



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

JERÔNIMO COURA SOBRINHO

**FIBROCIMENTOS COM REFORÇO HÍBRIDO DE MALHA DE JUTA E POLPAS
CELULÓSICAS: EFEITOS DO TRATAMENTO ALCALINO DA MALHA**

BELO HORIZONTE

2019

JERÔNIMO COURA SOBRINHO
FIBROCIMENTOS COM REFORÇO HÍBRIDO DE MALHA DE JUTA E POLPAS
CELULÓSICAS: EFEITOS DO TRATAMENTO ALCALINO DA MALHA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues
Coorientadora: Prof^a Dr^a Maria Cristina Ramos de Carvalho

BELO HORIZONTE

2019

C858f Coura-Sobrinho, Jerônimo
Fibrocimentos com reforço híbrido de malha de juta e polpas
celulósicas: efeitos do tratamento alcalino da malha / Jerônimo
Coura-Sobrinho. – 2019.
70 f.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Civil.

Orientador: Conrado de Souza Rodrigues.

Coorientadora: Maria Cristina Ramos de Carvalho.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Fibrocimento (Materiais de construção) – Teses. 2. Fibras
vegetais – Teses. 3. Juta – Indústria – Tratamento – Teses.
4. Celulose – Teses. I. Rodrigues, Conrado de Souza. II. Carvalho,
Maria Cristina Ramos de. III. Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil.
IV. Título.

CDD 691

JERÔNIMO COURA SOBRINHO

**FIBROCIMENTOS COM REFORÇO HÍBRIDO DE MALHA DE
JUTA E POLPAS CELULÓSICAS: EFEITOS DO
TRATAMENTO ALCALINO DA MALHA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como
requisito parcial para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil



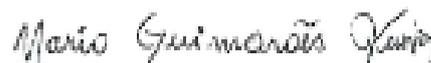
Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues, D.Sc.
Orientador
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Prof. Dr. Maria Cristina Ramos de Carvalho, D.Sc.
Coorientadora
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Prof. Dr. Júnia Nunes de Paula, D.Sc.
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Prof. Dr. Mário Guimarães Júnior, D.Sc.
Departamento de Eletromecânica, CEFET-MG

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

aos colegas do curso de mestrado em Engenharia Civil do CEFET-MG, em especial ao Thiago Vieira, pela parceria e amizade; à Camila Lacerda, pela ajuda inestimável em todas as fases da pesquisa e, sobretudo, na formatação e na leitura cuidadosa do texto; à Tathiana Caetano, pelas inúmeras vezes em que me ajudou a desvendar os mistérios das novidades tecnológicas; e à Renata Jacóe, pelos momentos de companheirismo e amizade e sobretudo de generosidade ao fazer a análise estatística dos dados dos ensaios mecânicos. Vocês são demais!

à Liliane Oliveira Neves, pela parceria acadêmica, com as análises estatísticas dos *outliers*, a formatação dos procedimentos metodológicos e em tantas outras frentes de trabalho;

ao Prof. Conrado de Souza Rodrigues, pela competência na orientação e pelo entusiasmo com a área da pesquisa;

à Prof^a Maria Cristina Ramos de Carvalho, pelas sugestões precisas;

à prof^a Simone Queiroz da Silveira Hirashima, pelo incentivo incondicional;

ao Prof. Augusto Bezerra, pela realização das imagens (MEV) e pelas sugestões de trabalhos futuros;

aos Professores Luís Eustáquio Moreira, Júnia Nunes de Paula e Mário Guimarães Júnior, pelas contribuições na qualificação e por terem aceito participar da defesa.

RESUMO

A proibição do uso de amianto como reforço de fibrocimento tem motivado a pesquisas sobre fibras alternativas em compósitos cimentícios. Os fibrocimentos com reforço de fibras naturais são considerados *eco-friendly* e de baixo custo; no entanto, sua produção requer cuidados especiais. As fibras naturais mais testadas em fibrocimentos são oriundas de sisal, juta, curauá, algodão, linhaça, cânhamo, rami, além do bambu, eucalipto e pinus. A composição química das fibras naturais de origem vegetal (celulose, hemiceluloses e lignina), além de ser responsável pela aderência com a matriz, é também suscetível aos ataques alcalinos, que provocam a degradação do reforço e a consequente diminuição da durabilidade do compósito. Este trabalho teve o objetivo de analisar os efeitos do uso de reforço vegetal híbrido, constituído por malha tramada de juta e polpas celulósicas, no desempenho mecânico de fibrocimentos. A malha de juta recebeu três tipos de pré-tratamento alcalino (tratamento A, B e C). Dois grupos de amostras foram moldados: um com e outro sem substituição parcial dos aglomerante (15%) por cinza de casca de arroz. Para cada um dos grupos, foram moldadas amostras cujas malhas de juta receberam três tipos de pré-tratamento. As amostras dos dois grupos continham polpas de pinus (8% de seu volume). Foram realizados testes de flexão para cálculo do Módulo de Ruptura, do Módulo de Elasticidade e da Energia Específica. Além disso, foram utilizadas as técnicas de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para caracterização da malha de juta e para avaliar os efeitos do tratamento alcalino. Os resultados dos ensaios mecânicos foram analisados por meio de software de estatística. Como resultado, observou-se que (a) os fibrocimentos apresentaram comportamento *strain hardening* em função do reforço híbrido e da presença de cinza de casca de arroz na matriz, (b) houve melhoria na tenacidade dos fibrocimentos cujas malhas tramadas de juta receberam pré-tratamentos alcalinos.

Palavras-chave: fibrocimento sem amianto; fibrocimento com fibra vegetal; tratamento alcalino de malha de juta; polpas celulósicas em fibrocimentos.

ABSTRACT

FIBRECEMENTS WITH HYBRID REINFORCEMENT OF JUTE MESH AND CELLULOSIC PULPS: EFFECTS OF ALKALINE MESH TREATMENT.

The prohibition of the use of asbestos as fibre cement reinforcement has motivated the research on alternative fibers in cementitious composites. The fibre cements with reinforcement of natural fibers are considered eco-friendly and inexpensive; however, their production requires special care. The most tested natural fibers in fibrecelements are sisal, jute, curauá, cotton, flax, hemp, rami, besides bamboo and plants such as eucalyptus and pinus. The chemical composition of natural fibers of vegetal origin (cellulose, hemicelluloses and lignin), besides being responsible for adherence to the matrix, is also susceptible to alkaline attacks, which cause the degradation of the reinforcement and the consequent decrease of the durability of the composite. The objective of this work was to analyze the effects of the use of hybrid plant reinforcement consisting of jute mesh and cellulosic pulps in the mechanical performance of the fibrecement. The jute mesh received three different types of alkaline pretreatment (A, B and C). Two groups of samples were molded: one with and the other without partial substitution of the agglomerant (15%) by rice husk ash. For each of the groups, the samples were molded with the three types of alkaline pre-treatment mentioned. The samples of the two groups contained pinus pulps (8% of their volume). Flexion tests were performed to calculate the modulus of rupture, the modulus of elasticity and specific energy. In addition, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Scanning Electron Microscopy (SEM) techniques were used to characterize the jute mesh and to evaluate the effects of alkaline treatment on the mesh. The results of the mechanical tests were analyzed using statistical software. As a result, it was observed that (a) the fibrecelements presented strain hardening behavior as a function of the hybrid reinforcement and the presence of rice husk ash in the matrix, (b) there was a positive impact on the toughness of the fibrecelements that received alkaline pretreatments in their jute mesh.

Key-words: asbestos-free fibrecement; Fibrecement with vegetable fiber; alkaline treatment of jute mesh; cellulosic pulps in fibrecelements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de <i>Hatschek</i> para fabricação de fibrocimentos.....	13
Figura 2 - Classificação de fibras.	14
Figura 3 - Exemplos de fibras naturais.	14
Figura 4 - Planta de juta <i>in natura</i> (A), malha tramada (B) e polpas de pinus (C).	15
Figura 5 - Delineamento metodológico da pesquisa.....	16
Figura 6 - Procedimentos metodológicos da pesquisa.	26
Figura 7 - Materiais utilizados na composição das amostras.	27
Figura 8 - Amostras típicas sem e com cinza de casca de arroz.....	28
Figura 9 - Os três tipos de pré-tratamento alcalino da malha de juta	30
Figura 10 - As malhas tramadas de juta - antes (A) e após (B, C) os tratamentos alcalinos.	30
Figura 11 - Equipamentos utilizados na moldagem das amostras.	31
Figura 12 - Moldagem das amostras de fibrocimento.....	31
Figura 13 - Retirada do excesso de água das amostras de fibrocimento.....	32
Figura 14 - Amostras de fibrocimentos moldadas.	32
Figura 15 - Ensaio de flexão em 3 pontos.	33
Figura 16 - Curva de carregamento e parâmetros mecânicos.....	33
Figura 17 - Curvas de tensão x deformação de todas as amostras.	36
Figura 18 - MOR por tipo de matriz e de pré-tratamento da malha tramada de juta.	38
Figura 19 - Análise estatística do MOR das amostras com pré-tratamentos alcalinos A e B.	40
Figura 20 - Análise Estatística do MOR das amostras com pré-tratamentos alcalinos B e C	41
Figura 21 - MOE por tipo de matriz e de pré-tratamento alcalino.....	43
Figura 22 - Análise Estatística do MOE das amostras com pré-tratamentos alcalinos A e B.....	44
Figura 23 - Análise Estatística do MOE das amostras com pré-tratamentos alcalinos B e C.	45
Figura 24 - <i>Spe. En.</i> por tipo de matriz e de pré-tratamento alcalino.	47

Figura 25 - Análise Estatística da <i>Spe. En.</i> das amostras com tratamentos alcalinos A e B.	48
Figura 26 - Análise Estatística da Energia Específica das amostras com tratamentos alcalinos B e C.....	49
Figura 27 - <i>Spe. En.</i> (KN/m ²) de fibrocimentos com reforço celulósico encontrados na literatura.	52
Figura 28 - Exemplos de amostras com comportamento <i>strain hardening</i>	52
Figura 29 - Valores de MOR (MPa) de fibrocimentos com reforço celulósico encontrados na literatura.....	53
Figura 30 - Difratoograma dos quatro tipos de amostras de fibras, conforme tratamentos alcalinos.	54
Figura 31 - Difratoogramas sobrepostos das amostras com 2θ entre 5° e 30°.	55
Figura 32 - Transmitância das amostras com diferentes tratamentos alcalinos. .	56
Figura 33 - Transmitância das amostras – comprimento de onda entre 800 e 1800 cm ⁻¹	57
Figura 34 - Imagens das malhas de juta obtidas por MEV e ampliadas 100X, para cada tipo de tratamento alcalino.....	59
Figura 35 - Imagens das malhas obtidas por MEV e ampliadas 1000x, para cada tipo de tratamento alcalino.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção mundial de fibras.	22
Tabela 2 - Composição química dos constituintes da matriz do fibrocimento.....	27
Tabela 3 - Características físicas dos constituintes da matriz.....	28
Tabela 4 - Composição das amostras.	28
Tabela 5 - Quantidade e tipo de amostras moldadas.	29
Tabela 6 - Quantidade de amostras após exclusão das <i>outliers</i>	35
Tabela 7 - Parâmetros mecânicos das amostras.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCA - Cinza de Casca de Arroz

CCCA - Com Cinza de Casca de Arroz

CRF - Compósitos Reforçados com Fibras

DRX - Difractometria de Raios X

FTIR - Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier

h - Hora(s)

IR - Infravermelho (ou *Infra-red*)

m - Metro

MEV - Microscopia eletrônica de varredura

MOE - Módulo de Elasticidade

MOR - Módulo de Ruptura

m² - Metro quadrado

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

PAN - Poliacrilonitrilo

PP - Polipropileno

PVA - Álcool polivinil

RILEM- *Réunion Internationale de Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les matériaux et les constructions*

SCCA - Sem Cinza de Casca de Arroz

WHO - *World Health Organization*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	PERGUNTA DE PESQUISA.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	16
2	REVISÃO TEÓRICA	18
2.1	FIBROCIMENTO SEM ASBESTO: A BUSCA POR ALTERNATIVAS VIÁVEIS	18
2.2	ADIÇÕES MINERAIS EM FIBROCIMENTOS	20
2.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3	METODOLOGIA	26
3.1	PRÉ-TRATAMENTO DAS MALHAS DE JUTA.....	29
3.2	MOLDAGEM DAS AMOSTRAS.....	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
4.1	ENSAIOS DE FLEXÃO	35
4.1.1	Módulo de Ruptura.....	38
4.1.2	Módulo de Elasticidade	43
4.1.3	Energia Específica	47
4.1.4	Ensaio mecânicos	50
4.2	DIFRATOGRAMA DE RAIOS X E INFRAVERMELHO	53
4.2.1	DRX.....	54
4.2.2	FTIR	56
4.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	58
5	CONCLUSÕES	62
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

O amianto, também conhecido como asbesto, é um mineral cujas fibras macias e flexíveis são resistentes ao calor, à eletricidade e à corrosão. Por essas características, seu uso foi consagrado no mundo, ao longo do século XX, em função também de seu relativo baixo custo de produção. Existem dois tipos de amianto: o crisotila (asbesto branco) e o anfibólio (asbesto azul), sendo o primeiro o único utilizado comercialmente no Brasil. Atualmente, em função de recomendações da *World Health Organization* (WHO), diversos países/regiões baniram o uso desse mineral¹. Para a WHO, o terceiro Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que está relacionado à Saúde e ao Bem-Estar, encontra-se diretamente vinculado a outros 13 objetivos. Portanto, a saúde dos seres vivos está intimamente relacionada à questão da sustentabilidade do planeta. Nesse sentido, a busca pela substituição do amianto por fibras naturais alinha-se com os ODS previstos para serem atingidos até o ano de 2030.

Apesar da ampla divulgação acerca dos males (diversos tipos de câncer) provocados direta ou indiretamente pelo uso do amianto, cerca de 125 milhões de pessoas pelo mundo estão expostas a ele em locais de trabalho, sendo milhares de mortes anuais atribuídas à exposição ao amianto em ambiente familiar.

A tecnologia de fabricação do fibrocimento com reforço de amianto foi desenvolvida no final do século XIX pelo austríaco Ludwig Hatschek, processo conhecido como *Hatschek* (Figura 1). Baseado na produção de papel, esse processo consiste na filtragem de uma suspensão de cimento bem diluída em um cilindro rotativo, possibilitando a fabricação de placas cimentícias delgadas, com baixo consumo de materiais. Em função de os asbestos provocarem efeitos nocivos à saúde humana, em especial o câncer de laringe, novos materiais têm sido investigados, para substituí-lo. Embora até hoje nenhum outro material tenha apresentado todas as qualidades do amianto, sobretudo quanto à durabilidade, pesquisas na área já sinalizam avanços (COUTTS, 2005). Dentre os substitutos citam-se as fibras de vidro, as sintéticas e, em alguns casos, as fibras vegetais ou celulósicas.

¹38 na Europa, 9 no Oriente Médio; 4 na Ásia, 8 na África, 5 na América Latina (incluindo o Brasil), 3 na Oceania. (<https://www.archdaily.com/899858/which-countries-have-banned-asbestos> visitado dia 17/03/2019.)

Figura 1 - Sistema de *Hatschek* para fabricação de fibrocimentos.

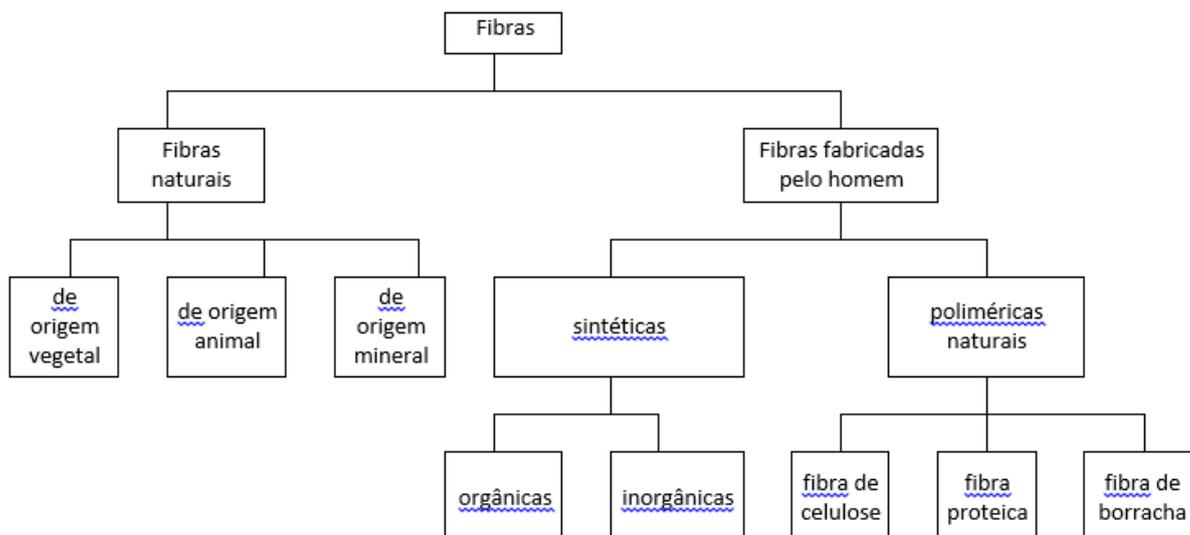


Fonte: Ag. USP (<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/>).

Mesmo considerando o avanço atual na tecnologia de produção de fibrocimentos sem amianto, os custos atuais de sua produção são relativamente altos. As fibras que vêm sendo utilizadas em compósitos e que se encontram disponíveis no mercado são oriundas de fontes não renováveis, fato que abre espaço para a utilização de fibras vegetais ou celulósicas como reforço fibrocimentos, por serem consideradas leves e sobretudo *eco-friendly*.

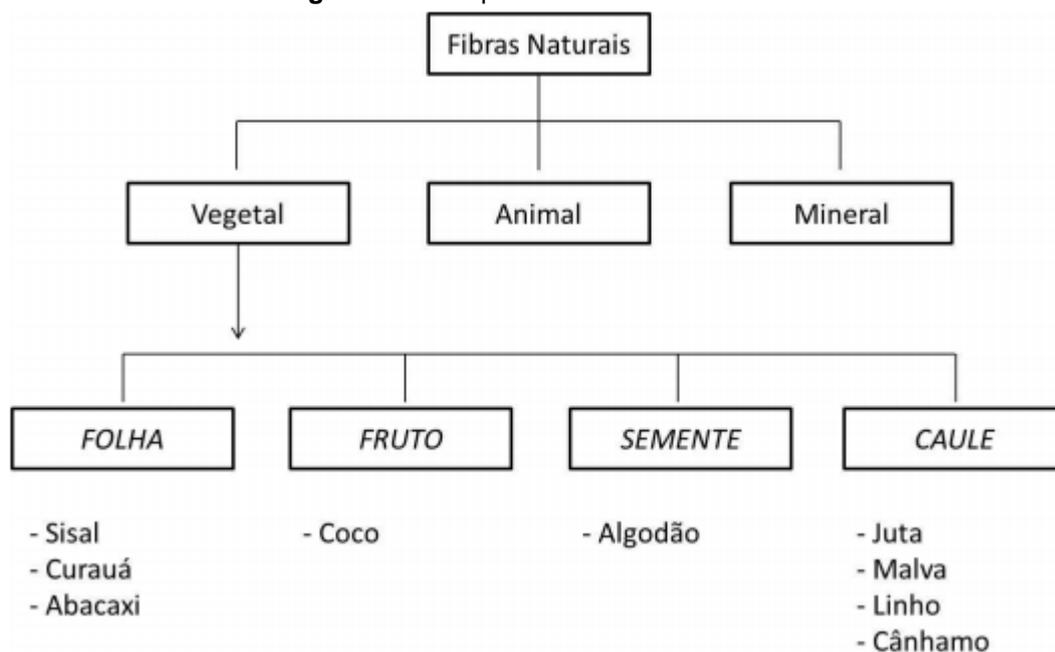
Os reforços de compósitos à base de cimento servem para aumentar a tenacidade que, em última instância, é uma medida da capacidade de deformação do material. Essa característica é desejável em materiais cimentícios para uso em construções, tanto no curto quanto no longo prazo. No curto prazo, a tenacidade é necessária para acomodar deformações do processo de hidratação, transporte e manuseio. No longo prazo, e em condições de serviço, muitos processos construtivos submetem os materiais a intempéries, e isso requer que os fibrocimentos mantenham a capacidade de deformação como, por exemplo, as variações dimensionais devidas à variação da temperatura e da umidade. Nestes casos, as deformações, se não acomodadas pelos materiais, causam fissuração, comprometendo sua durabilidade e aplicação.

As fibras utilizadas como reforço de compósitos cimentícios podem ser de diversos tipos: fibras minerais (a exemplo do amianto); fibras de vidro; fibras de aço; fibras sintéticas ou poliméricas; fibras de carbono e as fibras vegetais (Figura 2).

Figura 2 - Classificação de fibras.

Fonte: Cooke (1989) apud (JUSOH, 2008), adaptada.

De uma forma mais detalhada, apresentamos na Figura 3 a classificação específica das fibras naturais, em que são apresentados alguns exemplos de fonte dessas fibras.

Figura 3 - Exemplos de fibras naturais.

Fonte: SANTOS, 2015

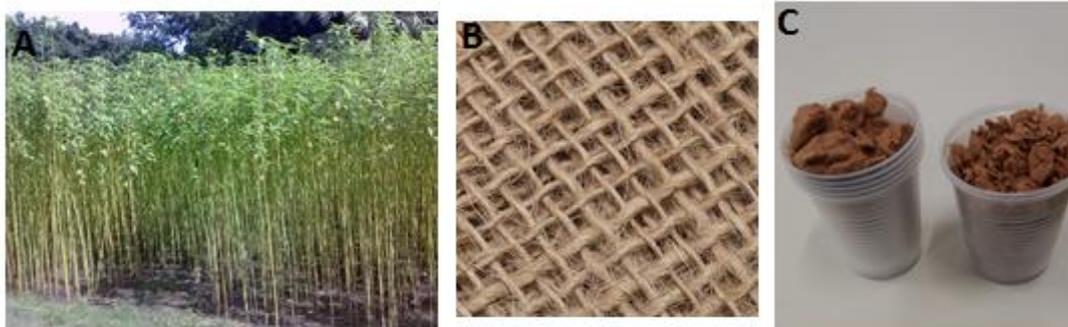
Uma das maiores dificuldades de se alcançar a mesma resistência e durabilidade dos fibrocimentos, com a utilização de outros tipos de fibras, é a aderência dessas fibras alternativas com a matriz cimentícia. No que concerne a utilização de fibras vegetais como reforço de fibrocimentos, o problema recai principalmente na deterioração precoce da fibra, uma vez que o meio alcalino da

matriz cimentícia é bastante agressivo. Soma-se a isso o fato de a porosidade da matriz contribuir para a degradação das fibras em função da umidade. É possível diminuir a porosidade da matriz, como forma de proteção das fibras, e também fazer pré-tratamento do reforço, com vistas a melhorar a aderência entre as duas fases do fibrocimento.

Há que se considerar que as frações volumétricas dos constituintes dos fibrocimentos têm impacto em suas propriedades mecânicas. Dito de outra forma, compósitos cimentícios com diferentes formulações em seus constituintes apresentam desempenho mecânico diferenciado. Essas formulações incluem materiais pozolânicos, em substituição parcial ao cimento, e as fibras ou combinação de fibras.

Nesta pesquisa, o objetivo é avaliar o uso de malha de juta combinadas e polpas celulósicas como reforço de compósitos cimentícios. Ou seja, a proposta consiste no uso de um reforço híbrido. Embora na literatura da área de compósitos conforme afirmam (Pakravan; Latifi; Jamshidi, 2017)), o termo reforço híbrido refira-se a materiais de origens distintas (polpas celulósicas e fibra sintética, por exemplo), nesta pesquisa serão utilizados dois tipos de reforço de uma mesma origem (vegetal) na forma de malha tramada (juta) e na forma de polpas celulósicas. A Figura 4 ilustra os reforços a serem utilizados nas amostras desta pesquisa: malha de juta e polpas de pinus.

Figura 4 - Planta de juta *in natura* (A), malha tramada (B) e polpas de pinus (C).



Fonte: o autor.

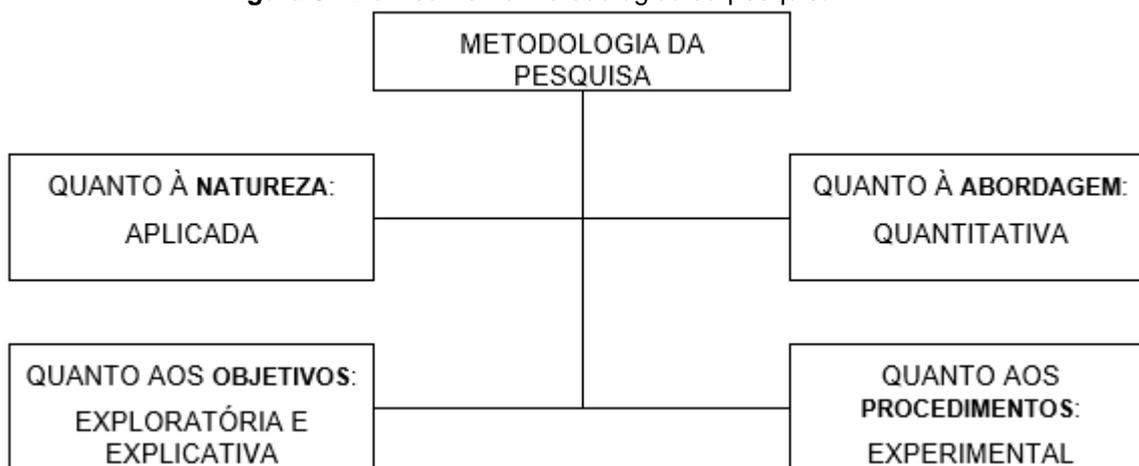
Esta pesquisa é de natureza aplicada, uma vez que busca, com base em conhecimentos já adquiridos e publicizados acerca da utilização de fibras alternativas como reforço de compósitos cimentícios, aplicar o conceito de hibridismo de uma forma distinta daquela identificada em trabalhos anteriores. No caso dessa pesquisa, o hibridismo do reforço diz respeito à utilização simultânea

de juta tramada, disponível no mercado e utilizada, em geral, em trabalhos artesanais, e polpas de pinus.

Quanto aos objetivos, a investigação é, simultaneamente, exploratória e explicativa. Exploratória, já que investiga um novo tipo de reforço em fibrocimento, o *reforço vegetal híbrido*; explicativa, pois, pelo método experimental, busca identificar os efeitos de duas variáveis independentes (utilização de CCA e pré-tratamento alcalino da malha de juta) na variável dependente (características mecânicas do compósito). Busca-se, dessa forma, ao mitigar a degradação das fibras por meio das variáveis independentes, melhorar o desempenho mecânico do compósito. Ou seja, há um sentido implícito na escolha do método experimental, já que ele comporta o pressuposto de que as variáveis independentes escolhidas causam impacto positivo na variável dependente.

O delineamento metodológico deste trabalho é apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Delineamento metodológico da pesquisa.



Fonte: o autor.

1.1 PERGUNTA DE PESQUISA

Qual o efeito da utilização conjunta de polpas celulósicas e de malha tramada de juta pré-tradada alcalinamente nas propriedades mecânicas do compósito cimentício?

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o impacto da utilização de reforço híbrido – malha tramada de juta, pré-tradada alcalinamente, e polpas celulósicas – nas características mecânicas do fibrocimento.

Os objetivos específicos são:

- Testar a produção de fibrocimentos com reforço híbrido de origem vegetal, produzido pelo processo de vácuo-compactação similar ao *Hatschek*.
- Buscar alternativas de mitigar os efeitos dos ataques alcalinos sobre os reforços de fibrocimentos à base de malha de juta e polpas celulósicas.
- Verificar os possíveis efeitos da utilização de Cinza de Casca de Arroz em fibrocimento com reforço híbrido de origem vegetal.
- Analisar os efeitos da adição de dois reforços de origem vegetal na tenacidade de fibrocimentos.

2 REVISÃO TEÓRICA

Este capítulo está estruturado em três partes nas quais são tratadas questões atinentes ao objetivo geral da pesquisa: (a) a busca por substituto do asbesto em fibrocimento; (b) as adições minerais à matriz dos fibrocimentos e, por fim, e de certa forma, conjugando as duas primeiras partes, (c) um levantamento de pesquisas que buscaram novas composições ou novos processos de produção de compósitos reforçados com fibras (CRF).

2.1 FIBROCIMENTO SEM ASBESTO: A BUSCA POR ALTERNATIVAS VIÁVEIS

Em um artigo de 2010, Ikal *et al.* 2010 fazem uma revisão acerca do uso de fibras alternativas ao amianto em compósitos cimentícios. Eles registram que essa tendência começou no início dos anos 1980 e que a utilização da tecnologia *Hatschek* vem sendo adotada tanto para a fabricação de placas de fibrocimento reforçadas com fibras celulósicas quanto para aquelas reforçadas com fibras sintéticas. No segundo caso, os autores citam as fibras de álcool polivinílico ou álcool polivinil (PVA), as fibras de vidro (AR-glass), poliácridonitrilo (PAN) e, mais recentemente, as fibras de polipropileno (PP). As fibras de PVA foram as primeiras a serem utilizadas em larga escala, em função da alta resistência à tração, alto módulo de elasticidade e baixo alongamento, alta durabilidade em matrizes alcalinas e boa aderência com a pasta cimentícia. No entanto, em função do custo de produção, essas fibras têm seu uso limitado no Brasil. Por serem mais baratas, as fibras de PP têm sido mais utilizadas. Para que essas últimas substituam o amianto, é necessário alterar suas propriedades hidrofóbicas, melhorar sua tenacidade, dispersão em água e a aderência com o cimento *Portland*. Segundo os autores, a tecnologia *Hatschek* tem sido ainda hoje a mais utilizada na fabricação de fibrocimentos, embora novas composições com incorporação de fibras sintéticas, aditivos químicos e cimentos com novas características sejam também utilizados. No que diz respeito aos modelos de reforço de compósitos por meio de fibras, os autores os dividem em três grupos: as propriedades da matriz e das fibras; a interação entre fibra e matriz e a fração do volume de fibra. Além desses parâmetros, os autores incluem dados geométricos relativos às tensões de flexão nas fibras. Como o contexto analisado é o Brasil, os autores do texto afirmam que, em 1997, foram iniciadas as pesquisas para se buscar materiais alternativos ao amianto e a instalação de maquinários para os novos processos de produção de

fibrocimentos. Embora os autores citem que uma planta de celulose também foi incluída nas iniciativas de modernização do parque industrial da empresa analisada, eles não entram em detalhes sobre a utilização de fibras vegetais em compósitos no Brasil. Os autores afirmam que, à época da pesquisa, as plantas da empresa haviam sido todas modificadas para a tecnologia de fibrocimentos sem amianto, mais precisamente com o uso de fibras de PP, uso esse que possibilitou a transferência de tecnologia utilizada no Brasil para um produtor na Índia.

Para Toledo Filho *et al.* (2009), diversas pesquisas foram feitas nos 25 anos anteriores, acerca da busca por substitutos da fibra de amianto em compósitos cimentícios. As vantagens da utilização de fibras vegetais como substitutas das fibras de amianto são inúmeras: são disponíveis em quantidade, são econômicas, requerem baixo grau de industrialização, são leves e consomem pouca energia nos processos de produção, além de apresentarem uma grande variedade de morfologia (LI; TABIL; PANIGRAHI, 2007) e (TONOLI, 2009). Com respeito à durabilidade dos CRF, os autores citam diversas abordagens já testadas e bem-sucedidas: impregnação de agentes seladores e de agentes que repelem água; selagem do sistema poroso da matriz, redução da alcalinidade da matriz e combinação de impregnação da fibra com a modificação da matriz. Após testarem o uso de fibra de sisal em compósitos cimentícios, os autores concluíram que a fragilização do produto foi evitada pelo uso de matriz cimentícia livre de hidróxido de cálcio, pela substituição de 50% do cimento *Portland* por argila calcinada, mesmo após 100 ciclos de envelhecimento.

Compósitos cimentícios reforçados com fibras é o objeto do artigo de autoria de (BRANDT, 2008). No artigo, o autor faz uma revisão das pesquisas e do desenvolvimento da área, nos quarenta anos anteriores. Ele relembra que a adição de fibra para diminuir a fragilidade de matrizes remonta aos tempos bíblicos, com a inserção de palha de milho e de pelo da crina de cavalos na fabricação de tijolos feitos de argila. O autor chama a atenção para o fato de as fibras vegetais naturais não serem adequadas para uso em concreto de alta resistência e que o amianto, em função da sua nefasta ação sobre a saúde humana, precisa ser, definitivamente, substituído por outros materiais com características semelhantes. O autor elenca os tipos de fibras mais utilizados nos 40 anos que antecederam a publicação do artigo, com destaque para as fibras de amianto, carbono e aço. As fibras de aço, segundo o autor, têm sido usadas amplamente para reforço de

elementos de pavimentos e coberturas em muitos países e até mesmo em peças estruturais, com uso híbrido de fibras de aço e barras de aço, sobretudo em edificações altamente sujeitas ao impacto e à fadiga. No que se refere às fibras vegetais naturais, o autor afirma que elas são usadas em países onde são mais disponíveis. Entre os tipos de fibras naturais mais usadas, ele cita as polpas celulósicas, sisal, bambu, *hemp* (canabis), linho, juta e rami (família das urticáceas). Para o autor, o uso dessas fibras é particularmente viável em países em desenvolvimento e para edificações de baixo custo, reforçando a ideia de que tais fibras não são recomendáveis em estruturas pesadas. Como recomendação de pesquisas futuras, são sugeridos: (a) o estudo dos reforços híbridos; (b) a compatibilidade entre os vários componentes do compósito e (c) a otimização da fração desses elementos nas misturas das matrizes. Para se conseguir bons compósitos cimentícios, o autor considera, ainda, serem fundamentais: a definição de uma grande variedade de matrizes, com maior qualidade, e a melhoria dos processos de cura dos CRF. Para ele, essas são as bases para se conseguir concretos comuns, baratos e duráveis, e recomenda o uso de fibras dispersas, em vez de aplicá-las de forma alinhada, em função dos resultados satisfatórios alcançados nas pesquisas resenhadas no artigo em questão.

Onuaguluchi e Banthia (2016) citam três formas de se melhorar as propriedades de compósitos cimentícios reforçados por fibras naturais de origem vegetal. A primeira diz respeito à substituição parcial do cimento por sílica ativa, para reduzir o conteúdo alcalino da matriz e de portlandita por meio da reação pozolânica. Essa substituição, combinada com a carbonatação acelerada tem o potencial de mitigar a deterioração das fibras utilizadas nos compósitos. O pré-tratamento das fibras também é uma forma de proteger as fibras sobretudo no que diz respeito à absorção de água. A terceira forma de melhorar as propriedades do compósito é a carbonatação, propriedade intrínseca do concreto que tem como base o cimento *Portland*, cujo processo consiste na absorção de CO₂ pelo cimento, ao longo do tempo, podendo provocar a diminuição considerável do pH.

2.2 ADIÇÕES MINERAIS EM FIBROCIMENTOS

Chatveera e Lertwattanak (2011) testaram a durabilidade de concreto convencional contendo CCA cujo uso foi justificado pela possibilidade de melhoria da resistência à deterioração da matriz cimentícia e também por diminuir a

temperatura do concreto fresco, evitando fissuras. O cimento comum foi substituído em 20 e 40% do volume por CCA. A cinza, segundo os autores, provoca no interior da matriz cimentícia a reação à carbonatação, melhorando, conseqüentemente, a durabilidade do compósito. Os autores concluíram que a substituição do cimento comum na proporção de 20% por CCA provocou melhores resultados, já que a retração foi menor, uma vez que houve diminuição da porosidade da matriz.

2.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão foi feita levando-se em conta dois aspectos considerados importantes para o estudo dos fibrocimentos sem asbestos: os tipos de fibras usados como reforço de fibrocimentos, em especial as fibras vegetais; os materiais adicionados à matriz cimentícia utilizados como forma de economia de cimento e para diminuir a porosidade do meio.

Os biocompósitos reforçados por fibras naturais é o objeto de um artigo de Faruk *et al.* (2012), que cobriu 10 anos de pesquisa na área (2000 a 2010). Segundo os autores, as plantas que produzem as fibras naturais com potencial de uso em compósitos podem ser classificadas em primárias e secundárias. Enquanto as primárias são cultivadas exclusivamente para a produção de fibras, a exemplo da juta, sisal, cânhamo e *kenaf* (ou *hibiscus cannabinus*), as secundárias são aquelas das quais se extraem as fibras como um subproduto, a exemplo do abacaxi, coco, palmeira oleaginosa, dentre outros.

Como as fibras são susceptíveis ao meio alcalino e ao ambiente poroso da matriz, faz-se necessário pré-tratá-las por processo físicos ou químicos.

A

Tabela 1 mostra a produção mundial de fibras, com base em Faruk *et al.* 2012, com destaque para as fibras de bambu, bagaço de cana de açúcar e juta, respectivamente. A juta é cultivada em diversos países como Índia, Bangladesh, China, Brasil, dentre outros.

Tabela 1 - Produção mundial de fibras.

Fonte de fibra	Produção mundial (10 ³ t)
Bambu	30.000
Juta	2.300
Kenaf (<i>hibiscus cannabinus</i>)	970
Linho	830
Sisal	378
Cânhamo (<i>cannabis sativa</i>)	214
Fibra de coco	100
Rami (<i>boehmeria nivea</i>)	100
Abacá (<i>musa textilis</i>)	70
Bagaço de cana de açúcar	75.000
Gramma	700

Fonte: Faruk et al. 2012 (adaptada).

O fato de a indústria da construção civil ser responsável pelo esgotamento de fontes renováveis, e cuja atividade gerar milhões de toneladas de resíduos e de emissões de dióxido de carbono, levou Pacheco-Torgal e Jalali (2011) a rever e discutir o uso de fibras vegetais em materiais de base cimentícia. No artigo, os autores tratam das características das fibras, da compatibilidade entre fibra e matriz, bem como dos tratamentos que buscam a melhoria do desempenho dos compósitos. Assim, o uso de fibras vegetais é considerada uma alternativa para substituir, em alguns casos, o aço, de forma mais sustentável. Embora as fibras de aço já vêm sendo substituídas por fibras sintéticas, a produção dessas é mais onerosa do que a produção de fibras vegetais. Segundo os autores, as fibras vegetais são tão resistentes quanto as sintéticas, além de serem mais baratas e *eco-friendly*. As fibras vegetais, após um pré-tratamento demonstraram contribuir para melhor desempenho dos compósitos. Os autores afirmam que a durabilidade dos compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais depende de fatores internos e externos, sendo que os internos dizem respeito à compatibilidade entre a matriz e as fibras e também às respectivas mudanças de volumes; os fatores externos dizem respeito a variações na temperatura e na umidade do meio. São citadas diversas pesquisas que detalham as razões da degradação prematura das fibras, dentre as quais se encontra a capacidade natural das fibras em absorver água, provocando alterações de volumes e, assim, possibilitando o surgimento de fissuras que fragilizam o compósito. Os autores citam duas alternativas para melhoria da durabilidade dos compósitos: a modificação da matriz (com a adição

de materiais pozolânicos como a cinza CCA, por exemplo) ou as alterações na fibra pela aplicação de agentes repelentes de água (silicato de sódio, sulfito de sódio ou sulfato de magnésio). Para eles, são necessárias pesquisas acerca da interação química entre a matriz cimentícia e as fibras vegetais nos compósitos.

A pesquisa de Ardanuy *et al.* (2015) revelou que a aderência entre fibra celulósica e a matriz cimentícia é extremamente relevante para o desempenho do CRF. A conclusão a que chegaram decorreu da revisão de artigos publicados em diversos países. As variáveis por eles analisadas foram: tipos de fibras mais utilizadas, métodos de processamento das fibras, comportamento mecânico e durabilidade dos compósitos. Além das vantagens já citadas por Toledo Filho *et al.* (2009), Ardanuy *et al.* (2015) citam a variedade de formas das fibras – diâmetro, comprimento, rugosidade, dimensões, dentre outras, e a relativa facilidade em se modificar a superfície das fibras para melhoria de suas qualidades.

O grande obstáculo para a produção industrial de compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais é, para os autores, a durabilidade. A hidratação do lúmen e a variação de volume dos materiais também são responsáveis pela diminuição da durabilidade do compósito.

Com relação às tipologias de fibras, os autores as classificam quanto à composição ou origem. As fibras vegetais ou celulósicas são compostas por celulose, com quantidades variadas de lignina, hemiceluloses e outros componentes tais como água, proteína, e compostos inorgânicos. Conforme sua origem, as fibras podem ser classificadas em lenhosas e não-lenhosas. As primeiras contêm mais lignina do que as segundas. As fibras não-lenhosas podem, por sua vez, ser classificadas em 4 subgrupos, a depender da parte da planta de onde elas são retiradas: 1 - as fibras oriundas dos talos (cânhamo ou maconha, juta, *kenaf*, linho, rami); 2 - fibras de folhas (sisal, abacaxi, palmeira de óleo, bananeira) e fibras provenientes de espigas ou talos (palha, arroz, trigo ou cevada); 3 - gomos (bambu, e capim elefante); 4 - fibras de sementes (algodão, coco). Além disso, há fibras longas, curtas e as polpas. As polpas são conseguidas pelo processo de polpação das fibras lenhosas, mas não somente delas.

Os autores salientam que o processamento dos compósitos deve ser feito com critério para garantir: a) dispersão homogênea das fibras na matriz; b) interação balanceada entre a matriz e as fibras; c) baixa porosidade da matriz; d) otimização do percentual de fibras. No processo de fabricação dos compósitos, as fibras

podem ser dispostas randomicamente ou alinhadas. Os autores detalham os cuidados a serem tomados nos dois processos para se conseguir maior resistência do compósito. Como não existe legislação específica para os testes de comportamento mecânico dos compósitos, os autores fazem recomendações com base em pesquisas já realizadas para a moldagem das amostras e para os ensaios com vistas a se obterem resultados confiáveis. Os testes mecânicos, segundo os autores, permitem ter acesso ao módulo de elasticidade, ao limite de tensão, à absorção de energia ou tenacidade, e à deformação. Todos esses parâmetros são levantados com diferentes configurações de deformação (três ou quatro pontos). A questão da durabilidade dos compósitos é considerada um ponto crucial no artigo em questão. A porosidade da matriz cimentícia é apontada pelos autores como sendo a principal causa da baixa durabilidade dos compósitos, já que permite o acesso de água e, conseqüentemente, o aumento do pH do ambiente. Em outras palavras, a presença do hidróxido de cálcio degrada a fibra.

Como já assinalado em outros trabalhos (Pacheco-Torgal e Jalali, 2011; Toledo Filho *et al.*, 2009; Ardanuy *et al.*, 2015), são dois os procedimentos básicos para melhoria da durabilidade dos compósitos: alteração na composição da matriz ou a realização de mudanças nas fibras por meio de processos físicos ou químicos. Para reduzir a portlandita, a adição de compostos pozolânicos é recomendada. Outra alternativa é a carbonatação acelerada. Quanto à modificação das fibras, o processo mais utilizado tem sido o da hornificação que consiste em submeter as fibras a ciclos alternados de secagem e umidificação. Ao final, as fibras apresentam menor absorção de água, aumentando sua durabilidade e a do compósito. Há registros de estudos (Ardanuy *et al.*, 2011; Claramunt *et al.*, 2011) em que as fibras submetidas a esse processo físico foram de pinus, algodão e sisal. Como tratamento químico, foi testada a imersão das fibras em pasta de sílica ativa antes de sua incorporação na matriz.

Ardanuy *et al.* (2015) finalizam o artigo apontando os caminhos futuros da pesquisa na área. Consideram que os próximos desafios dizem respeito à melhoria da durabilidade e do desempenho mecânico de compósitos reforçados com fibras vegetais, sem o aumento do custo de produção e como forma de se desenvolver tecnologias *eco-friendly*.

Os artigos citados constataam que a substituição de fibras de amianto em compósitos à base de cimento é uma necessidade e que as pesquisas já apontam

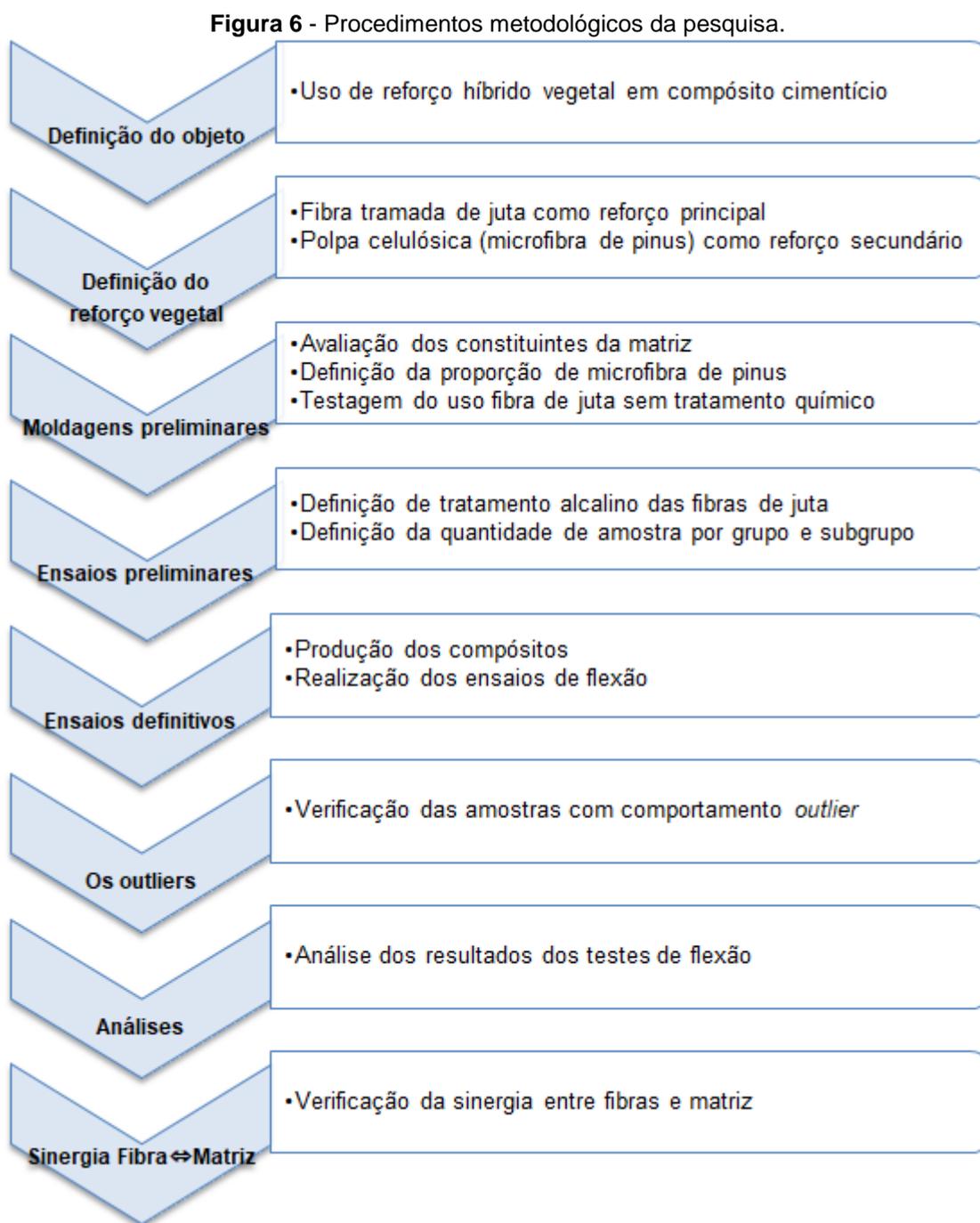
alternativas com relativo sucesso. No entanto, a durabilidade dos compósitos com fibras naturais, sobretudo as de origem vegetal, ainda é uma questão aberta e relevante para os investigadores. Sabe-se que a durabilidade dos compósitos cimentícios reforçados com fibras depende de diversas variáveis e de inúmeras combinações entre elas. No entanto, os métodos de testagem adotados nas pesquisas não são padronizados, o que pode levar a resultados diferentes para testes similares.

A diversidade de tipologias de fibras, os efeitos do meio alcalino sobre elas, as questões relativas à interface entre matriz e fibras, os processos de proteção e tratamento das fibras, dentre outros, são questões que estimulam as investigações atuais acerca dos compósitos cimentícios.

Nesta pesquisa, busca-se verificar os efeitos da utilização simultânea de malhas de juta pré-tratada quimicamente com polpas celulósicas. A ideia é que se atinja uma melhoria na resistência do compósito, atestada pelo processo de *strain hardening*, que consiste na extensão da deformação ao longo da fase plástica, em decorrência da atuação conjunta da malha e das polpas no processo de fissuração. Conforme apontam Snoeck e Belie (2015), nesse processo a tensão pode alterar em função da ação integrada do reforço e da matriz cimentícia, ou seja, primeiramente ocorre um comportamento elástico linear e, em função da dita ação integrada das fases do compósito, ocorre um comportamento plástico e, conseqüentemente, uma extensão na deformação, antes da possível ruptura.

3 METODOLOGIA

Em termos de procedimentos, e com base em Prodanov e Freitas (2013), esta pesquisa é experimental, uma vez que busca controlar e identificar o impacto de duas variáveis na resistência do compósito com reforço vegetal híbrido. Os procedimentos adotados para a realização da investigação constam na Figura 6.



Fonte: o autor.

Os materiais utilizados nas amostras constam na Figura 7 - Materiais utilizados na composição das amostras..

Figura 7 - Materiais utilizados na composição das amostras.

Matriz	Cimento CPV-ARI da empresa Lafarge-Holcim.
	Cinza de casca de arroz (CCA) da Silcca Nobre, produzida pela Pilecco,
	Água do abastecimento da cidade de Belo Horizonte, fornecida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA)
	<i>Filler</i> calcário CaCO ₃
Reforço	Fibra de juta na forma de tecido (Figura 4B)
	Polpas de origem vegetal fornecidas pela Suzano Indústria de Papel e Celulose (Figura 4C)

A seguir são apresentadas as composição química (Tabela 2) dos materiais utilizados nas amostras e as características físicas dos materiais utilizados (

Tabela 3).

Tabela 2 - Composição química dos constituintes da matriz do fibrocimento

Constituintes	CIMENTO CPV-ARI (%)	FILLER CALCÁRIO (%)	CCA (%)
PF 1000°C	4,03	-	-
C (LOI)	-	-	2,67
CaCO ₃	-	92,82	-
SiO ₂	18,85	3,67	95,9
TiO ₂	-	-	0,02
Al ₂ O ₃	4,67	2,48	0,26
Fe ₂ O ₃	3,07	0,36	0,03
MnO	-	-	0,31
CaO	64,82	-	0,43
MgO	0,70	-	0,36
Na ₂ O	-	-	0
K ₂ O	0,77	0,29	1,43
P ₂ O ₅	-	-	0,27
R.I.	0,60	-	-
SO ₃	2,90	0,18	-
CO ₂	2,97	-	-
SrO	-	0,19	-
CuO	-	0,01	-
PF 500°C	0,67	-	-
C ₃ A (Teórico)	7,11	-	-

Fonte: (GOMES, 2019). Jacóe (2015). Fabricante

Tabela 3 - Características físicas dos constituintes da matriz

Características	Cimento CP-V	Filler calcário	CCA
Área específica (BET m ² /g)	-	0,743	10,786
Dimensão média (µm)	10,00	38,00	11,00
Densidade (g/cm ³)	3,10	2,752	2,44

Fonte: Jacóe (2015).

Dois grupos de amostras foram moldados: o primeiro teve sua matriz composta por cimento, *filler* calcário e água, em cuja matriz não continha CCA (daí a denominação “sem cinza de casca de arroz” ou SCCA). Na composição da matriz do segundo grupo, 15% do cimento e do *filler* calcário foi substituído por cinza de casca de arroz (daí a denominação “com cinza de casca de arroz” ou CCCA). Amostras dos dois tipos são ilustradas na Figura 8. À esquerda vê-se uma amostra de matriz sem CCA e à direita uma amostra de matriz com CCA.

Figura 8 - Amostras típicas sem e com cinza de casca de arroz.



Fonte: o autor.

Todas as amostras receberam como reforço malha tramada de juta e polpas de pinus, sendo que a proporção de polpas foi de 8% da massa, levando-se em conta a umidade, que à época foi de 69%. A malha de juta recebeu três tipos diferentes de pré-tratamento químico (TA, TB e TC), para a retirada de impurezas e consequente obtenção de material livre de extrativos. A Tabela 4 contém informações acerca da composição das amostras.

Tabela 4 - Composição das amostras.

Tipos de matriz	Materiais constituintes das amostras						Tratamento da malha de juta
	Cimento (g)	Filler calcário (g)	CCA (g) 15%	Água (ml)	Polpas de pinus(g) 8%	Malha de juta	
SCCA	115	115	0	900	31,10	Sim	A, B e C
CCCA	97,75	97,75	34,5	900	31,10	Sim	A, B e C

Fonte: o autor.

A malha tramada de juta apresenta em sua composição química: 72 % de celulose, 8,1 % de lignina e 12,8 % de hemiceluloses (FIDELIS, 2014).

Conforme a Tabela 4, o grupo matriz SCCA difere do grupo matriz CCCA, uma vez que no último, 15% do cimento e do *filler* calcário foi substituído por 34,5g de CCA.

As amostras foram moldadas com dimensão aproximada de 160x160x8mm. Posteriormente, cada amostra foi dividida em três partes com dimensões aproximadas de 40x160x8 mm, gerando ao total 90 peças, sendo 45 para cada tipo de matriz. A quantidade de amostras moldadas é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Quantidade e tipo de amostras moldadas.

Tipo da matriz	Tipos de tratamento alcalino do tecido de juta			Quantidade de peças (dimensão aproximada 160x160x8 mm)	Quantidade de peças (dimensão aproximada 40x160x8 mm)
SCCA	A	B	C	3 x 5 =15	3 x 15 = 45
CCCA	A	B	C	3 x 5 =15	3 x 15 = 45
	Total			30	90

Fonte: o autor.

3.1 PRÉ-TRATAMENTO DAS MALHAS DE JUTA

Em todas as amostras, sem exceção, foi colocado um reforço de malha tramada de juta com tratamento alcalino diferenciado (**Figura 9**). Esse tipo de tratamento é conhecido como mercerização e visa ao aumento da resistência das fibras. O tratamento A consistiu na imersão da juta em solução de hidróxido de sódio (NaOH) à temperatura ambiente, com concentração de 5%, por cerca de 9h, conforme indicações de (LAMBERT *et al.*, 2015) e de PIRES, 2012. Posteriormente, as amostras foram lavadas em água corrente, sem medição e controle do pH.

O tratamento B consistiu na imersão da juta em solução de NaOH (BUFALINO *et al.*, 2015) com concentração de 5%, por 1h, à temperatura controlada de 60°C, sob agitação constante. (LI; TABIL; PANIGRAHI, 2007) reportam que a imersão de fibras em solução à temperaturas mais altas é mais eficiente do que o mesmo procedimento à temperatura ambiente. Após esse procedimento, a malha foi lavada em água corrente até pH próximo de 7.

O tratamento C consistiu em um duplo procedimento: primeiramente, a malha de juta foi imersa nas mesmas condições do TB e, após ser levada à estufa à temperatura de 80°C por 24h, ela foi imersa em solução de NaOH com 5% (m/v) e

peróxido de hidrogênio (H_2O_2) 24% (v/v), na proporção de 1:1 (JÚNIOR et al., 2015). O tempo de imersão foi de 2h à temperatura de 65°C, sob agitação constante. Depois, a malha foi lavada em água corrente até pH próximo de 7. Na Figura 9 constam informações resumidas dos três tipos de tratamento auferido às malhas de juta.

Figura 9 - Os três tipos de pré-tratamento alcalino da malha de juta

Tipo de tratamento	Hidróxido de Sódio (NaOH)	Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2)	Tempo (h) / temperatura	Agitação constante	Controle de pH até próximo de 7
A	5%	-	9 / ambiente	-	-
B	5%	-	1 / 60°C	sim	sim
C	5%	24%	2 / 65°C	sim	sim

De uma maneira geral, a expectativa com relação aos tratamentos é aumentar a rugosidade da superfície das fibras e, conseqüentemente, a aderência à matriz e também aumentar a quantidade de celulose exposta na superfície das fibras, incrementado o potencial de reação com o meio.

A Figura 10 ilustra a malha tramada de juta antes e depois do tratamento alcalino. As malhas que receberam tratamento B (Figura 10B e C) apresentam cores mais claras que as malhas em estado natural, sendo que o branqueamento decorrente do tratamento C provoca uma aparência bastante clara à malha tramada de juta.

Figura 10 - As malhas tramadas de juta - antes (A) e após (B, C) os tratamentos alcalinos.



Fonte: o autor.

3.2 MOLDAGEM DAS AMOSTRAS

Todo esse processo de moldagem se inspirou na fabricação de fibrocimentos consagrada por austríaco Ludvig Hatschek.

A mistura de cimento, *filler* calcário, CCA (quando for o caso), polpas e água foi feita em agitador, por 7 minutos. A seguir, um terço da mistura foi inserida em uma forma metálica de 160x160 mm de base (Figura 12). Na base da forma, foi colocado uma espécie de filtro para permitir a passagem de água e, ao mesmo tempo, reter os outros materiais constituintes da amostra. O excesso de água foi retirado por meio da utilização de uma bomba a vácuo e armazenado em um cilindro (Figura 11). Na sequência, a malha de juta, com aproximadamente 170x170mm, foi colocada na parte superior da mistura (Figura 12b). Depois, o restante da mistura (dois terços do volume) foi inserida na forma e, novamente, o excesso de água foi sugado pela bomba. A mistura foi adensada manualmente com um suporte metálico, de forma a garantir uma uniformidade na consistência e na espessura da peça (Figura 12c).

Figura 11 - Equipamentos utilizados na moldagem das amostras.



Fonte: o autor.

Figura 12 - Moldagem das amostras de fibrocimento.



Fonte: o autor.

Por último, as peças moldadas foram levadas à prensa para retirada do excesso de água (Figura 13).

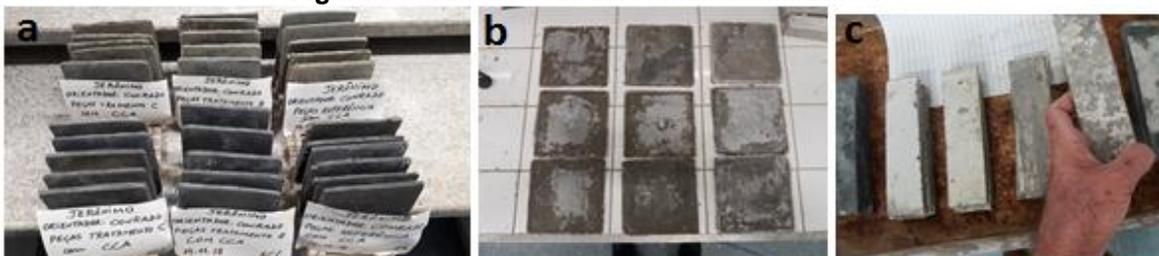
Figura 13 - Retirada do excesso de água das amostras de fibrocimento.



Fonte: o autor.

Conforme consta na Tabela 5, foram moldadas 30 peças com dimensão aproximada de 160x160x8mm (Figura 14 a e b). Após 7 dias de moldadas, cada uma dessas 30 peças foi subdividida em 3 partes, gerando amostras com dimensão aproximada de 40x160x8 mm (Figura 14c).

Figura 14 - Amostras de fibrocimentos moldadas.



Fonte: o autor.

Equipamentos utilizados:

Balança de bancada (digital de precisão)

Misturador (agitador)

Forma metálica com 16 cm x 16 cm de área

Bomba a vácuo

Paquímetro digital *Mitutoyo Absolute*

Prensa para ensaios mecânicos – modelo EMIC

O tratamento alcalino da malha de juta foi feito no Laboratório de Manipulação Química do Campus 2 do CEFET-MG, na cidade de Belo Horizonte.

Os ensaios de flexão foram feitos após 21 dias da moldagem das peças, no Laboratório de Ensaios Mecânicos do CEFET-MG, também no Campus II. A taxa de carregamento foi de 0,5mm/min. A Figura 15 apresenta a preparação da prensa para realização do ensaio.

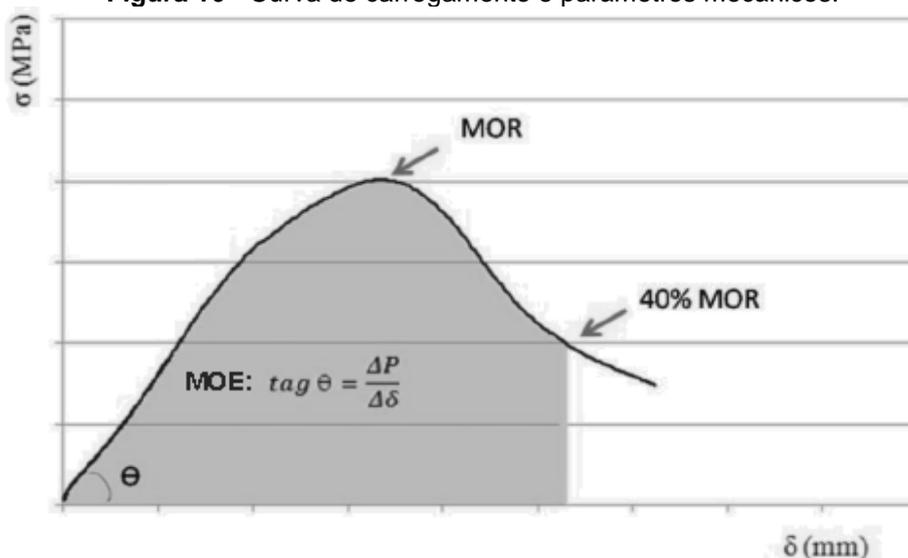
Figura 15 - Ensaio de flexão em 3 pontos.



Fonte: o autor.

Para todas as 90 amostras, foram feitos ensaios de flexão em 3 pontos, sendo a deflexão medida por defletômetro (precisão de 0,001mm) posicionado na face tracionada, no centro do vão de 120mm. A partir dos dados obtidos no ensaio de flexão², foram calculados, respectivamente, os Módulos de Ruptura, que definem a resistência máxima de cada corpo de prova, os Módulos de Elasticidade, que definem a rigidez e a Energia específica, que permite conhecer a energia absorvida pelo material durante a flexão, até que atinja 40% da carga máxima MOR (RILEM, 1984). A Figura 16 ilustra uma curva de carregamento prototípica e os parâmetros mecânicos a ele associados.

Figura 16 - Curva de carregamento e parâmetros mecânicos.



Fonte: Jacóé (2016).

² Os ensaios de flexão geraram tabelas com a carga de carregamento (N) e deslocamento (mm). Com base nesses dados e também nas medidas de cada CP foram calculados os outros parâmetros: MOE, MOR e *Spe. En.*

As equações utilizadas para cálculo do MOR e do MOE, a partir dos dados gerados pelo ensaio de flexão, foram:

$$\text{MOR} = \frac{3}{2} \frac{Fl}{bh^2} \quad \text{Equação 1}$$

$$\text{MOE} = \tan\theta \frac{l^2}{6h} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo: F = Força máxima (N)

l = distância entre os apoios (120mm)

b = largura média do corpo de prova (mm)

h = espessura média do corpo de prova (mm)

$$\tan\theta = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\delta}$$

A energia específica foi calculada a partir das curvas de tensão e deformação e é definida como a área sob a curva, calculada até 40% do MOR. Como ela diz respeito à capacidade de o material absorver energia sob flexão, é uma medida de tenacidade. O cálculo do MOR, do MOE e da Energia Específica foi feito seguindo as recomendações RILEM, 1984.

A caracterização da malha tramada de juta e os efeitos do tratamento a ela auferido foi realizada por meio do Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e das imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

O espectrofotômetro Infravermelho por transformada de Fourier utilizado foi da marca Shimadzu modelo IR PRESTIGE-21 e as análises foram realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Materiais, localizado no Campus VI do CEFET-MG, em Belo Horizonte. Também foi utilizada a técnica de Difração de raios X (DRX). Para obtenção dos difratogramas foi utilizado o difratômetro MAXima XRD-700 da marca Shimadzu, varredura de 5° a 80°, com radiação de cobre, passo de 0,02°, comprimento de onda 2θ, velocidade de 1°/mm, tensão de 40 kV e corrente 30 mA.

Os resultados dos ensaios mecânicos foram analisados empregando-se software de estatística, viabilizando a determinação da influência das variáveis (composição da matriz e tratamento do reforço de origem vegetal) nas propriedades mecânicas do fibrocimento.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.3 ENSAIOS DE FLEXÃO

Das 90 amostras, 3 foram eliminadas, por apresentarem comportamento fora dos padrões (*outliers*). As amostras *outliers* foram identificadas por meio da utilização do *software* SPSS, mais especificadamente pelo recurso da estatística descritiva. O conjunto amostral foi constituído por seis conjuntos de 15 (quinze) corpos de prova. A quantidades das amostras, após a exclusão das *outliers*, consta da Tabela 6.

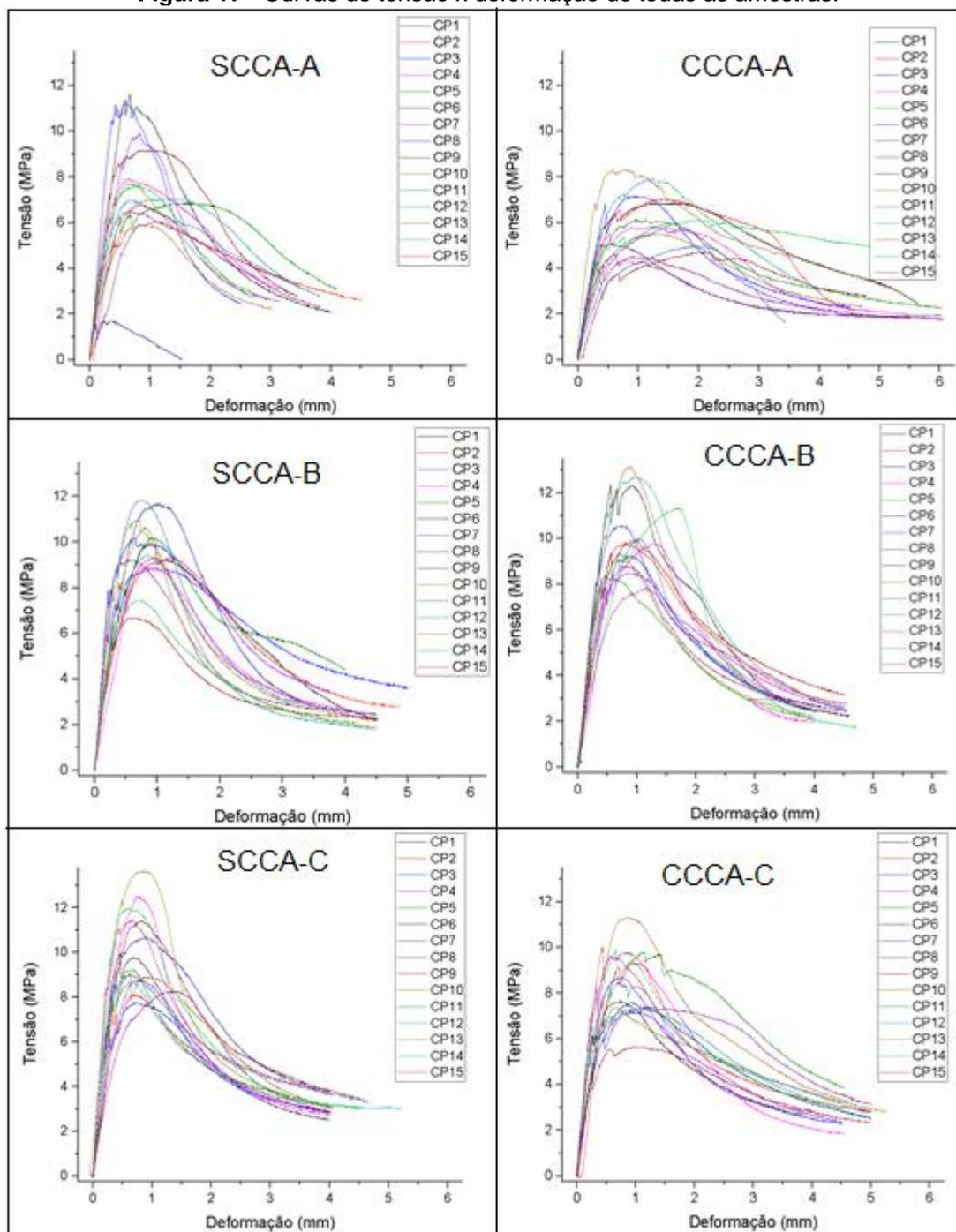
Tabela 6 - Quantidade de amostras após exclusão das *outliers*.

Matriz-tratamento	Qtde de corpos de prova	<i>Outliers</i>
SCCA-A	13	CP1, CP6
SCCA-B	14	CP9
SCCA-C	15	
CCCA-A	15	
CCCA-B	15	
CCCA-C	15	
TOTAL	87	3

Fonte: o autor

O Figura 17 contém seis imagens que mostram as curvas de tensão (MPa) x deformação (mm) das noventa amostras, distribuídas segundo os tipos de matriz e o tipo de tratamento da malha de juta

Figura 17 - Curvas de tensão x deformação de todas as amostras.



Fonte: o autor.

A Tabela 7 contém os valores médios do MOR, do MOE e da *Spe.En.* com seus respectivos desvios padrões, após a exclusão das amostras *outliers*.

Tabela 7 - Parâmetros mecânicos das amostras.

	TRATAMENTO DA MALHA	MOR (MPa)		SPE-ENERGY (kJ/m ²)		MOE (GPa)	
		MÉDIO	DESVIO	MÉDIA	DESVIO	MÉDIO	DESVIO
MATRIZ SCCA	A	7,66	1,556	0,69	0,156	5,55	1,827
	B	9,83	1,178	0,86	0,173	7,30	2,239
	C	10,03	1,810	0,89	0,191	7,61	1,703
MATRIZ CCCA	A	5,97	1,635	0,99	0,321	5,88	1,309
	B	10,08	1,635	0,96	0,220	6,08	1,294
	C	8,46	1,477	0,99	0,154	6,93	1,660

Fonte: o autor.

Com base nos dados da Tabela 7, foram gerados gráficos em que constam as médias dos resultados dos ensaios dos dois tipos de matriz (SCCA e CCCA), levando-se em conta os tratamentos alcalinos A, B e C da malha de juta. Os gráficos de barras foram elaborados de forma a permitir a visualização das linhas de tendência da média do MOR, do MOE e da *Spe.En.* Enquanto a análise por tipo de matriz permite avaliar o impacto da variável CCA nos três parâmetros (MOR, MOE e *Spe.En.*), a análise por tipo de tratamento permite avaliar o impacto do branqueamento da malha de juta por meio de tratamento alcalino nos mesmos parâmetros citados.

A seguir, foi feita uma análise mais aprofundada dos resultados do ensaio de flexão, com base em análise estatística. Os resultados obtidos no ensaio de flexão foram submetidos à análise de variância (ANOVA), utilizando o software estatístico Minitab. O nível de significância adotado foi de 5%.

Os gráficos gerados com recurso da estatística permitem uma análise apurada não apenas de cada uma das variáveis (configuração da matriz e pré-tratamento alcalino da malha de juta), separadamente, mas também da combinação entre as duas variáveis.

As análises estatísticas realizadas referem-se:

- (a) ao Diagrama de Pareto dos Efeitos Padronizados, que permite acessar a Probabilidade Normal dos Efeitos Padronizados (com confiabilidade 95% ou $\alpha = 0,05$);
- (b) aos efeitos das variáveis tipo de tratamento de malha tramada de juta (A, B ou C) e tipo de matriz (sem e com CCA) no parâmetro em questão e

(c) ao Diagrama da Interação entre as variáveis matriz (presença ou ausência de CCA) e tratamentos alcalino da malha de juta (A, B e C).

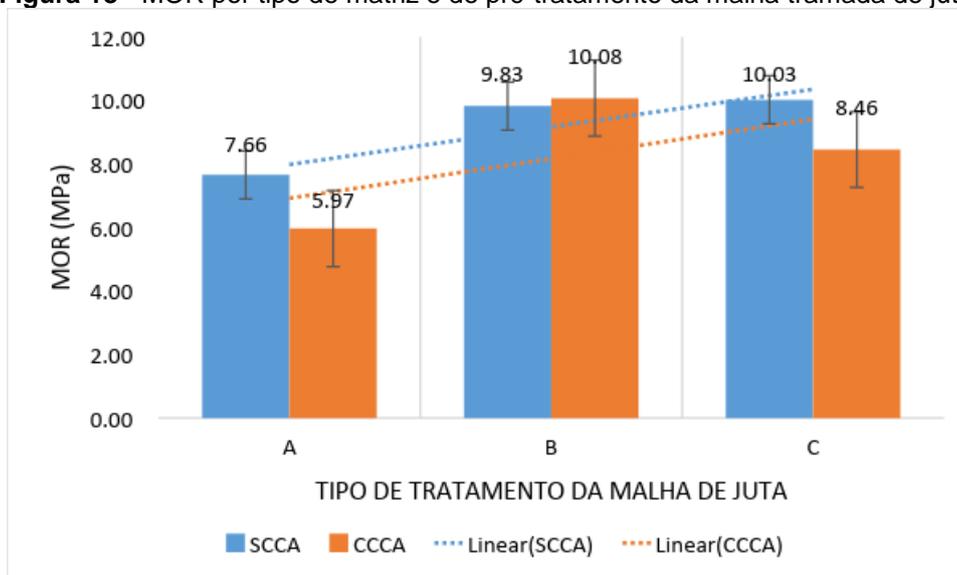
A utilização de malha tramada de juta foi analisada em comparação com os resultados de outras pesquisas, sobretudo em relação à tenacidade.

Os parâmetros mecânicos foram analisados na seguinte ordem: em primeiro lugar, o módulo de ruptura; em segundo lugar, o módulo de elasticidade e, por último, a energia específica. Para cada um dos parâmetros as análises foram feitas, inicialmente, com base em gráficos de barras. Após, foram analisados os gráficos gerados por inferência estatística, sendo que, num primeiro momento, os efeitos da adição de CCA foram analisados juntamente com os tratamentos A e B das malhas de juta, e num segundo momento, os efeitos da adição de CCA foram analisados em conjunto com os tratamentos B e C das referidas malhas.

3.3.1 Módulo de Ruptura

Na Figura 18 constam as médias do MOR das amostras, levando-se em conta o tratamento químico da malha e a composição da matriz.

Figura 18 - MOR por tipo de matriz e de pré-tratamento da malha tramada de juta.



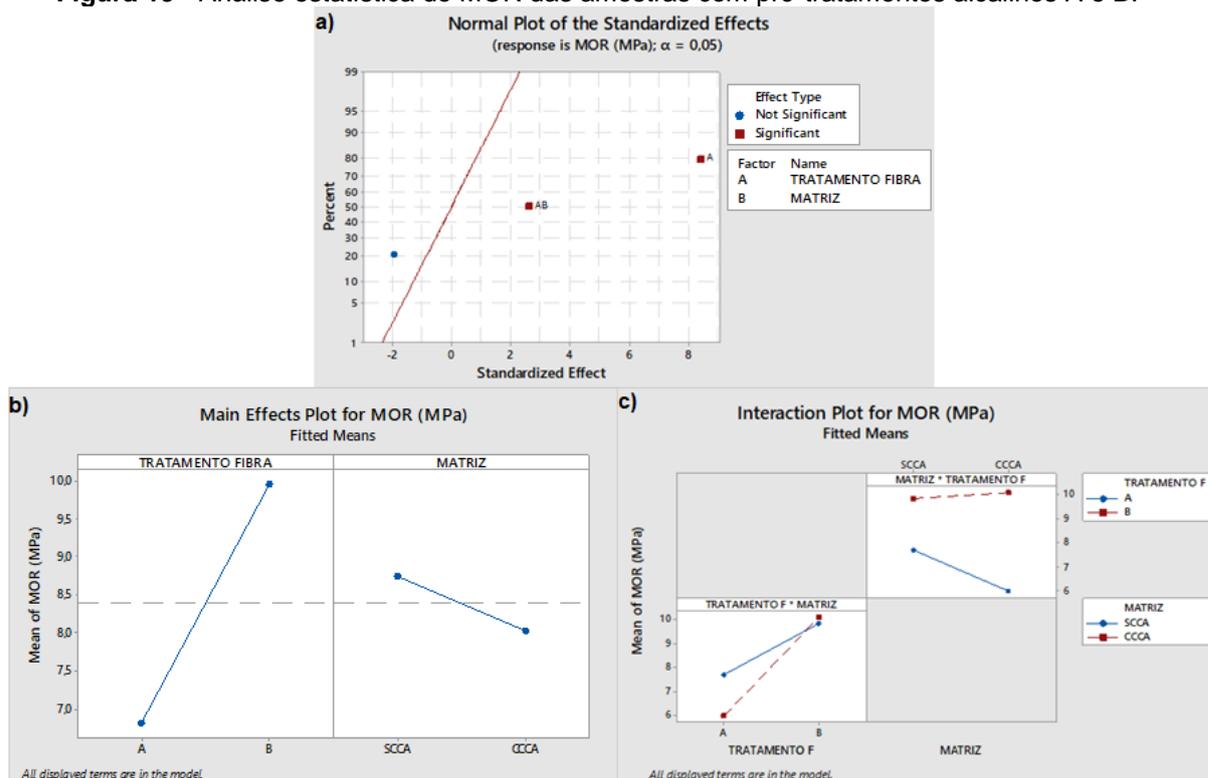
Fonte: o autor.

De acordo com a Figura 18, as linhas de tendência permitem afirmar que compósitos de matriz sem CCA apresentam MOR normalmente mais alto do que compósitos de matriz com CCA. A exceção é devida aos compósitos com juta pré-tratada em solução de NaOH à temperatura controlada (tratamento B), em que o

MOR médio das amostras de matriz SCCA é estatisticamente igual ao compósito de matriz CCCA. Essa exceção não chega a afetar a conclusão de que compósitos cimentícios de matriz SCCA são mais resistentes à ruptura na flexão do que compósitos de matriz CCCA. A adição de CCA na matriz de compósitos cimentícios os torna mais densos, provoca diminuição da porosidade do material, o que acaba por proteger as fibras que compõem o reforço fibroso, melhorando a durabilidade, mas não necessariamente alterando a resistência à ruptura (RAMAKRISHNA; T. SUNDARARAJAN, 2015). A verificação da durabilidade não foi objeto dessa investigação.

As linhas de tendência também permitem afirmar que o MOR das amostras varia com o tipo de tratamento químico auferido à malha tramada de juta. Nos dois tipos de matriz houve tendência de aumento do MOR, na medida em que as malhas de juta receberam os tratamentos A, B e C, respectivamente. Partimos do pressuposto que os tratamentos A, B e C vão do menos efetivo (A) ao mais efetivo (C), ao considerarmos que o reforço interage melhor com a matriz cimentícia se estiver livre de elementos indesejáveis para a interface matriz-reforço. Essa consideração pode ser avaliada por meio da comparação do comportamento do MOR dos compósitos por tipo de matriz. Dessa forma, nas amostras de matriz SCCA, houve um incremento do MOR do tratamento A para o B e também do B para o C. Nas amostras de matriz CCCA houve incremento do MOR do tratamento A para o B e do A para o C. Por outro lado, em amostras de matrizes CCCA o tratamento B foi mais eficaz do que o tratamento C. De qualquer forma, as duas linhas de tendência evidenciam que o MOR varia na medida em que o tratamento da malha passa de uma simples imersão em solução de NaOH (tratamento A) à imersão em solução aquecida e em rotação (tratamentos B e C). No caso em tela, o destaque do desempenho dos compósitos fica mais evidente para amostras cujas malhas de juta receberam tratamento alcalino B associado à matriz CCCA. Essa conclusão será verificada por análise estatística baseada na Figura 19.

Figura 19 - Análise estatística do MOR das amostras com pré-tratamentos alcalinos A e B.



Fonte: o autor.

De acordo com a Figura 19a, a composição da matriz não apresenta impacto significativo no MOR, diferentemente do reforço fibroso com tratamento alcalino, que causa alto impacto no MOR. Quando as duas variáveis são analisadas conjuntamente o impacto ocorre, embora em pequena magnitude.

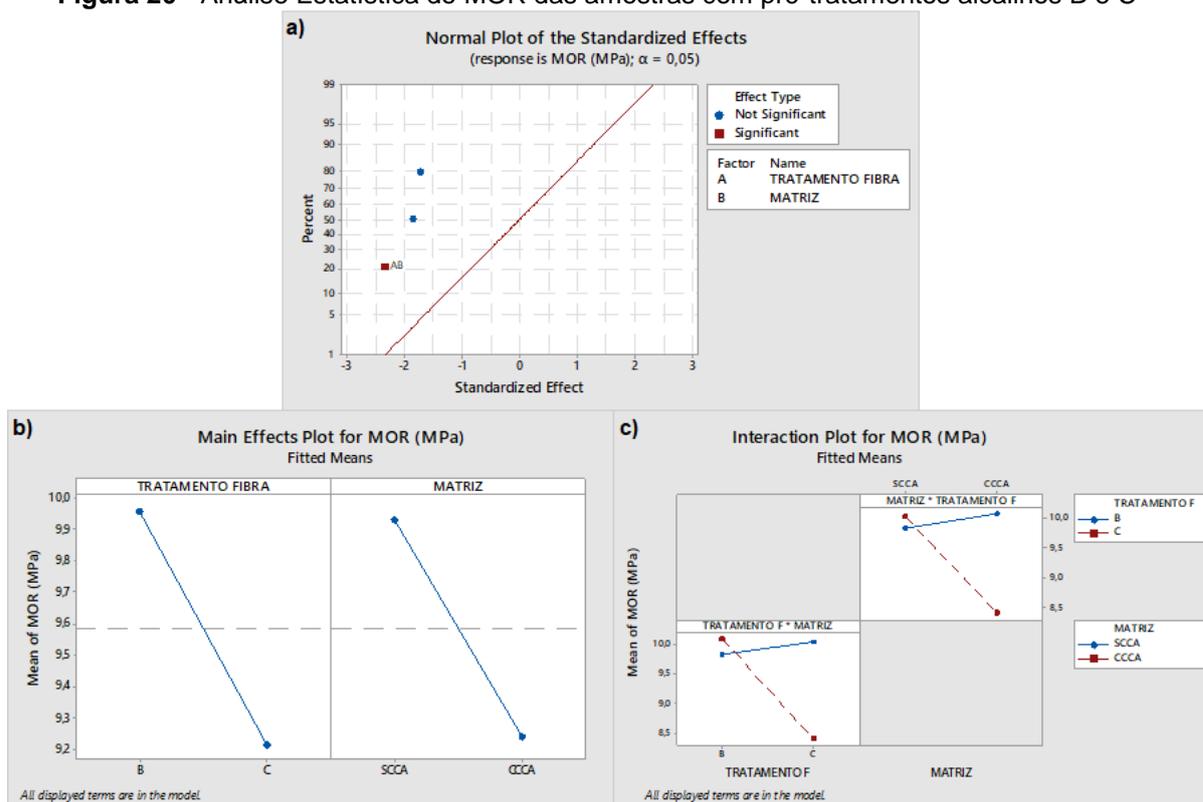
A Figura 19b permite analisar separadamente os efeitos do tratamento da malha de juta e também da presença ou ausência de CCA nos compósitos. As duas retas mostram tendências opostas: enquanto a reta é positiva, do tratamento A para o tratamento B, o efeito da presença de CCA, representado pela reta com inclinação negativa, mostra claramente uma diminuição das médias do MOR.

A Figura 19c possibilita duas leituras. A primeira evidencia a tendência de incremento nos valores de MOR das amostras, levando-se em conta o pré-tratamento auferido à malha de juta, sendo que o incremento vai do tratamento A para o tratamento B, tanto no caso da matriz CCCA quanto da matriz SCCA, embora a inclinação da reta seja mais acentuada para as amostras CCCA. Outra leitura possível diz respeito à tendência diferenciada de variação do MOR, do tratamento A para o B. Para os compósitos que receberam o tratamento A em sua malha, a inclinação da reta é negativa entre a matriz SCCA para a matriz CCCA. Por outro lado, para os compósitos que receberam tratamento B em sua malha de

juta, a tendência de inclinação da reta representativa dos valores de MOR é ligeiramente positiva, sendo menor nos casos de matriz SCCA. Ou seja, a presença de CCA associada ao tratamento B da malha de juta indicia aumento da resistência de CRF, sendo essa uma conclusão importante para esta pesquisa.

A seguir, é apresentada a análise da variação do MOR dos compósitos, tomando-se por base uma comparação entre os tratamentos B e C das malhas (Figura 20).

Figura 20 - Análise Estatística do MOR das amostras com pré-tratamentos alcalinos B e C



Fonte: o autor.

De acordo com o Figura 20a, a composição da matriz não apresenta impacto significativo no MOR, da mesma forma que o reforço fibroso. Por outro lado, quando as duas variáveis são analisadas conjuntamente o impacto no MOR é significativo. Ou seja, o tratamento alcalino C contribui para o aumento do MOR somente quando associado à adição de CCA, o que não ocorreu com o tratamento B que, independentemente da adição pozolânicas, provocou aumento do MOR.

A Figura 20b permite analisar separadamente os efeitos do tratamento da malha de juta e da presença ou ausência de CCA nos compósitos. As duas retas mostram tendências similares com inclinação negativa, mostrando claramente uma diminuição das médias do MOR do tratamento alcalino B para o C e também o

mesmo efeito da adição de CCA na matriz cimentícia. Isso mostra claramente que, comparado com o tratamento B, o tratamento alcalino C não se mostrou tão eficaz, se analisamos seu impacto na resistência à flexão.

A Figura 20c possibilita duas leituras. A primeira evidencia a tendência de incremento nos valores de MOR das amostras, levando-se em conta o pré-tratamento auferido à malha de juta, sendo que o incremento vai do tratamento B para o tratamento C, para matriz sem CCA. Por outro lado, a inclinação da reta é negativa, ou seja, o MOR diminui para matriz com CCA. Outra leitura possível diz respeito à tendência diferenciada de variação do MOR, do tratamento B para o tratamento C. Para os compósitos cuja juta recebeu tratamento B, a inclinação da reta é ligeiramente positiva da matriz SCCA para a matriz CCCA. Por outro lado, para os compósitos com juta que recebeu tratamento C, a tendência de inclinação da reta representativa dos valores de MOR é ligeiramente negativa, sendo menor nos casos de matriz CCCA. Ou seja, o tratamento B da malha de juta é mais eficaz nos compósitos de matriz CCCA, em relação ao tratamento C, o que reafirma o impacto positivo do tratamento B, no MOR de CRF.

A seguir, é apresentada uma análise da variação do MOE das amostras, em função tanto da configuração da matriz cimentícia quanto do reforço fibroso, a partir da análise dos gráficos de barras e, depois, das análises estatísticas.

Resumidamente, após cotejamento das análises anteriores, pode-se concluir a respeito do MOR que:

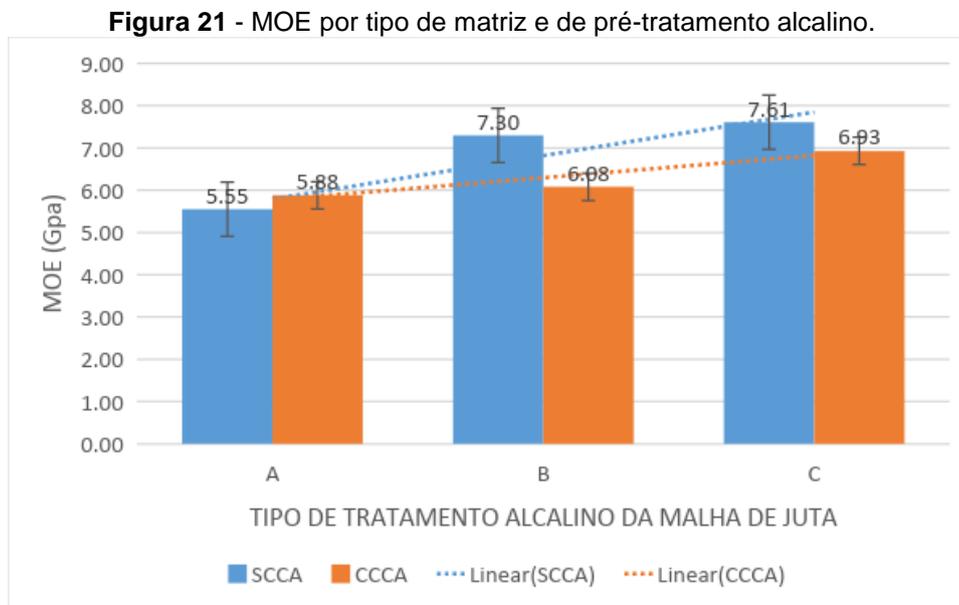
- Nos dois tipos de matriz houve tendência de aumento do MOR, na medida em que as malhas de juta receberam os tratamentos A, B e C, respectivamente, com destaque para o tratamento alcalino B associado à matriz CCCA;

- a composição da matriz não apresenta impacto significativo no MOR, diferentemente do reforço fibroso com tratamento alcalino, que causa alto impacto no MOR;

- o tratamento alcalino C das malhas de juta contribui para o aumento do MOR somente quando associado à adição de CCA, o que não ocorreu com o tratamento B que, independentemente da adição pozolânicas, provocou aumento do MOR.

3.3.2 Módulo de Elasticidade

Na Figura 21 constam os valores médios dos módulos de elasticidade das 87 amostras, separadas segundo o tipo de tratamento químico auferido à malha de juta utilizada como reforço.



De acordo com a Figura 21, as linhas de tendência permitem afirmar que compósitos de matriz SCCA apresentam MOE normalmente mais alto do que compósitos de matriz CCCA. A exceção fica por conta dos compósitos com malha de juta pré-tratada em solução de NaOH à temperatura ambiente (tratamento A), em que MOE médio das amostras de matriz SCCA ficou ligeiramente menor do que as de matriz CCCA, embora a diferença seja pequena (6,9%). Essa exceção não compromete a conclusão de que compósitos cimentícios SCCA são mais rígidos do que compósitos com CCA, já que os primeiros apresentam módulos de elasticidade maiores.

As linhas de tendência também permitem afirmar que o MOE das amostras varia com o tipo de tratamento químico auferido à malha tramada de juta. Nas amostras de matriz SCCA e nas de matriz CCCA houve uma tendência de aumento do MOE, na medida em que as fibras de juta receberam os tratamentos A, B e C, respectivamente.

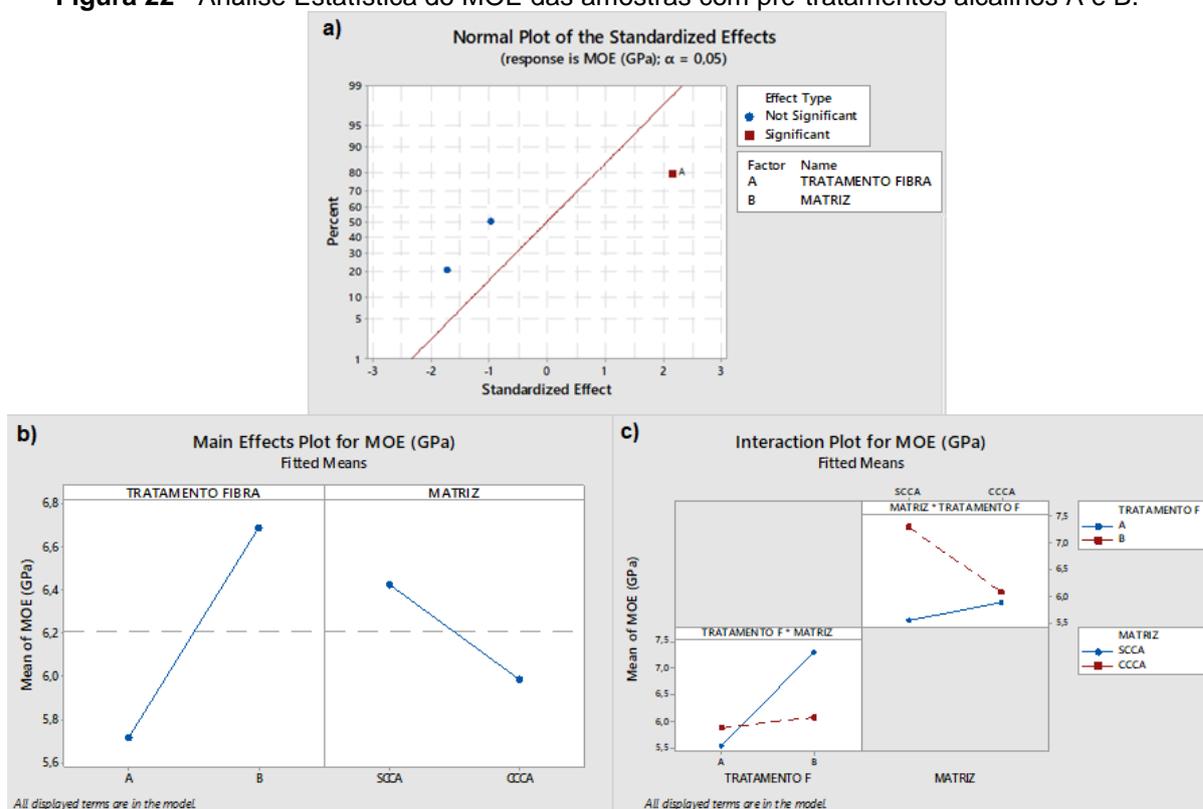
Na comparação do desempenho das amostras por tipo de tratamento, observa-se que, no grupo de matriz SCCA houve um incremento do MOE do tratamento A para o B, do B para o C e do A para o C, confirmando a hipótese de que esses

tratamentos vão do menos ao mais efetivo. Portanto, as duas linhas de tendência evidenciam que o MOE varia na medida em que o tratamento das fibras passa de uma simples imersão em solução de NaOH (tratamento A) à imersão em solução aquecida e em rotação (tratamentos B e C).

A conclusão, portanto é que, nos dois tipos de matriz, o tratamento químico da malha de juta fez incrementar a rigidez do material.

A seguir, é apresentada uma análise da variação do MOE dos compósitos, tomando-se por base uma comparação entre os tratamentos A e B das malhas (Figura 22).

Figura 22 - Análise Estatística do MOE das amostras com pré-tratamentos alcalinos A e B.



Fonte: o autor.

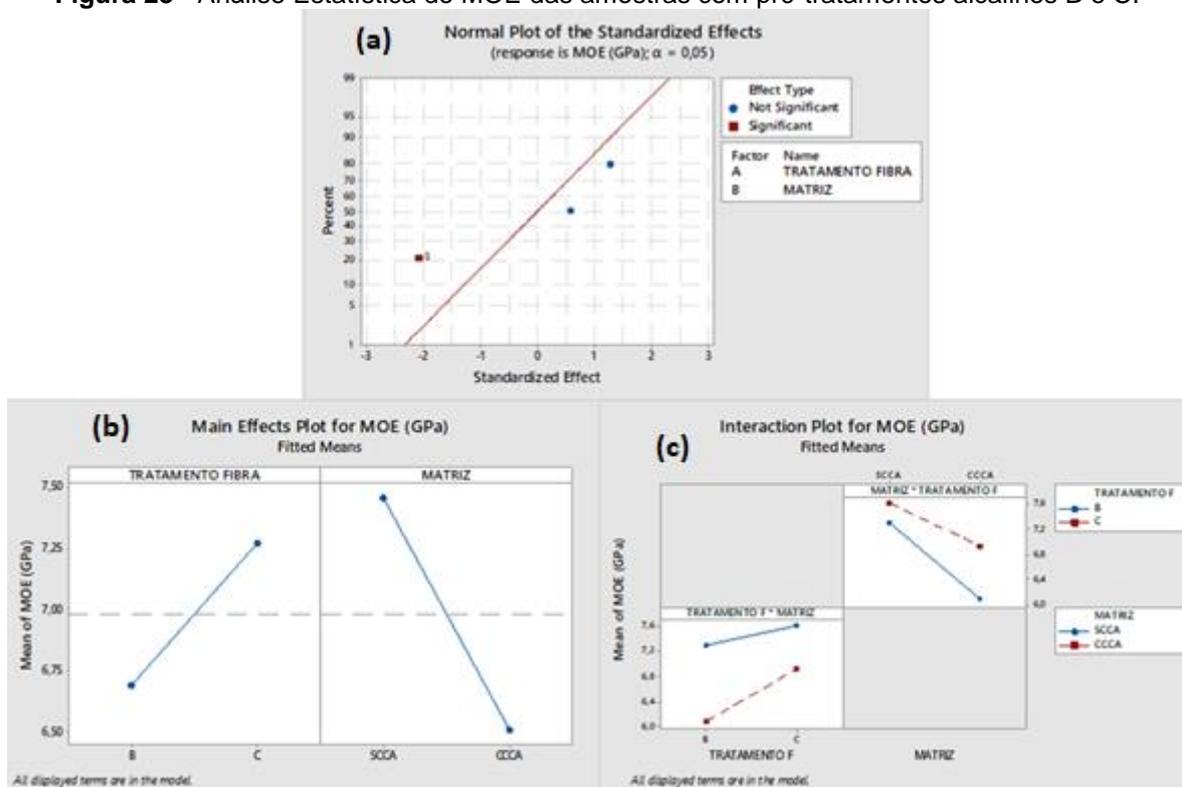
De acordo com a Figura 22a, a composição da matriz não apresenta impacto no MOE, diferentemente do reforço fibroso com tratamento alcalino, que causa alto impacto no MOE. As duas variáveis não interagem para ampliar o MOE das amostras.

A Figura 22b permite analisar separadamente os efeitos do tratamento da malha de juta e da presença ou ausência de CCA nos compósitos. As duas linhas mostram tendências opostas: enquanto a reta é positiva, do tratamento A para o tratamento B, o efeito da presença de CCA, representado pela reta com inclinação negativa, mostra claramente uma diminuição das médias do MOE.

A Figura 22c possibilita duas leituras. A primeira evidencia a tendência de incremento nos valores de MOE das amostras, levando-se em conta o pré-tratamento auferido à malha de juta, sendo que o incremento vai do tratamento A para o tratamento B, tanto no caso da matriz CCCA quanto da matriz SCCA, embora a inclinação da reta seja muito mais acentuada para as amostras SCCA. Outra leitura possível diz respeito à tendência diferenciada de variação do MOE, do tratamento A para o tratamento B. Para os compósitos que receberam o tratamento A em suas fibras, a inclinação da reta é ligeiramente positiva da matriz SCCA para a matriz CCCA. Por outro lado, para os compósitos que receberam tratamento B em suas fibras, a tendência de inclinação da reta representativa dos valores de MOE é negativa; ou seja: a presença de CCA associada aos tratamentos A e B das fibras de juta impactam de maneira diferente o MOE do CRF. Dito de outra forma, as variáveis matriz e pré-tratamento alcalino da malha de juta não interagem a ponto de alterar com regularidade o MOE dos compósitos.

A seguir, é apresentada uma análise da variação do MOE dos compósitos, tomando-se por base uma comparação entre os tratamentos B e C da malha tramada de juta (Figura 23).

Figura 23 - Análise Estatística do MOE das amostras com pré-tratamentos alcalinos B e C.



Fonte: o autor.

De acordo com a Figura 23a, a composição da matriz apresenta impacto significativo no MOE, diferentemente do tratamento alcalino do reforço fibroso. As duas variáveis, configuração da matriz e tratamento alcalino do reforço, não interagem para contribuir para o aumento do MOE. Ou seja, a conclusão é que a adição de CCA contribui mais para o MOE, tomando-se por base os tratamentos B e C, do que a composição da matriz SCCA.

A Figura 23b permite analisar separadamente os efeitos do tratamento da malha de juta e também da presença ou ausência de CCA nos compósitos e seu impacto no MOE. As duas retas mostram tendências distintas, já que apresentam inclinações diferentes. Do tratamento B para o C houve aumento nos valores do MOE. Por outro lado, as médias do MOE diminuem, quando à matriz é adicionada CCA. Visualmente, observa-se a inclinação positiva da reta para o tratamento e a inclinação negativa para a configuração da matriz. Conclui-se portanto que o tratamento auferido à malha de juta, nesse caso, tem impacto positivo no MOE.

A Figura 23c possibilita duas leituras. A primeira evidencia a tendência de incremento nos valores de MOE das amostras, levando-se em conta o pré-tratamento auferido à malha de juta, tanto para o caso de matriz sem quanto para a matriz CCCA, fato que é evidenciado pelas duas retas ascendentes. A inclinação da reta que mostra a variação do MOE para as amostras CCCA é maior do que a inclinação da reta da matriz SCCA. Outra leitura possível diz respeito à tendência de diminuição das médias dos valores de MOE (duas retas com inclinação negativa) tanto no tratamento B quanto no tratamento C, se comparamos a matriz sem e com CCA. Pode-se, com isso, concluir que a adição de CCA em compósitos com malha de juta pré-tratada de duas maneiras distintas (tratamentos A e B), tem impacto negativo no MOE.

Resumidamente, após cotejamento das análises anteriores pode-se concluir a respeito do MOE que:

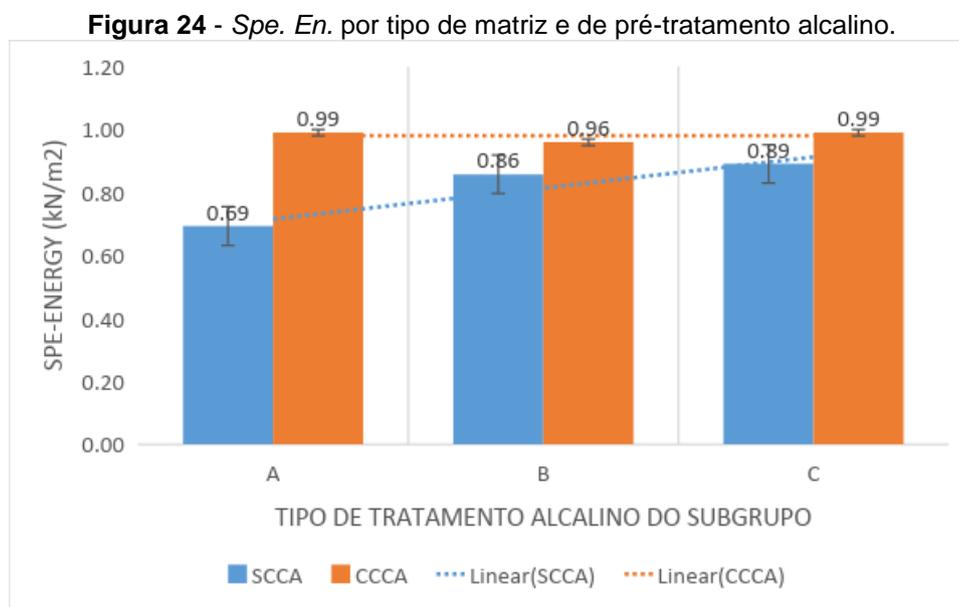
- compósitos cimentícios SCCA são mais rígidos do que compósitos com CCA;
- o tratamento químico da malha de juta fez incrementar a rigidez do material;
- as variáveis matriz e pré-tratamento alcalino da malha de juta utilizada como reforço não interagem a ponto de alterar com regularidade o MOE dos compósitos;

- o tratamento alcalino C associado à adição de CCA contribui mais para o MOE do que o tratamento B associado à mesma adição.

A seguir, é apresentada uma análise da variação da Energia Específica das amostras, em função tanto da configuração da matriz cimentícia quanto do reforço fibroso, a partir da análise dos gráficos de barras e, depois, das análises estatísticas.

3.3.3 Energia Específica

Na Figura 24 constam os valores médios da energia específica das 87 amostras, separadas segundo o tipo de tratamento químico auferido à malha de juta utilizada como reforço.



Fonte: o autor.

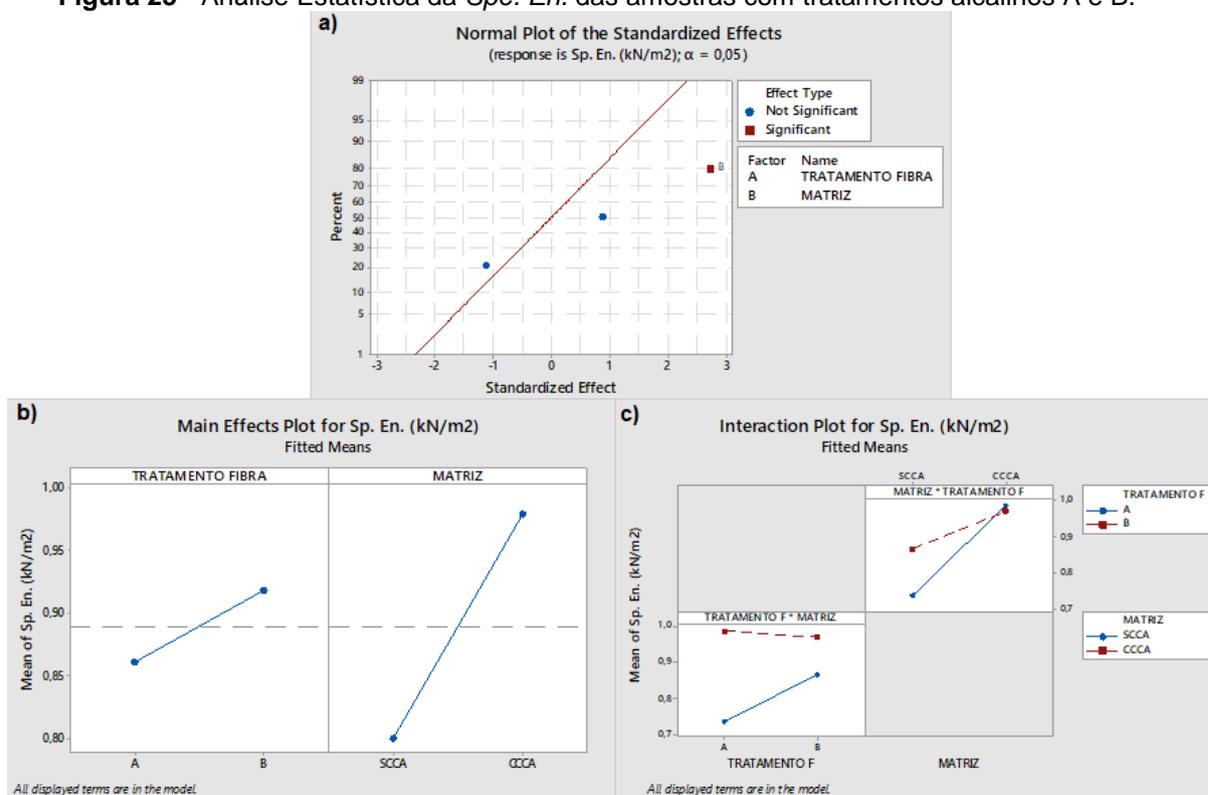
De acordo com a Figura 24, as linhas de tendência permitem afirmar que compósitos de matriz SCCA apresentam *Spe. En.* com valores mais baixos do que compósitos de matriz CCCA. Isso permite concluir que compósitos cimentícios de matriz sem CCA submetidos à flexão apresentam menores valores de tenacidade do que compósitos com CCA.

As linhas de tendência também permitem afirmar que a Energia Específica só varia com o tipo de tratamento químico auferido à malha tramada de juta nos casos em que a matriz é SCCA. A *Spe. En.* aumenta do tratamento A para o B; do A para o C e do B para o C. Por outro lado, a Energia Específica não varia, nos casos de matriz CCCA.

As amostras de matriz CCCA apresentaram valores superiores de tenacidade, para todas as formas de tratamento alcalino da malha de juta (A, B e C), quando comparadas com as amostras de matriz SCCA. Entre os dois tipos de matriz, o maior ganho em tenacidade foi observado nas amostras que receberam tratamento químico A à base de NaOH em temperatura ambiente (acréscimo de 43%). Quanto aos tratamentos B e C, o acréscimo foi, respectivamente de 12% e 11%.

A seguir, é apresentada uma análise da variação da energia específica dos compósitos, tomando-se por base uma comparação entre os tratamentos A e B das malhas (Figura 25).

Figura 25 - Análise Estatística da *Spe. En.* das amostras com tratamentos alcalinos A e B.



Fonte: o autor.

De acordo com a Figura 25a, a composição da matriz impacta positivamente a Energia Específica do compósito, diferentemente do reforço fibroso à base de malha de juta com tratamento alcalino, cujo impacto não é significativo. Quando as duas variáveis são analisadas conjuntamente o impacto não ocorre.

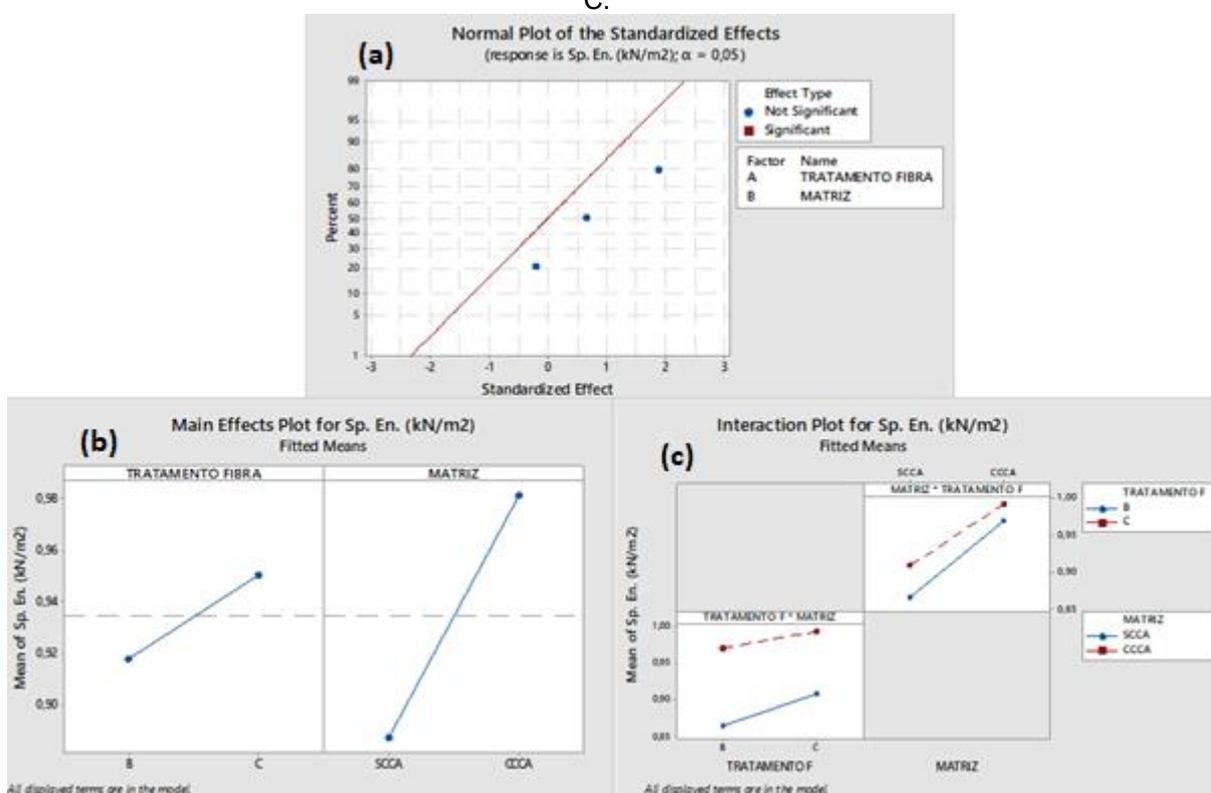
A Figura 25b permite analisar separadamente os efeitos do tratamento da malha de juta e da presença ou ausência de CCA nos compósitos. As inclinações das duas retas mostram tendências similares: ambas são positivas. Ou seja, os valores de Energia Específica aumentam do tratamento alcalino A para o B e

também dos compósitos SCCA para os compósito CCCA. Portanto, a energia específica é sensível às duas variáveis em análise.

A Figura 25c possibilita duas leituras. A primeira evidencia a tendência de incremento nos valores de Energia Específica (inclinação positiva da reta) das amostras, levando-se em conta o pré-tratamento auferido à malha de juta, sendo que o incremento vai do tratamento A para o tratamento B, no caso da matriz sem CCA, mas permanece praticamente estável no caso de matriz com CCA (inclinação ligeiramente negativa). Outra leitura possível diz respeito à tendência de aumento da Energia Específica, tanto nos casos de matriz sem como nos casos de matriz com CCA, tanto para o tratamento A quanto para o tratamento B. Ou seja, a presença de CCA tem impacto positivo na Energia específica para ambos os casos de tratamento do reforço fibroso, sendo essa uma conclusão importante para esta pesquisa.

A seguir, é apresentada uma análise da variação da Energia Específica dos compósitos, tomando-se por base uma comparação entre os tratamentos B e C da malha de juta (Figura 26).

Figura 26 - Análise Estatística da Energia Específica das amostras com tratamentos alcalinos B e C.



Fonte: o autor.

De acordo com a Figura 26a, a composição da matriz não apresenta impacto significativo na energia específica, da mesma forma que o reforço fibroso. Também, quando as duas variáveis são analisadas conjuntamente o impacto na Energia Específica inexistente. Ou seja, nenhum tipo de tratamento (B ou C) provocou impacto significativo na Energia específica das amostras.

A Figura 26b permite analisar separadamente os efeitos do tratamento da malha de juta e da presença ou ausência de CCA na Energia Específica dos compósitos. As duas retas mostram tendências similares, com inclinação positiva, mostrando um aumento da energia absorvida pelo compósito durante o teste de flexão, do tratamento alcalino B para o C e também o mesmo efeito da adição de CCA na matriz cimentícia. Isso mostra claramente que, comparado com o tratamento B, o tratamento alcalino C se mostrou mais eficaz fato que pode ser observado pela inclinação da reta representativa da análise da matriz. Por outro lado, a diferença entre os valores de energia específica é pequena, não chegando a ser significativa, conforme dito no parágrafo anterior.

A Figura 26c possibilita duas leituras. A primeira evidencia a tendência de incremento nos valores de Energia Específica das amostras, levando-se em conta o pré-tratamento auferido à malha de juta, sendo que o incremento vai do tratamento B para o tratamento C, tanto para matriz SCCA quanto para matriz CCCA, já que as duas retas apresentam inclinação positiva. Outra leitura possível diz respeito à tendência similar de variação dos valores de Energia Específica, tanto do tratamento B quanto do tratamento C. Ou seja, os tratamentos B e C da malha de juta apresentaram impacto positivo nos valores de energia específica, para compósitos com ou sem CCA. Há portanto indícios de que o pré-tratamento auferido à malha de juta para uso em CRF tem impacto positivo na Energia Específica dos fibrocimentos, assim como a adição de CCA.

3.3.4 Ensaios mecânicos

Após cotejamento das análises anteriores pode-se concluir a respeito da Energia Específica, parâmetro definidor de tenacidade, que:

- compósitos cimentícios de matriz SCCA submetidos à flexão apresentam menores valores de tenacidade do que compósitos CCCA.

- amostras de matriz CCCA apresentaram, respectivamente, valores de tenacidade 43%, 12% e 11% superiores para todas as formas de tratamento alcalino da malha de juta (A, B e C), quando comparadas com as amostras de matriz SCCA;

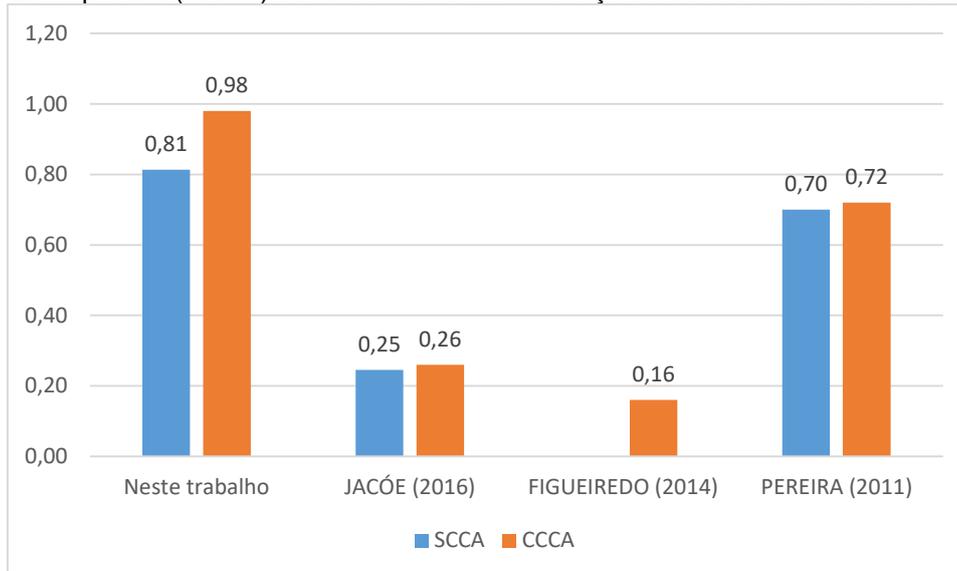
- a energia específica é sensível às duas variáveis em análise (adição de CCA e tratamento alcalino da malha de juta), embora em valores não significativos estatisticamente;

- a presença de CCA tem impacto positivo na Energia específica para todos os casos de tratamentos malha de juta (A, B e C), assim como a adição de CCA.

Jacóe (2016) analisou o desempenho de compósitos cimentícios reforçados com fibras de celulose sem a incorporação de malha tramada de juta no reforço. As fibras utilizadas foram obtidas por dois processos de polpação distintos: método organossolve e método *kraft*. Aquele consiste na utilização de solventes químicos aquosos e este no cozimento em solução de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S). Na comparação dos resultados de Jacóe (2016) e os desta pesquisa, em termos de Energia Específica, observa-se que fibrocimentos reforçados com polpas e com malha tramada de juta apresentam ganho de tenacidade da ordem de 224% em relação aos CRF, para os casos de matriz CCCA. Nos casos de matriz SCCA o ganho de tenacidade é da ordem de 277%, passando de 0,26 para 0,98 KN/m².

O ganho de tenacidade significa que os CFR com reforço de malha tramada de juta absorvem maior quantidade de energia mecânica antes de fraturar; ou seja, eles resistem mais à fratura do que o fibrocimentos com reforço celulósico à base apenas de polpas celulósicas. Os fibrocimentos com reforço de malha de juta apresenta fratura dúctil, associada à deformação plástica mais prolongada do que nos fibrocimentos reforçados apenas com polpas. A Figura 27 contém os valores de energia específica obtidos em outras pesquisas como as de (PEREIRA, 2011) e de (“EFEITO DA CURA EM AUTOCLAVE NO DESEMPENHO DOS FIBROCIMENTOS REFORÇADOS COM POLPAS Stefan Chaves Figueiredo Efeito da cura em autoclave no desempenho dos fibrocimentos reforçados com polpas celulósicas submetidos à degradação acelerada”, 2014), além da já citada pesquisa de (JACOÉ, 2016).

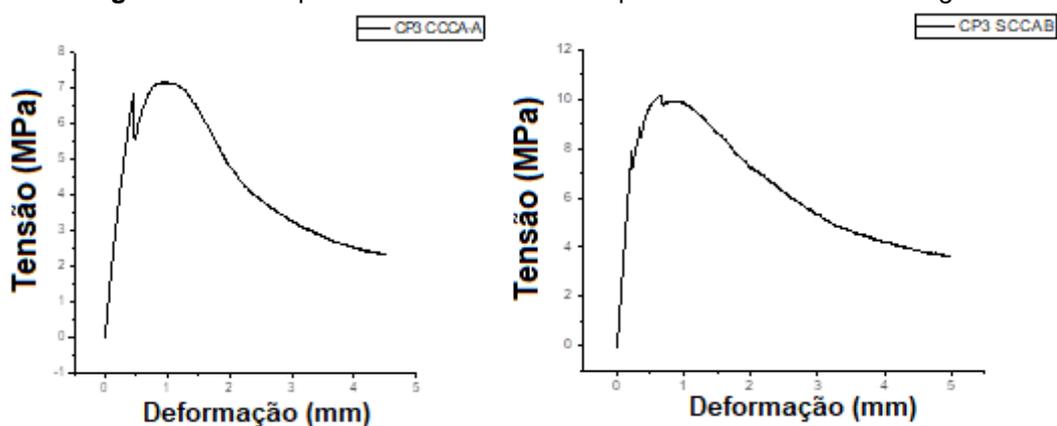
Figura 27 - Spe. En. (KN/m²) de fibrocimentos com reforço celulósico encontrados na literatura.



Fonte: o autor.

De uma maneira geral, as curvas de tensão e deformação de todas as amostras desta pesquisa (Figura 17) sinalizam a ocorrência do processo *strain hardening*, que reflete a melhoria da interface entre o reforço fibroso e a matriz cimentícia. Conforme as curvas de tensão x deformação, não houve ruptura das amostras, mas um comportamento *strain hardening*, com ganho de deformação na fase plástica. Dois casos prototípicos são apresentados na Figura 28.

Figura 28 - Exemplos de amostras com comportamento *strain hardening*.



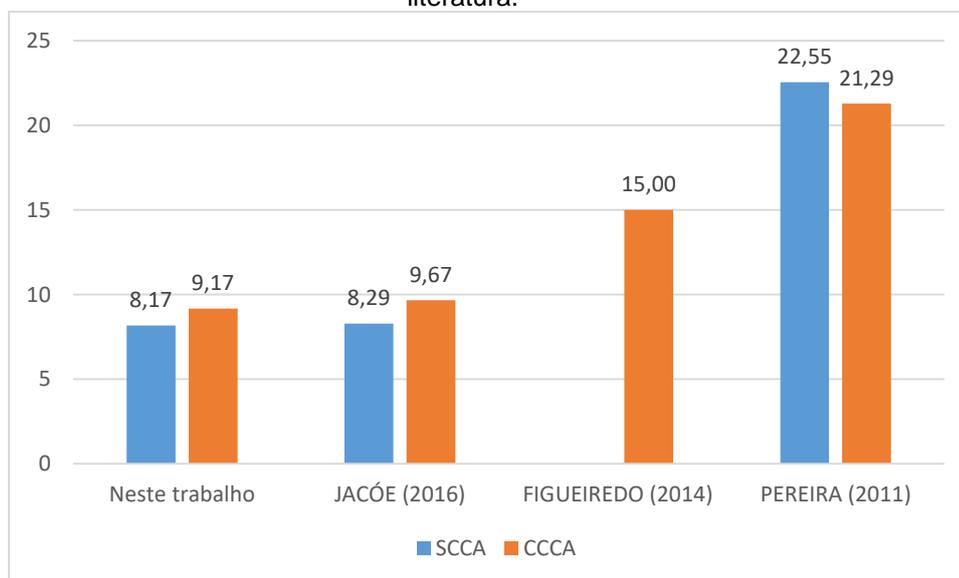
Fonte: o autor.

O comportamento *strain hardening* das amostras, em que se observa a ausência de ruptura e a tendência de ampliação da deformação na fase plástica, é compatível com o ganho de tenacidade observado neste trabalho, em comparação com outras pesquisas similares, encontradas na literatura (Figura 27). Nesse sentido, Figueiredo (2014) utilizou CCA em todas as amostras de sua pesquisa, sendo que a Energia Específica do material ficou em 0,16 KN/m². Por sua vez,

(PEREIRA, 2011) obteve valores de 0,70 e 0,72 (KN/ m²), respectivamente, para compósitos CCCA e SCCA, para o mesmo parâmetro.

Os valores de MOR obtidos nos trabalhos de (PEREIRA, 2011), (“EFEITO DA CURA EM AUTOCLAVE NO DESEMPENHO DOS FIBROCIMENTOS REFORÇADOS COM POLPAS Stefan Chaves Figueiredo Efeito da cura em autoclave no desempenho dos fibrocimentos reforçados com polpas celulósicas submetidos à degradação acelerada”, 2014) e (Jacoé, 2016) podem ser visualizados na Figura 29. Ressalta-se a proximidade entre os resultados do MOR das amostras desta pesquisa e os obtidos por Jacoé (2016). Em comparação com os trabalhos citados, os resultados desta pesquisa sinalizam o potencial do uso de malha tramada de juta como reforço de fibrocimentos.

Figura 29 - Valores de MOR (MPa) de fibrocimentos com reforço celulósico encontrados na literatura.



Fonte: o autor

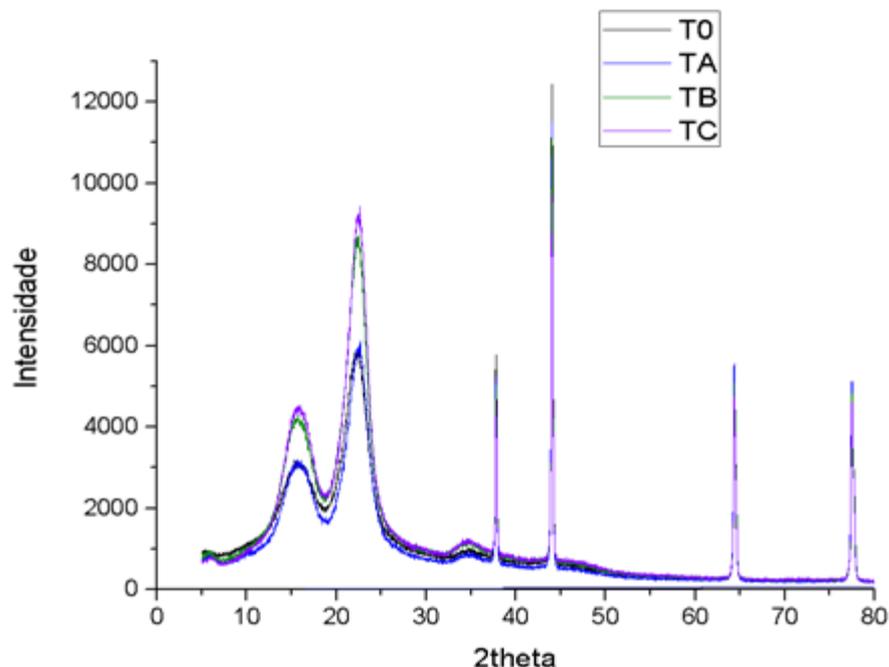
3.4 DIFRATOGRAMA DE RAIOS X E INFRAVERMELHO

As técnicas de Difração de raios X (DRX) e Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foram realizadas com vistas a se avaliarem possíveis alterações causadas pelos diferentes pré-tratamentos auferidos à malha tramada de juta na estrutura das fibras.

3.4.1 DRX

A Figura 30 contém quatro difratogramas com informações acerca dessa influência nos três tipos de pré-tratamento (TA, TB e TC, respectivamente) assim como em uma amostra sem tratamento (T0).

Figura 30 - Difratograma dos quatro tipos de amostras de fibras, conforme tratamentos alcalinos.



Fonte: o autor.

Em termos de quantidade de picos, os quatro difratogramas parecem similares. Os picos mais intensos correspondem às regiões cristalinas enquanto os picos de baixa intensidade referem-se às regiões amorfas, podendo indiciar a presença de lignina, hemiceluloses e celulose amorfa, conforme Santos, 2015. Embora não tenhamos calculado o índice de cristalinidade para cada tipo de tratamento, Santos (2015) afirma que isso seja possível por meio de um teste empírico.

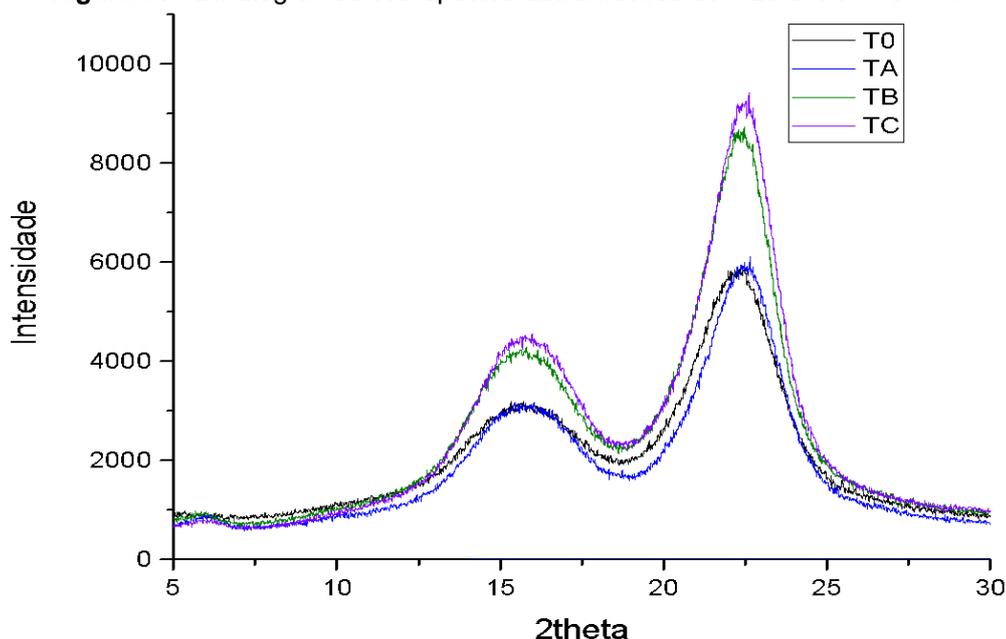
Em todos os tipos de tratamento, os picos mais significativos ocorreram em 2θ em torno de 44° , embora os valores de intensidade diminuam progressivamente no sentido das fibras sem tratamento para os tratamentos alcalinos A, B e C, respectivamente.

Ocorre um segundo pico em todos os difratogramas em torno de $2\theta = 22^\circ$. Santos (2015), em sua pesquisa acerca dos efeitos do tratamento em fibras vegetais (sisal e juta) para fins de uso em fibrocimentos, identificou dois padrões de intensidade, sendo um em $2\theta = 22^\circ$, referente a região cristalina da celulose e outro pico de baixa intensidade observado em torno de $2\theta = 15^\circ$, relacionado à

região amorfa, proveniente da hemiceluloses, lignina e celulose amorfa. Para identificação do pico de maior intensidade, Santos (2015) baseou-se em outros trabalhos encontrados na literatura (POLETTTO *et al.*, 2014; CAO *et al.*, 2014; LE TROEDEC *et al.*, 2008; SEDAN *et al.*, 2007). Para identificação do pico de baixa intensidade os trabalhos nos quais Santos (2015) se baseou foram (CAO *et al.*, 2014; SEDAN *et al.*, 2007).

Visualmente, os dois picos também podem ser observados nas amostras desta pesquisa. Com vistas a se verificar essa possibilidade, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 31, com informações mais detalhadas sobre a faixa dos difratogramas compreendida entre os ângulos de incidência variando de 5 a 30°, o que permite a visualização não apenas dos dois picos de intensidade como também dois tipos de comportamento das amostras, em função do tratamento alcalino.

Figura 31 - Difratogramas sobrepostos das amostras com 2θ entre 5° e 30°.



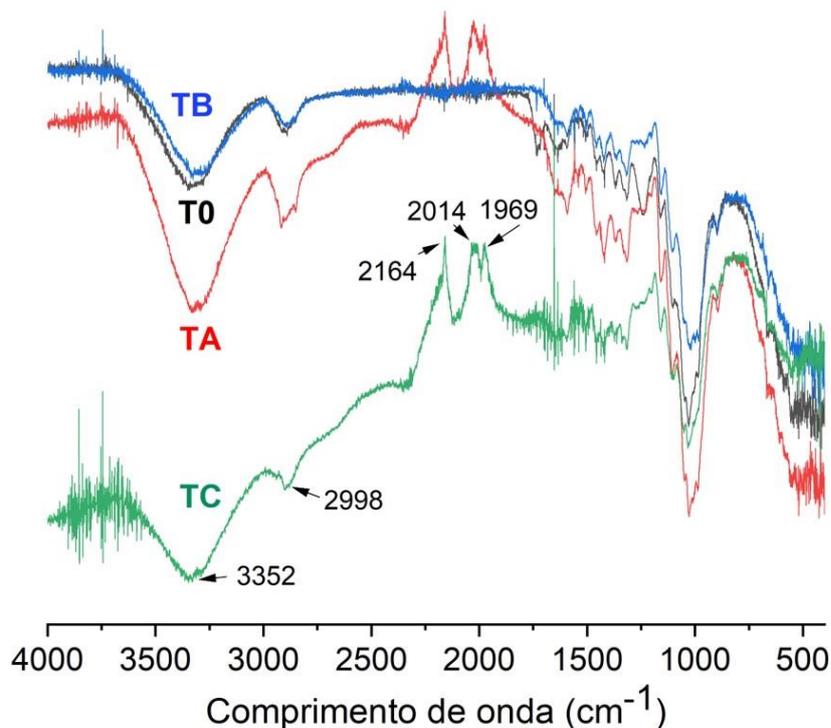
Por meio da Figura 31 é possível a visualização de dois picos de intensidade, sendo o primeiro nas proximidades de 2θ entre 15 e 16° (fase amorfa) e o segundo entre 22 e 23° (fase cristalina). Percebe-se que as amostras que não receberam tratamento químico, assim como aquelas que receberam o tratamento A, apresentam comportamento químico semelhante, ou seja, não houve alteração significativa na estrutura cristalina das fibras da malha tramada de juta em decorrência do pré-tratamento à base de NaOH à temperatura ambiente. Por outro lado, as amostras que receberam tratamento B ou C apresentam um pico de intensidade de raios característico de fase cristalina das fibras de juta. O aumento

da cristalinidade da fibra de juta pode estar relacionado com uma possível melhora no desempenho mecânico.

3.4.2 FTIR

A técnica do FTIR foi realizada com vistas a identificar a composição química das fibras de juta sem tratamento (T0) e também as submetidas aos três tratamentos alcalinos citados anteriormente (A, B e C). A Figura 32 apresenta os gráficos para transmitância³ (em %) em função do comprimento de onda (em cm^{-1}). Os gráficos individuais dos quatro tipos de amostras encontram-se no APÊNDICE.

Figura 32 - Transmitância das amostras com diferentes tratamentos alcalinos.



Fonte: o autor.

As regras básicas para interpretação dos espectros IR abrangem principalmente três regiões⁴. A banda que aparece no espectro das amostras na

³ Razão entre a energia transmitida pela amostra (I) e a energia incidente na amostra (I_0).

⁴ a) 4000 a 1300 cm^{-1} : absorções típicas de grupos funcionais importantes, como OH, NH, C=O, etc. As bandas características de grupos aromáticos aparecem entre 1610 e 1310 cm^{-1} . Também são observados todos os tipos de substituições de anéis aromáticos entre 2000 e 1667 cm^{-1} .

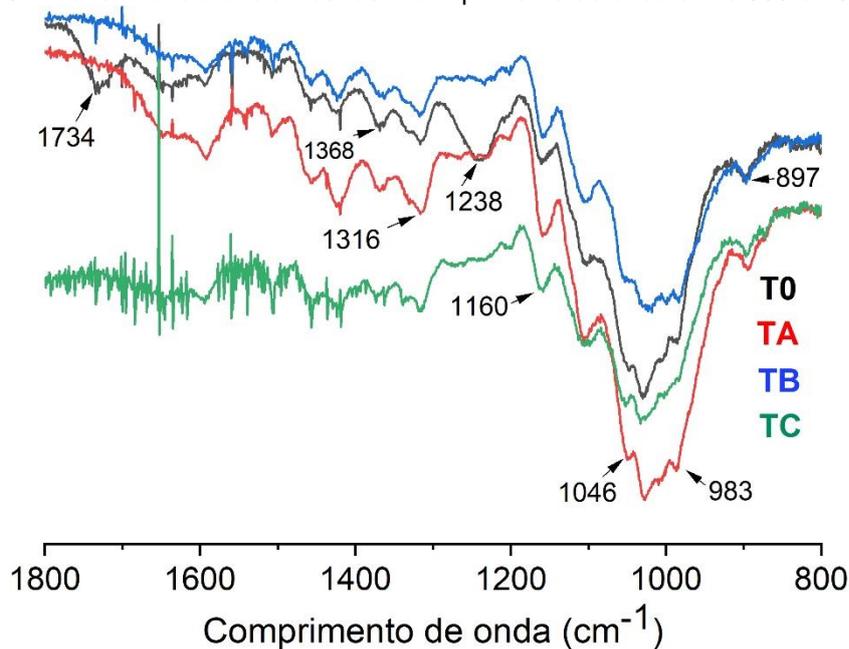
b) 1300 a 909 cm^{-1} : região intermediária do espectro conhecida como impressão digital. Inclui várias bandas e é de interpretação complexa, pois possui muitos modos de vibrações acoplados.

c) 909 a 650 cm^{-1} : verificação da ausência ou não de aromáticos, de modo que a ausência de bandas fortes destas bandas nesta região indica que a estrutura analisada não contém grupos

região de 3352cm^{-1} indica a presença de grupos hidroxilas O-H. Também caracteriza a vibração axial das hidroxilas da celulose nos carbonos 2, 3 e 6 da glicose. As amostras T0 e TB apresentam o mesmo comportamento com poucos grupos hidroxilas disponíveis para reações.

A banda observada em 2898cm^{-1} é atribuída ao estiramento vibracional simétrico e assimétrico dos grupos alifáticos CH_2 e CH_3 . Observa-se que a amostra TC apresenta a menor intensidade desta banda em relação às outras, indicando a extração em parte de lignina e hemiceluloses.

Figura 33 - Transmitância das amostras – comprimento de onda entre 800 e 1800 cm^{-1} .



Fonte: o autor.

A presença de $-\text{CH}_2$ na estrutura da lignina mostra a redução nos teores da mesma, após tratamentos alcalinos.

A formação da banda em 1734cm^{-1} (Figura 33) é atribuída ao estiramento $\text{C}=\text{O}$ dos grupos acetil e carboxílicos das xilanas (componentes das polioses) e também a grupos químicos da lignina. O desaparecimento desta banda para as amostras TA, TB e TC evidencia a extração de polioses (hemiceluloses) e fragmentos de lignina de baixa massa molar.

A vibração da banda em 1160cm^{-1} refere-se ao estiramento $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ em ligações beta glicosídicas. Após tratamentos alcalinos, observa-se que houve uma intensificação desta banda, mostrando o aumento dos teores de celulose. O mesmo

aromáticos. Outras bandas importantes ocorrem nesta região como estiramento de ligações $\text{C}-\text{X}$ (halogênio) e vibrações de esqueletos de CH_2 ($n \geq 4$).

ocorre entre as bandas 1046 e 983 cm^{-1} . Houve um aumento nesta faixa promovendo o aumento do teor de celulose.

Não houve variação significativa na intensidade da banda em 897 cm^{-1} , referente ao estiramento da ligação glicosídica de C-O-C, C-C-O e C-C-H de C(5) e C(6), após as hidrólises alcalinas. Isso mostra que não houve degradação ou hidrólise das cadeias de celulose após os tratamentos.

As vibrações ocorridas em 2164 cm^{-1} , 2014 cm^{-1} e 1969 cm^{-1} foram atribuídas ao estiramento C-O do CO_2 atmosférico, gerado pelo aparelho durante o ensaio.

A vibração em 1316 cm^{-1} foi atribuída à flexão de ligações C-H e C-O nos anéis aromáticos de polissacarídeos de celulose. O mesmo ocorreu para a vibração em 1027 cm^{-1} , referente ao estiramento da ligação C-O e deformação angular da ligação C-H dos polissacarídeos de celulose.

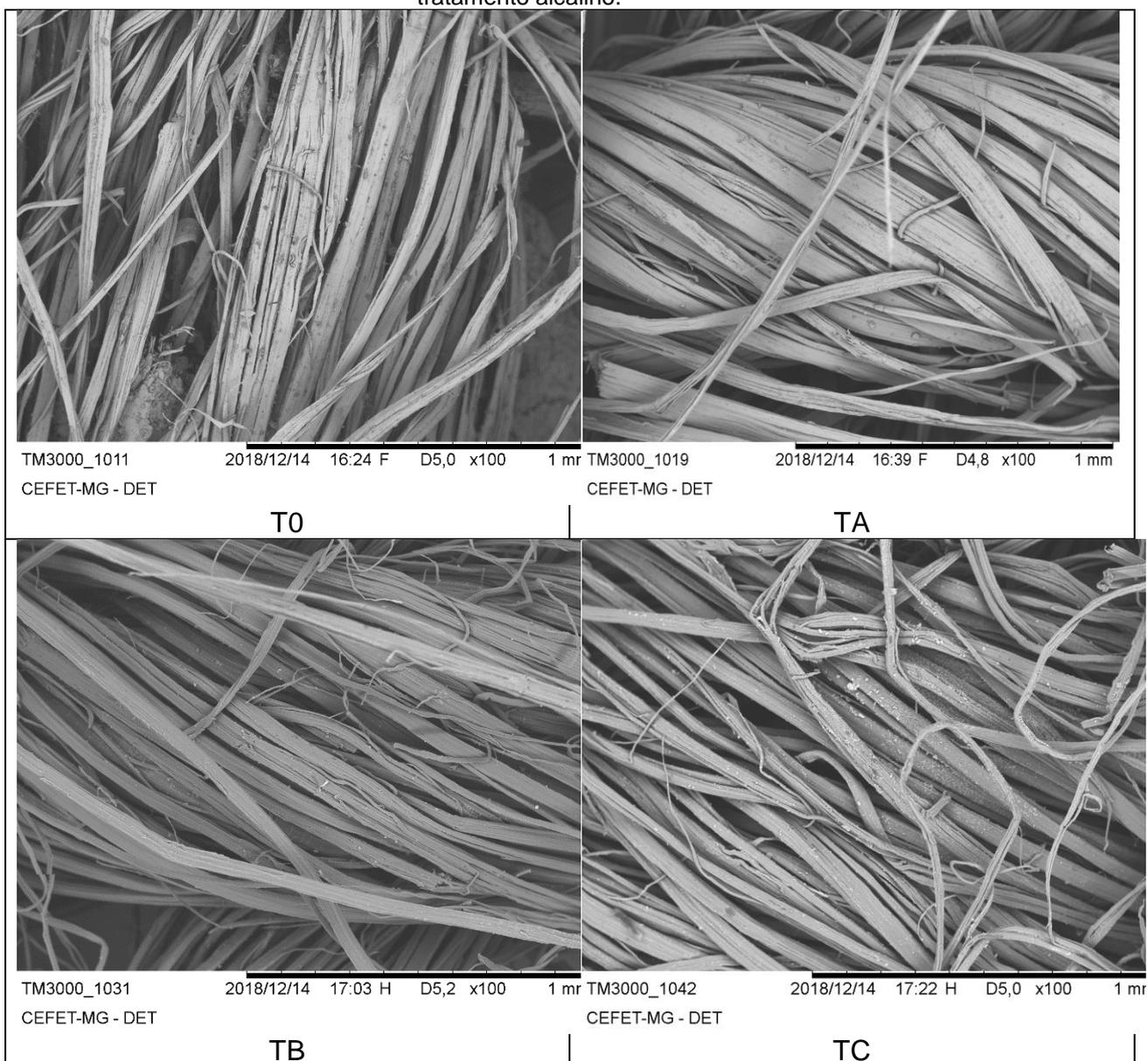
Também é interessante observar as vibrações em 1429 cm^{-1} e 898 cm^{-1} , atribuídas, respectivamente, às porções cristalinas e amorfas da celulose. Parece que o tratamento TB tornou a celulose mais organizada, enquanto o tratamento TC promoveu uma região mais desorganizada na celulose.

3.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A seguir são apresentadas imagens ampliadas das malhas de juta para os quatro tipos de amostras, com duas ampliações distintas (100x -

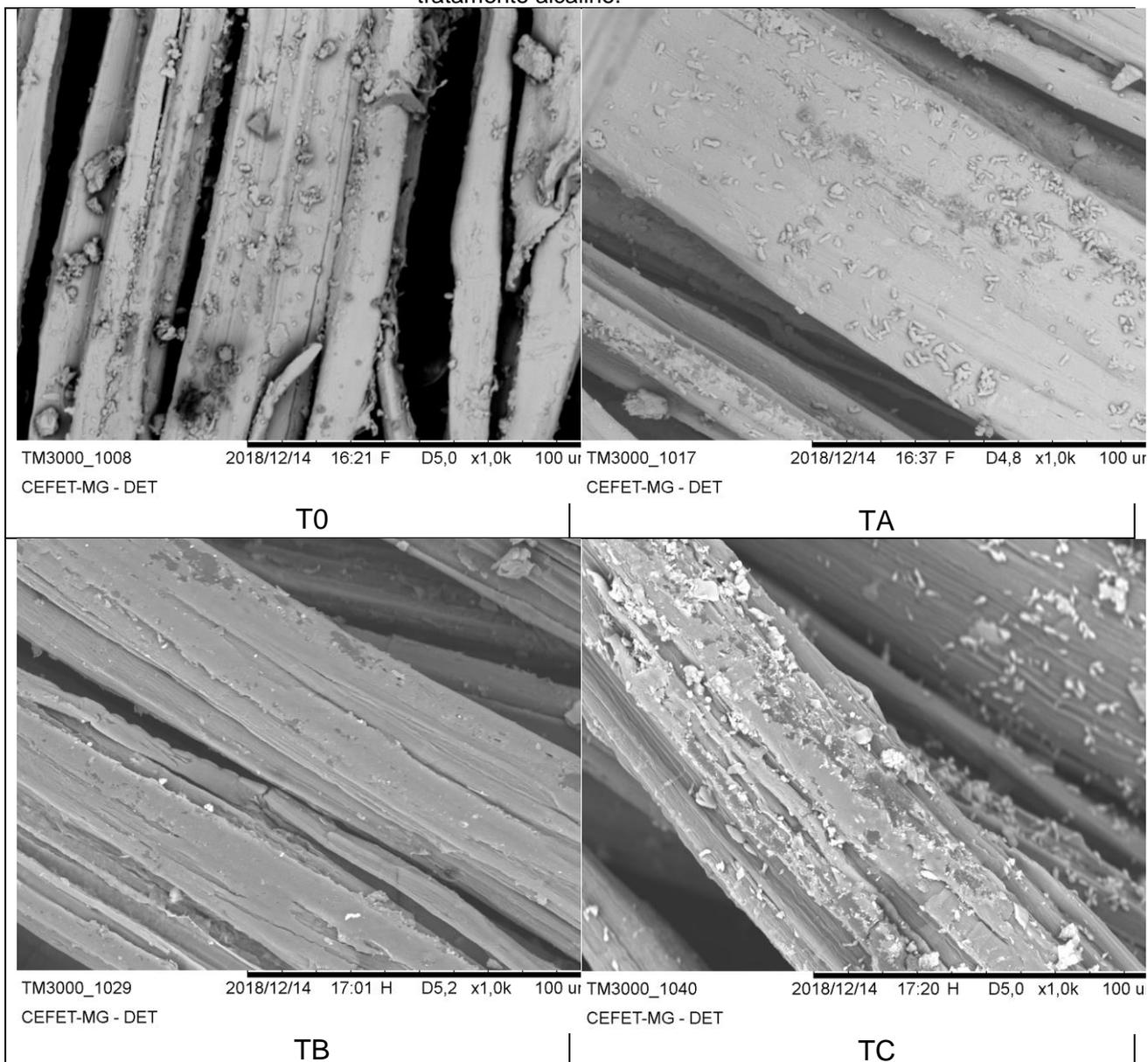
Figura 34 e 1.000x – **Figura 35**). Cada figura contém imagens com a mesma ampliação, recobrando as amostras com T0, TA, TB e TC.

Figura 34 - Imagens das malhas de juta obtidas por MEV e ampliadas 100X, para cada tipo de tratamento alcalino.



Fonte: o autor

Figura 35 - Imagens das malhas obtidas por MEV e ampliadas 1000x, para cada tipo de tratamento alcalino.



Fonte: o autor.

As imagens obtidas por MEV, representadas na

Figura 34 e na **Figura 35**, permitem afirmar que a malha de juta sem tratamento (T0) apresenta impurezas que impedem ou fragilizam a aderência do reforço com a matriz cimentícia. Por outro lado, as malhas que receberam tratamentos TA, TB e TC apresentam visualmente menores quantidades de impurezas, mas também alterações na morfologia das fibras. Aparentemente, há semelhanças entre as fibras das malhas que receberam os tratamentos A e B, e diferença com aquelas que receberam o tratamento C. Parece que o branqueamento causado nas malhas pelo TC desorganiza as fibras, deixando-as com um aspecto quebradiço, o que pode causar impacto na aderência das mesmas com a matriz cimentícia.

Com relação aos tratamentos A e B, embora apresentem certa similaridade nas imagens, deixam entrever, sobretudo pela **Figura 35**, que as fibras das malhas que receberam o tratamento B estão mais livres de impurezas do que aquelas que receberam o tratamento A, além de apresentarem uma organização mais homogênea das fibras. Essa regularidade na morfologia das fibras submetidas ao tratamento B pode garantir uma aderência também regular por toda a malha tramada, no meio da matriz cimentícia.

De uma maneira geral, as imagens obtidas pelo MEV permitem afirmar que entre os tratamentos da malha tramada de juta garantiram a redução de impurezas nas superfícies das fibras e, com a evolução do tratamento (de TA para TC) a introdução de maior rugosidade, como pode ser observado na **Figura 35** (TC). Mesmo assim, pelo aspecto visual, as imagens sugerem uma maior eficácia do tratamento B.

4 CONCLUSÕES

Há uma tendência de a presença de CCA em compósitos com reforço vegetal híbrido (polpas de pinus e malha tramada de juta) causar diminuição do Módulo de Ruptura. Provavelmente, haja incremento da proteção ao reforço, o que poderá ser verificado por testes de durabilidade, fator não observado neste trabalho. Por outro lado, o tipo de tratamento químico das malhas tramadas de juta tendem a provocar aumento do MOR, i.e., quanto mais branqueadas as malhas de juta, maior o MOR do compósito.

O tratamento alcalino das malhas tramadas de juta teve impacto positivo no MOE do fibrocimento. O tipo de pré-tratamento químico das malhas que mais fez incrementar a rigidez do material foi o tratamento B (imersão em solução de NaOH, por uma hora, com temperatura de 60°C e rotação constante). A adição de CCA tende a não ter impacto positivo no MOE, aos 21 dias depois da moldagem dos fibrocimentos.

O ganho em ductilidade foi expressivo nas amostras com 15% de CCA em substituição ao cimento e ao *filler* calcário. No caso das amostras de matriz CCCA, o tratamento alcalino das malhas de juta teve impacto direto na ductilidade do compósito, sendo que o tratamento em solução de NaOH e H₂O₂ mostrou-se mais eficaz. O comportamento *strain hardening* observado nas amostras possibilitou uma maior capacidade de deformação e atestou o potencial do uso de reforço híbrido com fibras de origem vegetal em compósitos cimentícios.

A técnica da Difração de raios X mostrou que os tratamentos químicos B e C da malha tramada de juta causaram impacto na estrutura das fibras, com pico considerável de cristalinidade. A técnica de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier sinalizou que o tratamento B da malha de juta tornou a celulose mais organizada do que no tratamento C. As imagens obtidas por MEV também sinalizaram uma melhor organicidade das fibras que receberam tratamentos B e C, com ênfase para o tratamento B.

Conciliando os ensaios de flexão com as técnicas de DRX e FTIR e, ainda, pautando-nos das imagens obtidas por MEV, conclui-se que o reforço híbrido constituído de polpas de pinus e malha tramada de juta pré-tratada quimicamente, associado à adição de CCA na matriz cimentícia, tem impacto positivo na

tenacidade de compósitos, parâmetro mecânico definidor de diversas aplicações, na área da construção.

Esta pesquisa aponta para uma perspectiva de utilização, em escala industrial, de materiais oriundos de fontes renováveis, a exemplo da malha tramada de juta e das polpas de pinus, em substituição ao asbesto, e da CCA na constituição de fibrocimentos.

Por outro lado, esta pesquisa se limitou a analisar o potencial do reforço híbrido de origem vegetal em fibrocimento, sem, contudo, verificar a durabilidade do compósito. Nesse sentido, outras investigações são necessárias para definir o ciclo de vida do produto e, conseqüentemente, seu potencial de mercado.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRANDT, A. M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. **Composite Structures**, v. 86, n. 1–3, p. 3–9, nov. 2008.

BUFALINO, L. et al. How the chemical nature of Brazilian hardwoods affects nanofibrillation of cellulose fibers and film optical quality. **Cellulose**, n. 22, p. 3657–3672, 2015.

CHATVEERA, B.; LERTWATTANARUK, P. Durability of conventional concretes containing black rice husk ash. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 1, p. 59–66, jan. 2011.

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

EFEITO DA CURA EM AUTOCLAVE NO DESEMPENHO DOS FIBROCIMENTOS REFORÇADOS COM POLPAS Stefan Chaves Figueiredo Efeito da cura em autoclave no desempenho dos fibrocimentos reforçados com polpas celulósicas submetidos à degradação acelerada. 2014.

FARUK, O. et al. **Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010** *Progress in Polymer Science*, 2012.

FIDELIS, M. E. A. **DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS TÊXTEIS REFORÇADOS COM FIBRAS DE JUTA**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

GOMES, C. L. **AVALIAÇÃO MECÂNICA E DE DURABILIDADE DE CONCRETOS FABRICADOS COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO E CINZA DE CASCA DE ARROZ**. [s.l.] CEFET-MG Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2019.

IKAI, S. et al. Asbestos-free technology with new high toughness polypropylene (PP) fibers in air-cured Hatschek process. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 2, p. 171–180, fev. 2010.

JACOÉ, R. B. **Cura com carbonatação acelerada como estratégia para maior durabilidade de fibrocimentos reforçados por polpas celulósicas processadas por diferentes métodos**. [s.l.] Centro Federal de Educação Tecnológica de MG, 2016.

JÚNIOR, M. G. et al. Starch/PVA-based nanocomposites reinforced with

bamboo nanofibrils. **Industrial Crops and Products**, n. 70, p. 72–83, 2015.

JUSOH, M. J. B. **STUDIES ON THE PROPERTIES OF WOVEN NATURAL FIBERS REINFORCED UNSATURATED POLYESTER COMPOSITES**. [s.l.] Universiti Sains Malaysia, 2008.

LAMBERT, P. et al. Dual function carbon fibre fabric strengthening and impressed current cathodic protection (ICCP) anode for reinforced concrete structures. **Materials and Structures**, v. 48, n. 7, p. 2157–2167, jul. 2015.

LI, X.; TABIL, L. G.; PANIGRAHI, S. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 15, n. 1, p. 25–33, 2007.

MÒNICA ARDANUY ROMILDO DIAS TOLEDO FILHO, J. C. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. **Construction and Building Materials**, 2015.

ONUAGULUCHI, O.; BANTHIA, N. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 68, p. 96–108, abr. 2016.

PAKRAVAN, H. R.; LATIFI, M.; JAMSHIDI, M. **Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review** **Construction and Building Materials**, 2017.

PEREIRA, M. A. **Influência da temperatura e umidade nos ciclos de degradação acelerada de fibrocimentos com cinza de casca de arroz como adição mineral**. [s.l.] CEFET-MG, 2011.

PIRES, E. N. Efeito do Tratamento Alcalino de Fibras de Juta no Comportamento Mecânico de Compósitos de Matriz Epóxi. **Polímeros**, v. 22, n. 4, p. 339–344, 2012.

RAMAKRISHNA, G.; T. SUNDARARAJAN. Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. **Cement & Concrete Composites** 27, v. 27, p. 575–582, 2015.

RILEM, T. C. 49 T. TESTING METHODS FOR FIBRE REINFORCED CEMENT-BASED COMPOSITES. **Matériaux et Constructions**, v. 17, n. 102, p. 440–456, 1984.

SANTOS, M. R. **Efeito do tratamento com ciclos de molhagem e secagem na composição química das fibras vegetais de sisal e juta com perspectiva para utilização como reforço em compósitos cimentícios**. [s.l.] Universidade

Federal do Rio de Janeiro, 2015.

SNOECK, D., N. D. B. From straw in bricks to modern use of microfibers in cementitious composites for improved autogenous healing--a review. **Construction and Building Materials**, n. 1, 2015.

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

APÊNDICE

Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) dos 4 tipos de amostras com diferentes tratamentos alcalinos da malha tramada de juta, na extensão comprimento de 4000 a 400 cm^{-1}

