atingir o menor valor possível de absorção de água o que é alcançado pelos compósitos laminados P0 e P0M (testemunhas), mas

ao analisar a variância observa-se que não há diferenças significativas entre P0 e P5 e entre P0M e P5M nas idades de 7, 28 e 90 dias.

O painel P10M não apresenta diferença significativa entre P0M, P5M, P10 e P15. O único painel que apresenta diferenças significativas de todos os outros é o P20M aos 28 e 90 dias de idade.

De acordo com a NBR 15498 (ABNT, 2016) para placas cimentícias com reforço de fibra essas devem apresentar valores de absorção de água inferiores (ou igual) a 25%, aos 90 dias de idade todos os painéis produzidos apresentam valores médios abaixo da referência.

Na Tabela 18 são apresentados os resultados dos valores médios de cinco repetições de porosidade aparente nas idades de 7, 28 e 90 dias.

Tabela 18 – Valores médios de porosidade aparente dos compósitos laminados com 7, 28 e 90 dias de idade

(continua)

Nomenclatura	Fibra de curauá (%)	Substituição de cimento por metacaulim (%)	P _{ap} (%)	CVar ¹ (%)
7 dias				
P0	-	-	23,36 ^D	3,18
P5	5	-	25,67 ^{CD}	3,06
P10	10	-	27,81 ^{BC}	3,91
P15	15	-	31,43 ^B	5,92
P20	20	-	38,00 ^A	9,13
P0M	-	50	29,54 ^B	0,96
P5M	5	50	31,23 ^B	1,98
P10M	10	50	29,15 ^{BC}	4,49
P15M	15	50	36,13 ^A	2,20
P20M	20	50	37,04 ^A	9,76
28 dias				
P0	-	-	25,61 ^D	1,97
P5	5	-	27,20 ^{CD}	4,50
P10	10	-	25,97 ^{CD}	2,51
P15	15	-	31,45 ^{BC}	6,93
P20	20	-	31,63 ^{BC}	11,19
P0M	-	50	28,86 ^{CD}	1,02
P5M	5	50	30,30 ^C	0,91
P10M	10	50	31,21 ^C	8,91

Tabela 19 – Valores médios de porosidade aparente dos compósitos laminados com 7, 28 e 90 dias de idade

(conclusão)				
P15M	15	50	36,25 ^B	10,07
P20M	20	50	46,34 ^A	6,95
90 dias				
P0	-	-	20,62 ^D	1,03
P5	5	-	20,50 ^D	1,99
P10	10	-	23,94 ^C	5,20
P15	15	-	28,20 ^{BC}	3,78
P20	20	-	28,59 ^{BC}	17,56
P0M	-	50	25,03 ^C	3,04
P5M	5	50	26,30 ^C	2,66
P10M	10	50	28,74 ^{BC}	5,70
P15M	15	50	30,32 ^B	7,50
P20M	20	50	35,00 ^A	6,08

¹ Coeficiente de variação

* Valores seguidos pela mesma letra dentro da mesma coluna, para a mesma idade, não se diferenciam estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Fonte: Autora (2017)

Os valores de porosidade aparente, tal como a absorção de água aumentam conforme o aumento do teor de adição de fibra de curauá. Assim como também aumentam com a adição de metacaulim em substituição ao cimento.

Pela análise da variância, pode-se afirmar que há diferenças significativas para as variâncias de porosidade aparente dos compósitos laminados. Em relação as diferenças significativas entre as médias, verifica-se que aos 90 dias de idade o painel P20M (20% de fibra de curauá e 50% de metacaulim) apresenta maior média de porosidade. Os painéis P0 e P5 apresentam as menores médias e não apresentam diferenças significativas entre si.

Os painéis testemunha (P0 e P0M) apresentam valores médios inferiores de porosidade e absorção de água e superiores de densidade quando comparados com os painéis com adição de fibra de curauá. O motivo dessa diferença é devido à reação do silicato tricálcico e do silicato dicálcico com a água, que resultam em cristais que preenchem a pasta e a tornam mais impermeável. Com a adição de fibra vegetal, esta pode interromper o fechamento dos cristais na pasta e torná-la mais porosa e menos densa. Outro fator que acarreta na redução da densidade é a

dificuldade de homogeneização dos painéis conforme aumento da adição de fibras, auxiliando dessa forma em maior número de poros.

Para os compósitos com teores de adição de 20% em volume de fibra de curauá, em peças menores pelo grande volume de fibras nas camadas, além da dificuldade de homogeneização na hora da moldagem, após a desforma e ensaios algumas amostras menores apresentaram comportamento de descolamento da argamassa, mostrando assim a baixa aderência entre fibra e matriz.

4.3.2 Caracterização Mecânica do Compósito

Com base nos diagramas de tensão x deformação foram avaliados dois valores de resistência dos compósitos laminados, sendo a primeira denominada de tensão de primeira fissura (σ_{1f}). Após o surgimento da primeira fissura o comportamento do material é caracterizado por múltiplas fissuras (na presença de fibra como reforço) até atingir a máxima tensão pós-fissuração, denominada então tensão última (σ_u).

Na Tabela 19 são apresentados os valores médios das propriedades mecânicas dos compósitos laminados com reforço de fibra de curauá, com valores médios de cinco repetições.

Tabela 20 – Valores médios das propriedades mecânicas obtidas dos compósitos laminados com 7, 28 e 90 dias de idade

(continua)

Nomenclatura	Fibra de curauá (%)	Substituição de cimento por metacaulim (%)	σ_{1f}^1 (MPa)	CVar ² (%)	σ_u^3 (MPa)	CVar ² (%)
7 dias						
P0	-	-	12,71 ^A	10,15	-	-
P5	5	-	8,61 ^{BCD}	25,88	6,43 ^{BC}	23,63
P10	10	-	10,41 ^{ABC}	19,92	14,28 ^A	17,22
P15	15	-	5,01 ^{DE}	42,02	6,67 ^{BC}	23,33
P20	20	-	3,78 ^E	33,19	3,15 ^C	15,59
P0M	-	50	11,57 ^{AB}	12,02	-	-
P5M	5	50	11,16 ^{AB}	11,85	13,83 ^A	24,11
P10M	10	50	6,74 ^{CDE}	31,59	11,28 ^{AB}	10,08

Tabela 19 – Valores médios das propriedades mecânicas obtidas dos compósitos laminados com 7, 28 e 90 dias de idade

							(conclusão)
P15M	15	50	6,61 ^{DE}	35,85	10,56 ^{AB}	43,76	
P20M	20	50	3,66 ^E	24,69	3,57 ^C	14,33	
28 dias							
P0	-	-	14,33 ^{AB}	9,16	-	-	
P5	5	-	14,10 ^{AB}	27,13	17,48 ^A	13,64	
P10	10	-	9,24 ^{CD}	20,16	10,38 ^{BC}	9,82	
P15	15	-	10,79 ^{CD}	21,13	7,93 ^{CD}	18,51	
P20	20	-	4,71 ^E	40,55	5,04 ^D	37,05	
P0M	-	50	18,53 ^A	10,04	-	-	
P5M	5	50	12,50 ^{BC}	9,31	12,41 ^B	11,48	
P10M	10	50	10,99 ^{BC}	12,55	11,16 ^{BC}	9,07	
P15M	15	50	12,65 ^{BC}	20,45	10,63 ^{BC}	17,02	
P20M	20	50	5,27 ^{DE}	33,50	5,15 ^D	25,00	
90 dias							
P0	-	-	13,36 ^{BC}	18,68	-	-	
P5	5	-	14,61 ^{ABC}	12,82	4,59 ^C	20,09	
P10	10	-	16,15 ^{AB}	33,14	13,33 ^A	28,67	
P15	15	-	9,53 ^{CD}	23,94	6,95 ^{BC}	37,56	
P20	20	-	5,64 ^D	16,10	5,54 ^{BC}	44,15	
P0M	-	50	20,30 ^A	15,17	-	-	
P5M	5	50	15,65 ^{ABC}	15,54	17,16 ^A	11,89	
P10M	10	50	13,67 ^{BC}	34,30	14,41 ^A	32,06	
P15M	15	50	14,63 ^{ABC}	12,32	13,68 ^A	14,74	
P20M	20	50	11,75 ^{BCD}	30,10	11,40 ^{AB}	31,23	

¹ Tensão de primeira fissura

² Coeficiente de variação

³ Tensão última

* Valores seguidos pela mesma letra dentro da mesma coluna, para a mesma idade, não se diferenciam estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Fonte: Autora (2017)

Ao analisar a substituição de cimento por metacaulim em 50% tem-se que os valores médios de tensão de primeira fissura aos 7 e 28 dias não apresentam diferenças significativas quando comparados com o mesmo teor de adição de fibra. Aos 90 dias de idade todos painéis com metacaulim apresentaram valores superiores de tensão de primeira fissura do que os painéis sem o metacaulim (em média aumentos de 120%), com exceção do painel P10M (10% de adição de fibra

de curauá e 50% de metacaulim) que resultou em valor médio de 13,67 MPa e o P10 apresenta valor médio de 16,15 MPa. Ainda, pela análise de variância considera-se que não há diferenças significativas entre os painéis P10M e P10.

Para as adições de fibra de curauá aos 90 dias de idade o maior valor médio de tensão de primeira fissura é do painel P10 com 16,15 MPa, sendo este 18,14% superior do que a média de 13,67 MPa do P10M. Apesar disso, como já dito anteriormente a ANOVA constatou que não há diferenças significativas entres estes painéis. Ao analisar a tensão última tem-se que aos 90 dias as maiores médias são relacionadas com os painéis que tiveram a adição de metacaulim, sendo que o painel P5M apresenta a maior média, mas este não apresenta diferenças significativas quando comparado com as variâncias dos painéis P10M, P15M, P20M e P10.

Comparando com outros autores, aos 28 dias de idade, os valores de σ_{1f} foram de 10,52 MPa para Rodrigues (2015) para volume de 6% de fibra de malva, 7,96 MPa para Oliveira (2013) com reforço em volume de 8% de malva, e 11,45 MPa obtido por Melo Filho (2005) para volume de 6% de fibra de sisal. Obtendo assim nesta pesquisa valores superiores a desses autores com volumes de fibra de curauá em 5% (12,50 MPa) e 15% (12,65 MPa) aos 28 dias de idade.

Para as adições em fração de volumétrica de 20% de fibra de curauá pode-se explicar seu desempenho inferior devido à dificuldade observada durante a moldagem dos compósitos. Durante a produção a matriz cimentícia não penetrava nas camadas de fibras devido ao grande volume de concentração destas.

A tensão última em alguns casos se mostra superior do que a tensão de primeira fissura, aos 90 dias o valor médio de tensão última foi 9,65% superior a tensão de primeira fissura do painel P5M. Tal comportamento, de valores superiores de carga assim como também de deformação última resultam em compósitos laminados mais resistentes, tenazes e com variedade de aplicações.

Observando o aumento da idade nos compósitos laminados, apresenta-se os gráficos para a tensão de primeira fissura e tensão última nas Figuras 30 e 31.

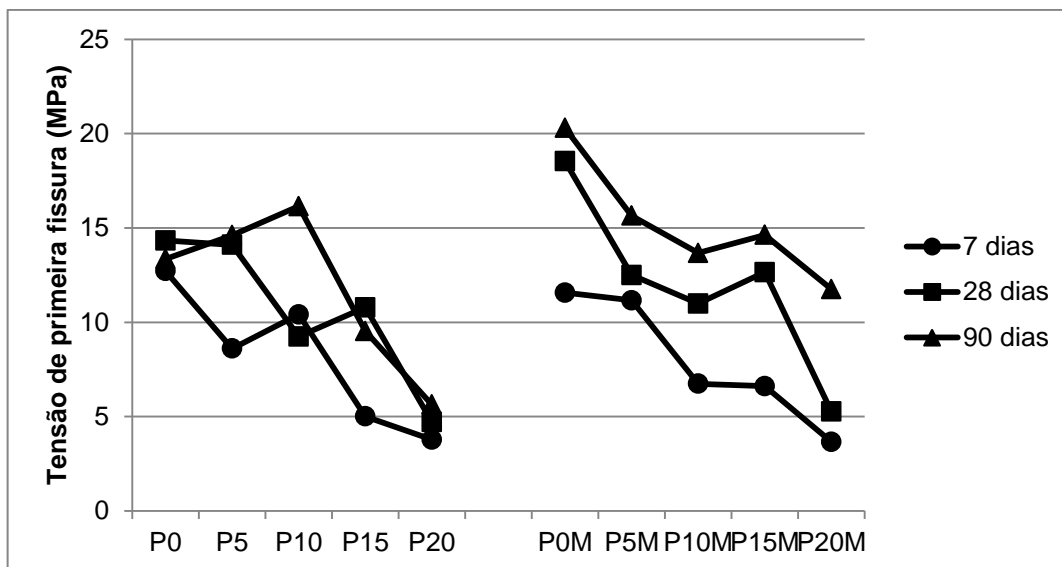


Figura 30 – Análise de tensão de primeira fissura para os painéis laminados
Fonte: Autora (2017)

Percebe-se que o aumento da tensão de primeira fissura nos compósitos laminados sem substituição de cimento por metacaulim apresentam comportamentos particulares. Tanto para o P0 como para P15, as médias de tensão aos 28 dias foram superiores as médias de tensão aos 90 dias de idade. Isso pode ser justificado devido ao fato do traço ter sido definido para os compósitos com a substituição de cimento por metacaulim em 50%, dessa forma os painéis com matriz composta apenas por cimento obtiveram pasta mais consistente o que dificultou a homogeneização no processo de moldagem.

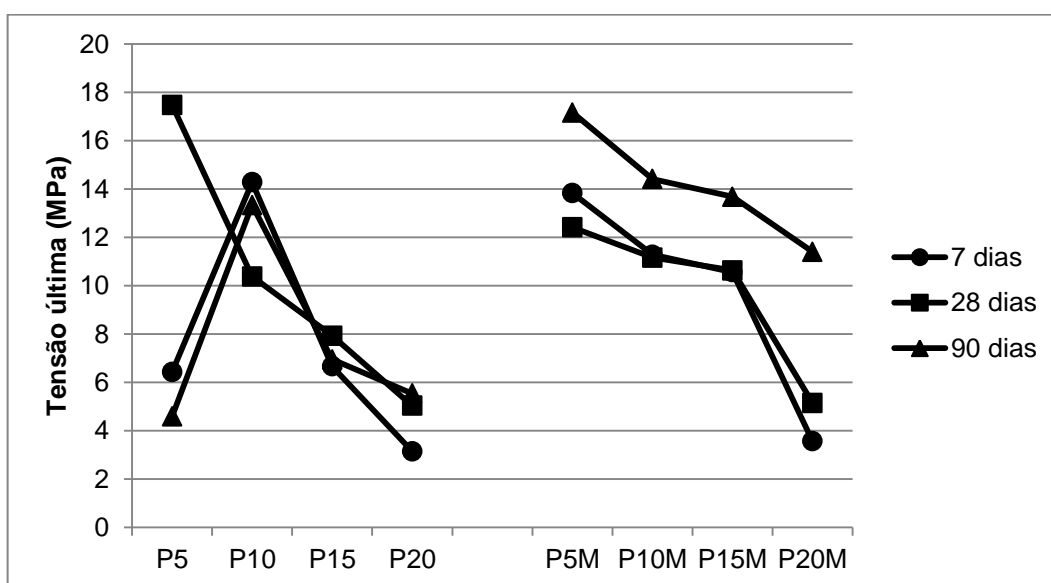


Figura 31 – Análise da tensão última para os painéis laminados
Fonte: Autora (2017)

Os resultados obtidos demonstram comportamentos semelhantes de elevação de tensão conforme aumento das idades, apenas o painel de 20% de adição de fibra de curauá que apresenta um crescimento de tensão de primeira fissura maior de 28 para 90 dias, passando de 5,27 para 11,75 MPa.

Pode-se observar o comportamento dos compósitos laminados na Figura 32 ao comparar o painel P0M sem adição de fibra de curauá com o painel P5M (5% de fibra de curauá).

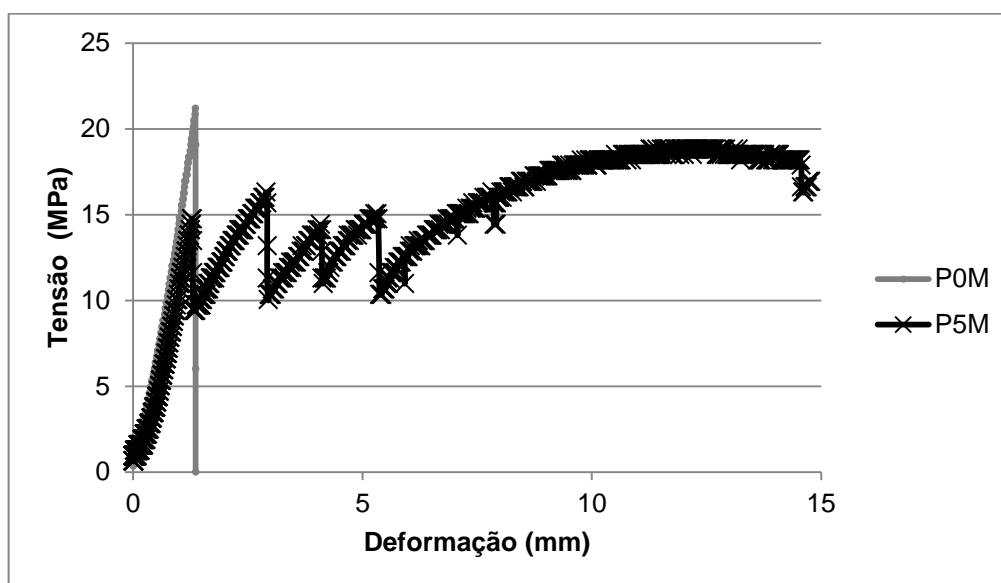


Figura 32 – Influência do volume de fibras no comportamento tensão x deformação nos compósitos sob flexão
 Fonte: Autora (2017)

O painel P0M é caracterizado com uma única fissura, pois ocorre o rompimento deste painel nesse momento e o P5M apresenta um comportamento de múltiplas fissuras. Caracterizando dessa forma os painéis sem adição de fibra como um material frágil e os painéis com adição de fibra como um material dúctil. As quedas de carga no gráfico de tensão x deformação são correspondentes às fissuras durante o ensaio. Para as amostras de matriz sem adição de fibra de curauá (P0 e P0M) ocorre um comportamento linear até a ruptura. Já para os corpos de prova com adição de fibras ao invés de ocorrer uma ruptura após a tensão de primeira fissura, ocorre uma queda de carga e o compósito continua suportando cargas, obtendo uma maior deformação.

O comportamento de múltiplas fissuras é caracterizado por alguns autores como o volume crítico de fibras. Tal comportamento foi encontrado por Lima (2004) ao atingir o volume de 5,4% de fibras de sisal.

Fatos estes que podem ser observados na Figura 33, com as amostras após ensaio de flexão em 4 pontos.



Figura 33 – Amostras de compósitos laminados após ensaio de flexão direta em 4 pontos
Fonte: Autora (2017)

Na Figura 34 são apresentados os modos de ruptura dos compósitos laminados com adição de fibra de curauá, sem metacaulim. Para todos os compósitos o número de fissuras variou entre 1 a 2 fissuras.



(a)

(b)



Figura 34 – Modo de fratura dos compósitos laminados sem metacaulim com 90 dias de idade, sendo: (a) P5; (b) P10; (c) P15; e (d) P20
 Fonte: Autora (2017)

Os compósitos com adição de metacaulim por sua vez apresentaram maior número de fissuras em alguns casos. O compósito P5 apresentou variação de fissuras entre 2 e 4 (Figura 35a). Já para teor de fibras de 10% o número de fissuras variou de 1 a 2 (Figura 35b) e de 1 a 2 (Figura 35c) para o compósito P15. Por fim, para adições de 20% de fibras de curauá o número de fissuras variou de 2 a 3 (Figura 35d).

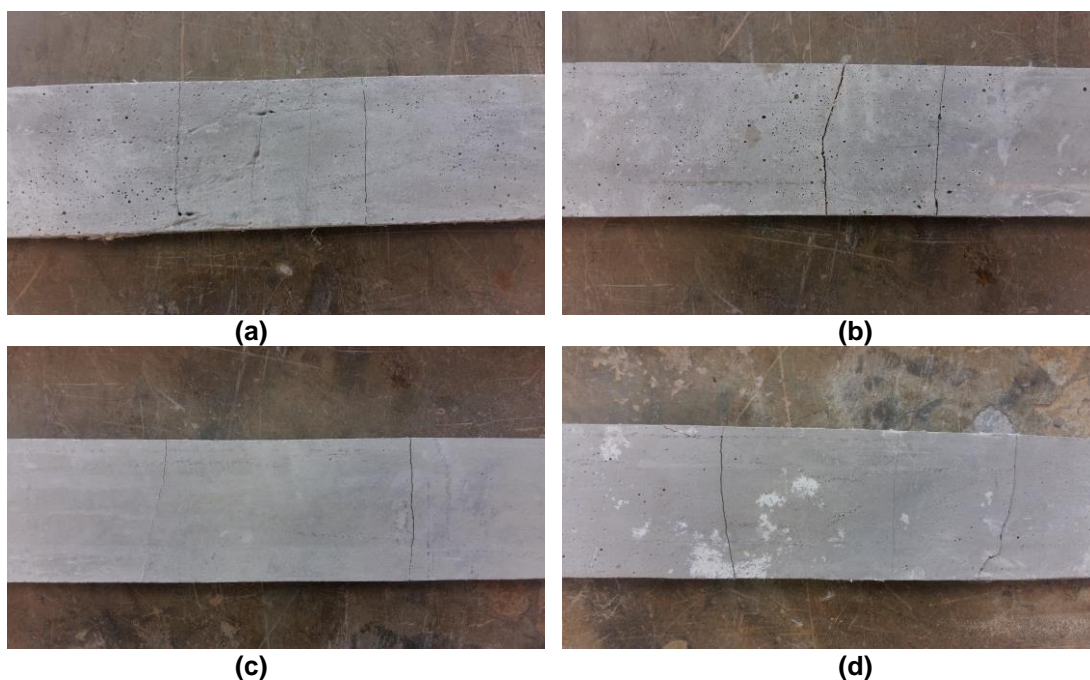


Figura 35 – Modo de fratura dos compósitos laminados com metacaulim com 90 dias de idade, sendo: (a) P5M; (b) P10M; (c) P15M; e (d) P20M
 Fonte: Autora (2017)

Ao analisar o comportamento dos valores médios dos compósitos laminados com adições de fibra de curauá e utilizando metacaulim como substituto parcial do cimento na idade de 90 dias percebe-se como consta na Figura 36, que as tensões últimas são superiores as tensões de primeira fissura até atingir o volume de 15% de fibra de curauá, após isso a tendência é que a tensão de primeira fissura seja superior.

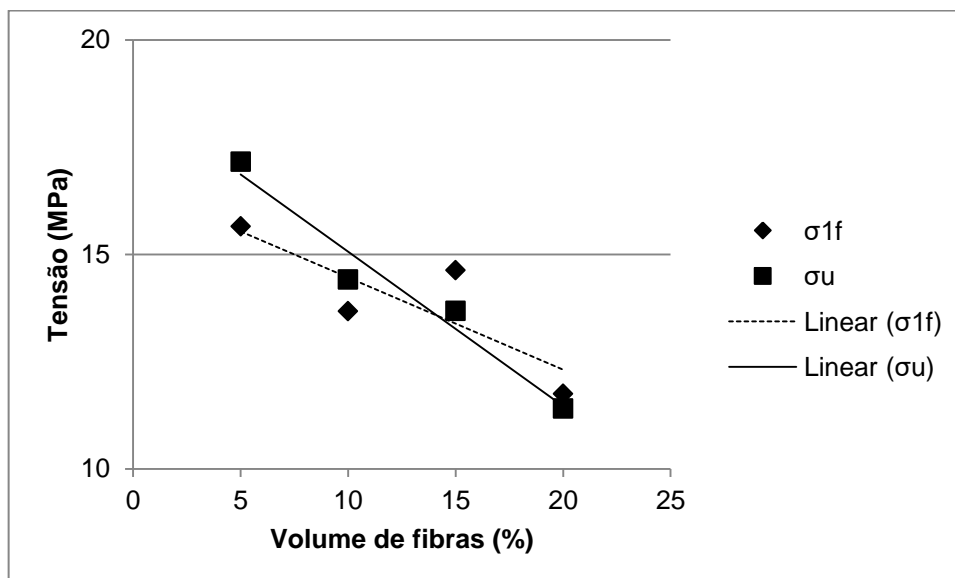


Figura 36 – Análise de comportamento para tensão x volume de fibras de compósitos laminados

Fonte: Autora (2017)

O comportamento neste caso também é que conforme a adição do volume de fibras de curauá aumenta a tensão tanto de primeira fissura como a tensão última reduzam. Aos 90 dias de idade de 5% de fibra de curauá para 20% houve redução de 24,92% para a tensão de primeira fissura e 33,57% para tensão última nos compósitos laminados com metacaulim. Já nos compósitos de matriz apenas de cimento ao fazer essa comparação a redução de tensão de primeira fissura foi de 61,34% e de tensão última houve aumento de 20,59%. Percebe-se que a introdução de metacaulim na mistura para substituir o cimento reduz mais da metade a queda de tensões conforme o aumento de volume de fibras.

5 CONCLUSÕES

Quanto à compatibilidade da fibra de curauá com o cimento Portland CP V-ARI, conclui-se que a imersão em água quente, assim como a adição de cloreto de cálcio diminuem a inibição da fibra com a matriz.

O uso do aditivo acelerador de pega de cloreto de cálcio diminuiu a inibição da fibra de curauá na matriz cimentícia e aumentou a resistência dos compósitos.

O uso de aditivo superplastificante em teor de 3% promoveu trabalhabilidade adequada ao material, considerando as propriedades hidrófugas das fibras naturais e também a retenção de água do metacaulim. Dessa forma, para a moldagem o uso de uma matriz auto adensável permitiu que os compósitos tivessem comportamento reológico necessário para a produção. A fração volumétrica limite para a moldagem no sistema utilizado foi de 15% de fibra de curauá.

A produção de compósito laminado com reforço de fibra de curauá é considerado viável, apresentando propriedades físicas e mecânicas sem diferenças significativas do painel sem reforço de fibras. A adição de fibra de curauá colabora na redução da densidade em até 20%. Na resistência à flexão a adição de fibras reduz a tensão de primeira fissura quando comparada com a matriz nos casos de substituição por metacaulim, mas apresenta tensão última superior de 5 a 10% para os compósitos com adição de 5% e 10% de fibras. Para os compósitos laminados sem substituição de cimento as tensões de primeira fissura de 5% e 10% de adição de fibra de curauá foram superiores à matriz.

Adições de 20% de fibra de curauá apresentaram baixa aderência com a argamassa após desforma, sendo dessa forma considerada inviável para aplicação.

A substituição de cimento por metacaulim em 50% prova-se eficaz para a redução de até 12% da densidade do compósito e para o aumento em média de 120% da resistência à flexão dos compósitos laminados a longo prazo, assegurando uma construção sustentável, diminuindo a emissão de CO₂ e consumo de energia.

Dos resultados apresentados conclui-se que utilizando fibras vegetais é possível obter compósitos laminados com resistências compatíveis às da matriz (painel testemunha), além de se obter um produto com densidade baixa e maior deformação de ruptura. É indicada cura de 90 dias para a aplicação de compósitos laminados, devido as propriedades físicas e mecânicas demonstrarem resultados superiores do que aos 28 dias de idade.

Recomenda-se para futuros trabalhos análise de um modelo de produção que garantisse melhor homogeneização das fibras nos painéis e análise de aspectos como: a sua durabilidade, resistência ao fogo, isolamento térmico e acústico, visando a aplicação.

REFERÊNCIAS

AAMR-DAYA, E.; LANGLET, T.; BENAZZOUK, A.; QUÉNEUDEC, M. Feasibility study of lightweight cement composite containing flax by-product particles: physicomechanical properties. **Cement & Concrete Composites**, v. 30, p. 957-963, 2008.

ACHOUR, A.; GHOMARI, F.; BELAYACHI, N. Properties of cementitious mortars reinforced with natural fibers. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 31, n. 17, p. 1938-1962, 2017.

AGGARWAL, L. K.; SINGH, J. Effect of plant fibre extractives on properties of cement. **Cement and Concrete Composites**. v. 12, p.103-108, 1990.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JUNIOR, H. Uso de materiais alternativos à base de fibras vegetais na construção civil: experiência brasileira. In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO 1997 DE MATERIALES FIBRORREFORZADOS, 1, e REUNION PROYECTO PIP VIII.5 CYTED, 3, 1997, Cali. **Proceedings...** Cali: Universidad del Valle, 1997. p. 23-40.

AGOPYAN, V; SAVASTANO JUNIOR, H.; JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Developments on vegetable fibre–cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 5, p. 527-536, 2005.

AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**. 1. ed. São Paulo: Ed. PINI, 2000. 667 p.

ALMEIDA, N. M. B. de. **Estudo estrutural de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de juta**. 2012. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Porto, Portugal, 2012.

ALMEIDA, F. S. de. **Otimização de estruturas de materiais compósitos laminados utilizando algoritmos genéticos**. 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

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

ALMEIDA JUNIOR, J. H. S.; AMICO, S. C.; BOTELHO, E. C.; AMADO, F. D. R. Hybridization effect on the mechanical properties of curaua/glass fiber composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 55, p. 492-497, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 125**: standard terminology relating to concrete and concrete aggregates. ASTM International, West Conshohocken, Estados Unidos, 2003. 5 p.

_____. **ASTM C 618**: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International, West Conshohocken, Estados Unidos, 2015.

_____. **ASTM C 948**: Standard test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of glass-fiber reinforced concrete. ASTM International, West Conshohocken, Estados Unidos, 2001.

_____. **ASTM C 1557**: Standard test method for tensile strength and Young's modulus of fibers,"ASTM International, West Conshohocken, Estados Unidos, 2003.

AMIANDAMHEN, S. O.; IZEKOR, D. N.; BALOGUN, A. O. Performance characteristics of treated kenaf bast fibre reinforced cement composite. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 13, n. 2, p. 156-160, 2016.

ANJOS, M. A. S.; GHAVAMI, K.; BARBOSA, N. P. Uso de polpa de bambu como reforço de matrizes cimentícias. In: INTER AMERICAN CONFERENCE ON NON-CONVENTIONAL MATERIALS AND TECHNOLOGIES IN THE ECO-CONSTRUCTION AND INFRASTRUCTURE, 2003, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: IAC-NOCMAT 2003, 2003. v. 1.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

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

_____. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 15498:** Placa de fibrocimento sem amianto — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

AZIZ, M. A.; PARAMASIVAM, P.; LEE, S. L. Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction. **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 3, n. 2, p. 123-132, 1981.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção 1**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1995. 435 p.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2. ed. London: Taylor & Francis, 2007. 601 p.

BERALDO, A. L.; CARVALHO, J. V. Compósito *Eucalyptus grandis*-cimento Portland. **Scientia Forestalis**, n. 65, p. 150-161, 2004.

BERALDO, A. L.; SAMPAIO, C. A. Compósitos à base de resíduos vegetais e cimento Portland. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2002, p. 85-90.

BERNARDES, M. **Tecnologia construtiva de piso elevado para áreas externas de edifícios**. 2009. 221 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

BERNARDI, S. T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçados com fibra de aramida Kevlar**. 2003, 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BILCATI, G. K. **Produção de painéis de cimento portland reforçados com fibra de curauá (*Ananas erectifolius*)**. 2015. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

BIRICIK, H.; AKOZ, F.; BERKTAY, I.; TULGAR, A. N. Study of pozzolanic properties of wheat straw ash. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 637-643, 1999.

BISFA. **Generic Fibre Names**. Disponível em: <<http://www.bisfa.org/generic-fibre-names/>>. Acesso em: 7 abr. 2017.

BLANKENHOR, P. R.; SILSBEE, M. R.; BLANKENHORN, B. D.; DiCOLA, M.; KESSLER, K. Temperature and moisture effects on selected properties of wood fiber-cement composites. **Cement Concrete Research**, v. 29, p. 737-741, 1999.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in polymer science**, v. 24, n. 2, p. 221-274, 1999.

BRANDT, A. M. Fibre reinforced cement-base (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. **Composites and Structures**, v. 86, p. 3-9, 2008.

BRESCANSIN, J. **Comportamento à fratura de compósitos de matriz cimentícia reforçada com polpa de bambu**. 2003. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

BUCKERIDGE, M. S.; SANTOS, W. D.; SOUZA, A. P. As rotas para o etanol celulósico no Brasil. In: CORTEZ, L.A.B., ED., **BIOETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR: P&D PARA PRODUTIVIDADE SUSTENTABILIDADE**, 2010, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2010. p. 365-380.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. 7. ed., EUA: John Wiley & Sons, 2007.

_____. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589 p.

CARASCHI, J. C.; LEÃO, A. L. Characterization of curaua fiber. **Molecular Crystals and Liquid Crystals**, v. 353, n. 1, p. 149-152, 2000.

CARASEK, H. Argamassas. In: **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**, 2007, v. 2, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. p. 863-804.

CARVALHO, W.; CANILHA, L.; FERRAZ, A.; MILAGRES, A. M. F. Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira. **Química Nova**, v. 32, n. 8, p. 1-5, 2009.

CASTRO, V. G. de. **Espécies da Amazônia na produção de compósitos madeiramento por vibro-compactação**. 2015. 221 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CASTRO, D. O.; RUVOLO-FILHO, A.; FROLLINI, E. Materials prepared from biopolyethylene and curaua fibers: Composites from biomass. **Polymer Testing**, v. 31, n. 7, p. 880-888, 2012.

CASTRO, V.; ARAÚJO, R. D.; PARCHEN, C.; IWAKIRI, S. Avaliação dos efeitos de pré-tratamentos da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cambage no grau de compatibilidade com cimento Portland. **Revista Árvore**, v. 38, n. 5, p. 945-952, 2014.

CECHIN, L. **Análise da viabilidade de produção de painéis de cimento reforçados com biomassa vegetal e escória de alto forno**. 2017. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

CHENG, S.; SHUI, Z.; SUN, T.; YU, R.; ZHANG, G.; DING, S. Effects of fly ash, blast furnace slag and metakaolin on mechanical properties and durability of coral sand concrete. **Applied Clay Science**, v. 141, p. 111-117, 2017.

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

COLLEPARDI, S.; COPPOLA, L.; TROLI, R.; COLLEPARDI, M. Mechanisms of actions of different superplasticizers for high performance concrete. **Special Publication**, v. 186, p. 503-524, 1999.

CORRALES, F.; VILASECA, F.; LLOP, M.; MÉNDEZ, J. A.; MUTJÉ, P. Chemical modification of jute fibers for the production of green-composites. **Journal of Hazardous Materials**, v. 144, p. 730-735, 2007.

COUTTS, R. S. P.; CAMPBELL, M. D. Coupling agents in wood fibre reinforced cement composites. **Composites**, v.10, p. 228-232, 1979.

CZARNECKI, B.; DAY, R. L. Durability of high performance concrete in cold climate and exposure to deicing salts. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE UNDER SEVERE CONDITIONS: Environment and loading, 6., 2010, Mexico. **Proceedings**... Mexico: Merida Yucatan, 2010. p. 683-688.

DNPM. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL. **Sumário Mineral 2015**. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/>. Acesso em: 12 abr. 2017.

ESSABIR, H.; ELKHAOULANI, A.; BENMOUSSA, K.; BOUHFID, R.; ARRAKHIZ, F. Z.; QAISS, A. Dynamic mechanical thermal behavior analysis of doum fibers reinforced polypropylene composites. **Materials & Design**, v. 51, p. 780-788, 2013.

EUROPEAN STANDARD. **EN 934**: Admixtures for concrete, mortar and grout. Common requirements. British Standards Institution, London, 2008.

FAN, M.; NDIKONTAR, M. K.; ZHOU, X.; NGAMVENG, J. H. Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of Wood and cement. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 135-140, 2012.

FENGEL, D. **Wood**: chemistry, ultrastructure, reactions. Berlim: De Gryter, 1989. 601p.

FERREIRA, J. F.; SBRUZZI, D.; BARROS, K. V. G.; MACHADO, I. S.; TAMBOURGI, E. B. Purificação da enzima bromelina presente no curauá (*Ananas erectifolius* LB Smith) variedade roxa, por sistema bifásico aquoso PEG 4000/fosfato de potássio. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, p. 197-202, 2011.

FIBRENAMICS. **Fibras inorgânicas**. Disponível em: <<https://www.web.fibrenamics.com/pt/conhecimento/as-fibras/fibras-inorganicas/>>. Acesso em: 22 jun. 2017.

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

GANGULY, P.; POOLE, W. J. Influence of reinforcement arrangement on the local reinforcement stresses in composite materials. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 52, n. 6, p. 1355-1377, 2004.

GARCEZ, M. R.; GARCEZ, E. O.; MACHADO, A. O.; GATTO, D. A. Cement-wood composites: effects of wood species: particle treatments and mix proportion. **International Journal of Composite Materials**, v. 6, n. 1, p. 1-8, 2016.

GASSAN, J. A study of fibre and interface parameters affecting the fatigue behaviour of natural fibre composites. **Composites part A: applied science and manufacturing**, v. 33, n. 3, p. 369-374, 2002.

GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength selfcompacting concrete**. 2002. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.

GRAM, H. E. **Durability of natural fibres in concrete**. Stockolm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1983. 255 p.

HACHMI, M. H.; CAMPBELL, A. G. Wood-cement chemical relationships, fiber and particleboards bonded with inorganic binders. **Forest Products Research Society**, p. 43-47, 1989.

HACHMI, M.; MOSLEMI, A. A. Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. **Forest Products Journal**, v. 39, n. 6, p. 55-58, 1989.

HACHMI, M. H.; MOSLEMI, A. A; CAMPBELL, A. G. A new technique to classify the compatibility of wood with cement. **Wood Science and Technology**, v. 24, p. 345-354, 1990.

HAMOUDA, T.; SEYAM, A.-F. M.; PETERS, K. Evaluation of the integrity of 3D orthogonal woven composites with embedded polymer optical fibers. **Composites Part B: Engineering**, v. 78, p. 79-85, 2015.

HIRSCHI, T.; WOMBACHER, F. Influence of different superplasticizers on UHPC. In: PROCEEDINGS OF THE 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE, 2008, Germany. **Proceedings...** Kassel: Kassel University Press, p. 77-84, 2008.

HU, X. P.; HSIEH, Y. L. Effects of dehydration on the crystalline structure and strength of developing cotton fibers. **Textile Research Journal**, v. 71, n. 3, p. 231-239, 2001.

IPCNor. Disponível em: < <http://www.ipcnor.com.br/produtos>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

ISAIA, G. C. **Concreto**: Ensino, Pesquisa e Realizações. v.2. São Paulo: IBRACON, 2005. 1600 p.

ITAMBÉ. **Relatório de ensaios de cimento CP V – ARI**. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/?pro=371&chave=2017-4>>. Acesso em: 18 mai. 2017.

IZQUIERDO, I. S. **Uso da fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2011, 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

JBALLI, S.; MIRAQUI, I.; HASSIS, H. Long-unidirectional palm and sisal fibers reinforced composite: an experimental investigation. **Journal of Natural Fiber**, v. 14, n. 3, p. 368-378, 2016.

JO, B. W.; CHAKRABORTY, S.; YOON, K. W. A hypothetical model based on effectiveness of combined alkali and polymer latex modified jute fibre in controlling the setting and hydration behaviour of cement. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 1-9, 2014.

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

KARADE, S. R. Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1323-1330, 2010.

KARADE, S. R.; IRLE, M.; MAHER, K.. Influence of granule properties and concentration on cork-cement compatibility. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 64, n. 4, p. 281-286, 2006.

KARBHARI, V. M.; SEIBLE, F. Fiber reinforced composites–advanced materials for the renewal of civil infrastructure. **Applied Composite Materials**, v. 7, n. 2, p. 95-124, 2000.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. O cimento Portland. In: **CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 295-322.

LEÃO, A. L.; ROWELL, R.; TAVARES, N. Applications of natural fibers in automotive industry in Brazil thermoforming process. **Science and Technology of Polymers and Advanced Materials**, New York. P. 755-61, 1998. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/37288>>. Acesso em: 19 abr. 2017.

LEÃO, A. L.; SARTOR, S. M.; CARASCHI, J. C. Natural fibers based composites–technical and social issues. **Molecular Crystals and Liquid Crystals**, v. 448, n. 1, p. 161-177, 2006.

LENGOWSKI, E. C.; MUNIZ, G. I. B. D.; NISGOSKI, S.; MAGALHÃES, W. L. E. Avaliação de métodos de obtenção de celulose com diferentes graus de cristalinidade. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 98, p. 185-194, 2013.

LIMA, A. J. M. de. **Utilização de resíduo de *Pinus SPP* e materiais cimentícios alternativos na produção de blocos para alvenaria estrutural**. 2009. 282 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

LIMA, P. R. L. **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal**. 2004. 263 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

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

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; NAGAHAMA, K. J.; FAIRBAIRN, E. M. Caracterização mecânica de laminados cimentícios esbeltos reforçados com fibras de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 6, p. 644-651, 2007.

LIU, W.; XIE, T.; QIU, R.; FAN, M. N-methylol acrylamide grafting bamboo fibers and their composites **Composites Science and Technology**, v. 117, p. 100-106, 2015.

MA, L. F.; YAMAUCHI, H.; PULIDO, O.R.; TAMURA, Y.; SASAKI, H.; KAWAI, S. Manufacture of cement- bonded boards from wood and other lignocellulosic materials: relationships between cement hydration and mechanical properties of cement bonded boards. In: WOOD-CEMENT COMPOSITES IN THE ASIA-PACIFIC REGION, 2000, Australia. **Proceedings...** Australia: ACIAR, 2000. p. 13-23.

MALLICK, P. K. **Composites engineering handbook**.1. ed. USA: CRC Press, 1997. 1264 p.

MARABEZI, K. **Estudo sistemático das reações envolvidas na determinação dos teores de lignina e holocelulose em amostras de bagaço e palha de cana-de-açúcar**. 2009. 142 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Físico-Química) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MARINELLI, A. L.; MONTEIRO, M. R.; AMBRÓSIO, J. D.; BRANCIFORTI, M. C.; KOBAYASHI, M.; NOBRE, A. D. 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.

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

MATOSKI, A. **Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira**. 2005. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MC-Bauchemie Brasil. **MC-POWERFLOW 3100**. Disponível em: <<http://www.mc-bauchemie.com.br/produtos/mc-para-industria-do-concreto/aditivos-para-concreto-e-argamassa/superplastificantes-pce/mc-powerflow-3100/#.WXD7e4jyuUk>>. Acesso em: 3 abr. 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MELO FILHO, J. de A. **Desenvolvimento e caracterização de laminados cimentícios reforçados com fibras longas de sisal**. 2005. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

_____. **Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal**. 2012. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MERLINI, C.; SOLDI, V.; BARRA, G. M. O. Influence of fiber surface treatment and length on physico-chemical properties of short random banana fiber-reinforced castor oil polyurethane composites. **Polymer Testing**, v. 30, n. 8, p. 833-840, 2011.

METACAULIM DO BRASIL. Disponível em: <<http://www.metacaulim.com.br>>. Acesso em: 7 mar. 2017.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. **Natural fibers, biopolymers, and biocomposites**. 1. ed. New York: Taylor & Francis Group, 2005. 896 p.

_____. Sustainable biocomposites from renewable resources: Opportunities and challenges in the green materials world. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 10, p. 19-26, 2002.

MOHR, B. J. **Durability of pulp fiber-cement composites**. 2005. 227 f. Tese (Doctor of Philosophy in Civil Engineering) – Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2005.

MONTEIRO, S. N.; AQUINO, R. C. M. P.; LOPES, P. D.; CARVALHO, E. A.; D'ALMEIDA, J. R. Comportamento mecânico e características estruturais de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas e alinhadas de curauá. **Revista Matéria**, v. 11, n. 3, p. 197-203, 2006.

MORAIS, S. A. L.; NASCIMENTO, E. A.; MELO, D. C. Análise da madeira de Pinus ooca dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, 2005.

NAJIMI, M.; SOBHANI, J.; AHMADI, B.; SHEKARCHI, M. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 1023-1033, 2012.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 1. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2006. 336 p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Traduzido por: Ruy Alberto Cremonini. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

OKINO, E. Y. A.; SOUZA, M. R. de; SANTANA, M. A. E.; ALVES, M. V. de S.; SOUSA, M. E. de; TEIXEIRA, D. E. Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, p. 729-734, 2004.

_____. Physico-mechanical properties and decay resistance of Cupressus spp. cement-bonded particleboard. **Cement and Concrete Composites**. v. 27, n. 3, p. 333-338, 2005.

OLIVEIRA, I. R. C. **Propriedades mecânicas, físicas e químicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras longas de juta e de malva**. 2013. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.

PICANÇO, M. de S.; GHAVAMI, K. Comportamento à compressão de argamassas reforçadas com fibras vegetais da Amazônia. **Revista Escola de Minas**, v. 61, n. 1, 2008.

PIMENTEL, L.; BERALDO, A. L.; SAVASTANO JÚNIOR, H. Durabilidade de compósito biomassa vegetal-cimento modificado por polímero. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 2, p. 344-353, 2006. Disponível em: <<http://ref.scielo.org/zrbc6y>>. Acesso em: 1 mai. 2017.

POLARI FILHO, R. S.; MELO, A. B. de; BARBOSA; N. P. A reciclagem de resíduos da indústria de calçados (EVA) na execução de painéis de vedação na construção civil: aplicação de desempenho. In: Encontro Temático de Meio Ambiente e

Educação Ambiental na UFPB, 2., v. 9, 2003, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2003.

PONGPRAYOON, T.; YANUMET, N.; SANGTHONG, S. Surface behavior and film formation analysis of sisal fiber coated by poly (methyl methacrylate) ultrathin film. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**, v. 320, p. 130-137, 2008.

QUININO, U. C. de M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 2015. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RILEM THECNICAL COMMITIEE 49 TFR. Testing methods for fibre reinforced cement-based composites. **Matériaux et Constructions**, v.17, n.102, 1984.

ROCHA, G. G. N.; VASCONCELOS, W.L. Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade. **Concreto e Construções**, n. 42, p. 98-116, 2006.

RODRIGUES, F. de A. **Estudo da influência de diferentes tratamentos (fibra/matriz) nas propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com fibra de malva**. 2015. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2015.

ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. 2. ed. Madison: CRC Press, 2012. 686 p.

SANCHEZ, E. M. S.; CAVANI, C. S.; LEAL, C. V.; SANCHEZ, C. G. Compósito de resina de poliéster insaturado com bagaço de cana-de-açúcar: influência do tratamento das fibras nas propriedades. **Polímeros**, v. 20, n. 3, p. 194-200, 2010.

SANTOS, S. F. dos; TONOLI, G. H. D.; MEJIA, J. E. B.; FIORELLI, J.; SAVASTANO JUNIOR, H. Non-conventional cement-based composites reinforced with vegetable fibers: a review of strategies to improve durability. **Materiales de Construcción**, v. 65, n. 317, 2015. Disponível em: <<http://http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewArticle/1678/2034>>. Acesso em: 19 abr. 2017.

SARZALEJO, A. G.; ROSSI, B.; PERRI, G.; WINTERBERG, R.; ARISTEGUIETA, R. E. P. **Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto**. São Paulo: Maccaferri, 2008, 247 p.

SAVASTANO JUNIOR, H. **Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo**. 2000. 144 f. Tese (Livre-Docência Departamento de Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SEFFF, L.; FOLGUERAS, M. V.; HOTZA, D. Hidratação do cimento CP V ARI-RS: Influência da água nas reações de hidratação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 49., 2005, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2005.

SILVA, A. C. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose**. 2002. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SIMATUPANG, M. H.; LANGE, H.; KASIM, A.; SEDDING, N. Influence of wood species on the setting of cement and gypsum. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FIBER AND PARTICLEBOARD BONDED WITH INORGANIC BINDER, v. 1, 1988, Spolane. **Proceedings...** Moscow: Idaho University, 1988. p. 33-42.

SIQUEIRA, J. E. L. de. **Utilização de fibras naturais e sintéticas em argamassas de revestimento de alvenaria: estudo comparativo de desempenho**. 2006. 217 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SMOOK, G. A. **Handbook for pulp and paper technologists**. 2. ed. Vancouver: Angus Wilde Publications, 1992.

SOLTAN, D. G.; NEVES, P. das; OLVERA, A.; SAVASTANO JUNIOR, H. S.; LI, V. C. Introducing a curauá fiber reinforced cement-based composite with strain-hardening behavior. **Industrial Crops and Products**, v. 103, p. 1-12, 2017.

STAIGER, M. P., TUCKER, N. Natural fibre composites in structural applications. In: PICKERING, K. **Properties and performance of natural fibre composites**. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2008. p. 269-300.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI T 204 cm**: Solvent extractives of wood and pulp. 1997.

_____. **TAPPI T 207 cm**: Water solubility of wood and pulp. 1999.

_____. **TAPPI T 211 om**: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C. 2002.

_____. **TAPPI T 212 om**: One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp. 2002.

_____. **TAPPI T 222 om**: Acid-insoluble lignin in wood and pulp. 2006.

_____. **TAPPI T 252 om**: pH and electrical conductivity of hot water extracts of pulp, paper, and paperboard. 2002.

_____. **TAPPI T 257 cm**: Sampling and preparing wood for analysis. 2002.

_____. **TAPPI T 258 om**: Basic density and moisture content of pulpwood. 2002.

_____. **TAPPI T 264 cm**: Preparation of wood for chemical analysis. 1997.

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

TOMCZAK, F.; SATYANARAYANA, K. G.; SYDENSTRICKER, T. H. D. Studies on lignocellulosic fibers of brazil: part iii—morphology and properties of brazilian curauá fibers. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 10, p. 2227-2236, 2007.

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

TORKAMAN, J.; ASHORI, A.; MOMTAZI, A. S. Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 432-436, 2014.

VENTURA, A. M. F. M. Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 21, n. 3-4, p. 10-19, 2009.

VICENTINI, A. H.; ASSUNÇÃO, C. C.; AKASAKI, J. L. Estudo do metacaulim para obtenção e produção de concreto autoadensável (CAA). **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 12, n. 4, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.17271/1980082712420161462>>. Acesso em: 11 mai. 2017.

WEI, K.; LV, C.; CHEN, M.; ZHOU, X.; DAI, Z.; SHEN, D. Development and performance evaluation of a new thermal insulation material from rice straw using high frequency hot-pressing. **Energy and Buildings**, v. 87, p. 116-122, 2015.

WEI, J.; MEYER, C. Sisal fiber-reinforced cement composite with Portland cement substitution by a combination of metakaolin and nanoclay. **Journal of Materials Science**, v. 49, n. 21, p. 7604-7619, 2014.

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

WORK, W. J.; HORIE, K.; HESS, M.; STEPTO, R. F. T. Definition of terms related to polymer blends, composites, and multiphase polymeric materials. **Pure and applied chemistry, USA**, v. 76, n. 11, p. 1985-2007, 2004.

YAN, L.; CHOUW, N. Sustainable concrete and structures with natural fibre reinforcements. In: INFRASTRUCTURE CORROSION AND DURABILITY - a sustainability study, 2014, USA. **Proceedings...** Foster City: OMICS Group eBooks, 2014.

ZAH, R.; HISCHIER, R.; LEÃO, A. L.; BRAUN, I. Curauá fibers in the automobile industry—a sustainability assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 11, p. 1032-1040, 2007.

ZAMPIERI, V. A. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas**. 1989. 191 f. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

ZUCCO, L. L. **Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz**. 1999. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

APÊNDICE A - ANOVA

ANOVA para mini abatimento dos compósitos com teor de 0% e 4% de cloreto de cálcio com 2% de superplastificante

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	1	6,125	6,125	2,115107914	0,196084263
Resíduos	6	17,375	2,895833333		

ANOVA para mini abatimento dos compósitos com teor de 0% e 4% de cloreto de cálcio com 2,5% de superplastificante

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	1	21,125	21,125	1,323759791	0,293699277
Resíduos	6	95,75	15,95833333		

ANOVA para mini abatimento dos compósitos com teor de 0% e 4% de cloreto de cálcio com 3% de superplastificante

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	1	6,125	6,125	0,202200825	0,66873847
Resíduos	6	181,75	30,29166667		

ANOVA para mini abatimento dos compósitos com teores de 2, 2,5 e 3% de superplastificante sem adição de cloreto de cálcio

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	2	84106,125	42053,0625	2063,250767	1,04644E-12
Resíduos	9	183,4375	20,38194444		

ANOVA para mini abatimento dos compósitos com teores de 2, 2,5 e 3% de superplastificante com adição de 4% de cloreto de cálcio

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	2	82087,79167	41043,89583	3314,818284	1,24376E-13
Resíduos	9	111,4375	12,38194444		

ANOVA para a resistência à compressão dos compósitos com teor de 0% e 4% de cloreto de cálcio com 2% de superplastificante

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	1	290,84449	290,84449	41,6605656	0,000197368
Resíduos	8	55,85032	6,98129		

ANOVA para a resistência à compressão dos compósitos com teor de 0% e 4% de cloreto de cálcio com 2,5% de superplastificante

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	1	180,88009	180,88009	2,619635248	0,144209335
Resíduos	8	552,38252	69,047815		

ANOVA para a resistência à compressão dos compósitos com teor de 0% e 4% de cloreto de cálcio com 3% de superplastificante

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	1	292,46464	292,46464	23,56136564	0,001265399
Resíduos	8	99,30312	12,41289		

ANOVA para a resistência à compressão dos compósitos com teores de 2, 2,5 e 3% de superplastificante sem adição de cloreto de cálcio

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	2	0,917053333	0,458526667	0,020474913	0,979767425
Resíduos	12	268,73472	22,39456		

ANOVA para a resistência à compressão dos compósitos com teores de 2, 2,5 e 3% de superplastificante com adição de 4% cloreto de cálcio

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	2	15,21025333	7,605126667	0,207979175	0,815090805
Resíduos	12	438,80124	36,56677		

ANOVA para a temperatura máxima dos compósitos com diferentes tratamentos

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	4	989,7106667	247,4276667	25,95939708	2,90875E-05
Resíduos	10	95,31333333	9,531333333		

ANOVA para o índice de inibição dos compósitos com diferentes tratamentos

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	3	354,0631211	118,0210404	16,95890414	0,00079189
Resíduos	8	55,6738994	6,959237425		

ANOVA para a densidade dos compósitos laminados aos 7 dias de idade

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	9	1,557819073	0,173091008	114,6570321	1,07542E-25
Resíduos	40	0,060385658	0,001509641		

ANOVA para a densidade dos compósitos laminados aos 28 dias de idade

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	9	1,123012373	0,124779153	67,90292286	2,11272E-21
Resíduos	40	0,073504437	0,001837611		

ANOVA para a densidade dos compósitos laminados aos 90 dias de idade

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	9	1,241395767	0,137932863	97,67315237	2,28332E-24
Resíduos	40	0,056487524	0,001412188		

ANOVA para a absorção de água dos compósitos laminados aos 7 dias de idade

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	9	1129,414523	125,4905026	53,84999842	1,50598E-19
Resíduos	40	93,21486073	2,330371518		

ANOVA para a absorção de água dos compósitos laminados aos 28 dias de idade

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	9	1334,457075	148,2730084	44,19131708	5,33876E-18
Resíduos	40	134,210083	3,355252076		

ANOVA para a absorção de água dos compósitos laminados aos 90 dias de idade

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	9	709,3590933	78,81767703	39,37167289	4,14825E-17
Resíduos	40	80,07551749	2,001887937		

ANOVA para a porosidade aparente dos compósitos laminados aos 7 dias de idade

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	9	1072,504257	119,1671396	38,75629184	5,47525E-17
Resíduos	40	122,9912708	3,074781771		

ANOVA para a porosidade aparente dos compósitos laminados aos 28 dias de idade

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	9	1576,39081	175,1545344	35,96658795	2,02673E-16
Resíduos	40	194,7969429	4,869923572		

ANOVA para a porosidade aparente dos compósitos laminados aos 90 dias de idade

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	9	851,4605317	94,60672574	28,07407621	1,41393E-14
Resíduos	40	134,7958523	3,369896307		

ANOVA para a tensão de primeira fissura dos compósitos laminados aos 7 dias de idade

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	9	500,6396793	55,62663104	17,61938566	2,55729E-11
Resíduos	40	126,2850637	3,157126593		

ANOVA para a tensão de primeira fissura dos compósitos laminados aos 28 dias de idade

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	9	784,4864687	87,16516319	19,28257318	6,33257E-12
Resíduos	40	180,8164551	4,520411377		

ANOVA para a tensão de primeira fissura dos compósitos laminados aos 90 dias de idade

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	9	704,7207459	78,3023051	8,028266922	1,13954E-06
Resíduos	40	390,133043	9,753326075		

ANOVA para a tensão última dos compósitos laminados aos 7 dias de idade

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	7	670,3510197	95,76443139	17,00191061	3,77993E-09
Resíduos	32	180,2422018	5,632568807		

ANOVA para a tensão última dos compósitos laminados aos 28 dias de idade

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	7	579,6277858	82,8039694	32,54324308	8,22314E-13
Resíduos	32	81,421726	2,544428938		

ANOVA para a tensão última dos compósitos laminados aos 90 dias de idade

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	7	747,6344837	106,8049262	12,117202	1,9028E-07
Resíduos	32	282,0583201	8,814322503		