



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS BLUMENAU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA TÊXTIL

Ana Paula Hiller

Desenvolvimento de compósito inteligente de juta com agente termocrômico

Blumenau
2022

Ana Paula Hiller

Desenvolvimento de compósito inteligente de juta com agente termocrômico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Têxtil

Orientadora: Prof. Fernanda Steffens, Dra.

Coorientadora: Prof. Andrea Cristiane Krause Bierhalz, Dra.

Blumenau

2022

Ficha de identificação da obra

Hiller, Ana Paula

Desenvolvimento de compósito inteligente de juta com agente termocrômico / Ana Paula Hiller ; orientadora, Fernanda Steffens , coorientadora, Andrea Cristiane Krause Bierhalz , 2022.

108 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil, Blumenau, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Engenharia têxtil. 3. Têxteis inteligentes. 4. Compósito reforçado com juta. 5. Juta termocrômica. I. , Fernanda Steffens. II. , Andrea Cristiane Krause Bierhalz. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil. IV. Título.

Ana Paula Hiller

Título: Desenvolvimento de compósito inteligente de juta com agente termocrômico

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof., Dr. José Alexandre Borges Valle
Instituição UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

Prof., Dr. José Heriberto Oliveira do Nascimento
Instituição UFRN – Universidade Federal de Rio Grande do Norte

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Têxtil.

Prof.(a), Dr(a) Rita de Cássia Siqueira Curto Valle
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof.(a), Dr.(a) Fernanda Steffens
Orientador

Blumenau, 2022.

Este trabalho é dedicado a Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em especial ao programa de Pós-graduação Graduação em Engenharia Têxtil (PPGTEX) de Blumenau pela infraestrutura, materiais e equipamentos disponibilizados para o desenvolvimento deste trabalho. À CAPES, em especial, pelo apoio e suporte da bolsa de estudos durante esse período de pandemia.

Agradeço a Deus, por ser o meu conforto espiritual, iluminar o meu caminho e me conceder sabedoria para ter chegado até este momento.

Quero agradecer o Prof. Dr. Fernando Ribeiro Oliveira (*in memorium*), por ter abraçado minha causa, me auxiliado em todas as dificuldades encontradas e por não ter medido esforços para que eu pudesse estar aqui hoje. O meu muitíssimo obrigada à Profa. Dra. Fernanda Steffens, pela atenção e orientação desta pesquisa, por não medir esforços em me ajudar e garantir a conclusão deste trabalho, sempre me incentivando e orientando com muito carinho. Agradecer também à Profa Dra. Andrea Cristiane Krause Bierhals pela coorientação e auxílio durante toda a trajetória, contribuindo de forma tão assertiva ao trabalho, bem como aos demais professores da UFSC PGETEX que se fizeram presentes na minha jornada.

Ao laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) da UFSC Florianópolis pela prontidão na realização do meu MEV. Ao Laboratório de Controle e Processos de Polimerização (LCP) da UFSC Campus Florianópolis pela análise de TGA desenvolvida para este trabalho. À Central de Análises (EQA) da UFSC por todo apoio e suporte no desenvolvimento das análises de DSC e FTIR.

Aos meus pais e minha irmã, nomeadamente, Alari, Isabel e Sophie, a minha eterna gratidão por todo o amor que sempre me deram, por nunca terem me deixado desistir dos meus sonhos e pelos esforços realizados para que eu pudesse chegar até aqui, se estou chegando onde quero chegar é porque vocês me ensinaram a lutar com dignidade.

Ao meu amor e companheiro Samuel, pelo apoio e incentivo em todos os momentos desta caminhada, seu apoio, companhia e carinho foram essenciais para que eu concluísse o mestrado. És calma em meio à minha tempestade.

Aos meus amigos e à minha família, que por estarem sempre ao meu lado tornaram a realização deste trabalho menos árdua e mais divertida, especialmente à minha melhor amiga Gabriela Richter e minha madrinha Cintia.

Aos demais colegas com quem convivi e pude ter o apoio durante esse período de aprendizado, nomeadamente Kainan e Leila. Obrigada pela companhia e pelos momentos que compartilhamos.

Finalmente, o meu muito obrigada a todas as pessoas que, embora não tenham sido nomeadas, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

Nos últimos anos, o mercado vem manifestando um interesse crescente em agregar valor aos materiais têxteis através da busca por processos naturais e menos prejudiciais ao meio ambiente. Ainda, projetos vêm sendo criados como intuito de uma conscientização global em prol da sustentabilidade, como é o caso da Agenda 2030 da ONU. Neste contexto, a utilização de fibras naturais a partir de plantas permite conferir propriedades muito atraentes, como biodegradabilidade, proteção UV, isolamento acústico, entre outros. Além disso, existem tecidos criados a partir de fibras naturais que ainda apresentam baixo valor durante sua comercialização, e o desenvolvimento de novos produtos, com elevado valor agregado, torna-se uma possibilidade interessante para materiais que geralmente são descartados. Paralelo a isso, o avanço da tecnologia proporciona a possibilidade que esses tecidos possam ser capazes de ganhar propriedades inovadoras após sua funcionalização e serem transformados em compósitos inteligentes, capazes de responder a estímulos externos. Por se tratar de um assunto até o momento pouco estudado, não foram encontradas na literatura publicações acerca do tema de compósitos inteligentes a partir de tecido de juta. Desta forma, a proposta deste trabalho foi funcionalizar um tecido proveniente da fibra de juta com agente termocrômico com o intuito de aplicá-lo como reforço à um compósito, utilizando como matriz resina de poliéster cristal, tornando-o um material com propriedade inteligente, sendo capaz de reagir termicamente ao meio em que é inserido. Ao verificar a morfologia das amostras a partir da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), pode-se observar o agente funcionalizante bem distribuído e envolto à fibra de juta. Ao verificar os grupos químicos presentes nas amostras por meio da análise de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) confirmou-se a presença do agente funcionalizante na juta a partir da presença da banda -NH . Para a verificação das características térmicas das amostras analisou-se a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e a Análise Termogravimétrica (TGA), onde foi comprovado que o agente não altera as propriedades térmicas do tecido. Através das análises de espectrofotometria de reflectância foram observadas as coordenadas L^* , a^* e b^* dos tecidos alvejados e funcionalizados. Quando analisado o ΔE das amostras funcionalizadas em 4 pontos distintos, verificou-se boa homogeneidade do agente termocrômico no tecido. O efeito *aging* do agente termocrômico foi avaliado tanto no tecido como no compósito para 1, 15 e 30 dias após a funcionalização, onde foi observado para ambas as amostras um ligeiro aumento do valor de b^* , o que indica certa perda da coloração azul na amostra. Foi analisado o valor de K/S para as amostras funcionalizadas de tecido e compósito após 1, 15 e 30 dias, o qual evidenciou uma força colorística mais elevada para o compósito. Portanto, verificou-se a transferência do agente funcionalizante para o tecido, bem como para o compósito polimérico reforçado por estas fibras. Com isso, observou-se que o compósito reforçado com tecido de juta funcionalizado apresentou resultados satisfatórios, possibilitando sua utilização em outras áreas de aplicação.

Palavras-chave: Biocompósito; Fibras naturais; Funcionalização; Poliéster cristal.

ABSTRACT

In recent years, the market has shown a growing interest in adding value to textile materials through the search for natural processes that are less harmful to the environment. Also, projects have been created with the aim of raising global awareness in favor of sustainability, as is the case of the UN 2030 Agenda. In this context, the use of natural fibers from plants provides very attractive properties, such as biodegradability, UV protection, acoustic insulation, among others. In addition, there are fabrics created from natural fibers that still have low value during their commercialization, and the development of new products, with high added value, becomes an interesting possibility for materials that are usually discarded. Parallel to this, the advancement of technology provides the possibility that these tissues may be able to gain innovative properties after their functionalization and be transformed into intelligent composites, capable of responding to external stimuli. As it is a subject that has been little studied so far, no publications on the subject of smart composites from jute fabric were found in the literature. Thus, the purpose of this work was to functionalize a fabric from jute fiber with a thermochromic agent in order to apply it as a reinforcement to a composite, using crystal polyester resin as a matrix, making it a material with intelligent property, being capable of thermally reacting to the environment in which it is inserted. When checking the morphology of the samples using Scanning Electron Microscopy (SEM), the functionalizing agent was well distributed and wrapped around the jute fiber. By verifying the chemical groups present in the samples by means of Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) analysis, the presence of the functionalizing agent in the jute was confirmed from the presence of the $-NH$ band. To verify the thermal characteristics of the samples, Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Thermogravimetric Analysis (TGA) were analyzed, which proved that the agent does not alter the thermal properties of the tissue. Through reflectance spectrophotometry analysis, the L^* , a^* and b^* coordinates of the targeted and functionalized tissues were observed. When the ΔE of the functionalized samples was analyzed at 4 different points, good homogeneity of the thermochromic agent in the tissue was verified. The aging effect of the thermochromic agent was evaluated both in the fabric and in the composite for 1, 15 and 30 days after functionalization, where a slight increase in the b^* value was observed for both samples, which indicates a certain loss of blue coloration in the sample. The K/S value for the functionalized tissue and composite samples was analyzed after 1, 15 and 30 days, which showed a higher color strength for the composite. Therefore, there was a transfer of the functionalizing agent to the fabric, as well as to the polymeric composite reinforced by these fibers. With this, it was observed that the composite reinforced with functionalized jute fabric presented satisfactory results, allowing its use in other areas of application.

Keywords: Biocomposite; Natural fiber; Functionalization; Crystal polyester.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação das fibras têxteis.....	25
Figura 2 – Estrutura genérica das fibras naturais.....	27
Figura 3 – Representação das fibrocélulas, fibrilas, microfibrilas e cristais de celulose (a) e seção transversal da fibra de juta (b).....	29
Figura 4 – Corte (a) e secagem (b) do processo de produção das fibras de juta.....	30
Figura 5 – Tecido de juta com malha aberta (a) e bobina de tecido de juta (b).....	30
Figura 6 – Exemplo de substrato funcionalizado com material termocrômico reversível.....	36
Figura 7 – Principais reforços de matriz em compósitos: (a) particulado, (b) fibras curtas e (c) fibras longas.....	41
Figura 8 – Tecido de juta utilizado como matéria-prima para a obtenção dos compósitos.....	52
Figura 9 – Etapas de desenvolvimento do trabalho.....	53
Figura 10 – Curva do alvejamento.....	54
Figura 11 – Curva de cationização.....	55
Figura 12 – Molde fechado (a), parte inferior do molde (b), parte superior do molde (c).....	56
Figura 13 – Disposição dos materiais no molde do compósito.....	56
Figura 14 – Espectrofotômetro DATACOLOR 500.....	59
Figura 15 – Comparativo entre as amostras sem (a) e com alvejamento (a).....	61
Figura 16 – Comparativo das amostras sem (a) e com (b) agente cationizante.....	62
Figura 17 – Comparativo entre as amostras de tecido alvejado e cationizado (a) e funcionalizado (b).....	63
Figura 18 – Aplicação da resina no tecido de juta (a) e resultado do compósito após 24h (b).....	64
Figura 19 – Compósito produzido com reforço de tecido de juta alvejada e cationizada (a) e com juta funcionalizada (b).....	64
Figura 20 – Micrografias das amostras de juta alvejada (a), (b) e (c) e funcionalizada (d), (e) e (f).....	65
Figura 21 – Micrografias das amostras de compósito reforçado com juta alvejada e cationizada (a) e funcionalizada (b).....	66
Figura 22 – FTIR do tecido reforçado com tecido de juta alvejada e funcionalizada.....	66
Figura 23 – Curvas de DSC do tecido alvejado e cationizado.....	69
Figura 24 – Curvas de DSC do tecido funcionalizado.....	70

Figura 25 – Curvas de DSC do compósito reforçado com tecido alvejado e cationizado.....	71
Figura 26 – Curvas de DSC do compósito reforçado com tecido funcionalizado.....	72
Figura 27 – TGA e DTG do tecido alvejado e cationizado.....	74
Figura 28 – TGA e DTG do tecido funcionalizado.....	75
Figura 29 – TGA e DTG do compósito reforçado pelo tecido alvejado e cationizado.....	76
Figura 30 – TGA e DTG compósito reforçado pelo tecido funcionalizado.....	76
Figura 31 – Aplicação de calor nos compósitos funcionalizados.....	78
Figura 32 – Placa de aquecimento (a) e compósito após aplicação de calor por meio da placa (b).....	78
Figura 33 – Tecido de juta <i>in natura</i> (a), tecido alvejado e cationizado (b), tecido funcionalizado (c), compósito reforçado com tecido alvejado e cationizado (d) e compósito reforçado com tecido funcionalizado (e).....	79
Figura 34 – Ação do agente termocrômico no tecido de juta.....	80
Figura 35 – Ação do agente termocrômico no compósito reforçado com tecido de juta.....	81
Figura 36 – Análise das coordenadas colorimétricas do tecido de juta funcionalizado após 1, 15 e 30 dias.....	85
Figura 37 – Análise das coordenadas colorimétricas do compósito de juta funcionalizada após 1, 15 e 30 dias.....	86
Figura 38 – Gráfico comparativo dos valores obtidos do K/S para o tecido e compósito funcionalizados.....	88
Figura 39 – Gráfico comparativo dos valores obtidos do K/S para o tecido e compósito funcionalizados no primeiro dia.....	89

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de cromismo.....	33
Quadro 2 – Aplicações e resultados após a funcionalização de têxteis termocrômicos.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de compósitos de fibras naturais e epóxi.....	45
Tabela 2 – Resultados de Tg da DSC.....	74
Tabela 3 – Leitura das cores por quadrantes.....	82
Tabela 4 – Coordenadas colorimétricas dos tecidos.....	82
Tabela 5 – Coordenadas colorimétricas do tecido alvejado e cationizado e do compósito	83
Tabela 6 – Coordenadas colorimétricas do tecido funcionalizado e do compósito	83
Tabela 7 – Coordenada colorimétrica L* do tecido funcionalizado ao longo do tempo.....	106
Tabela 8 – Coordenada colorimétrica a* do tecido funcionalizado ao longo do tempo.....	106
Tabela 9 – Coordenada colorimétrica b* do tecido funcionalizado ao longo do tempo.....	106
Tabela 10 – Coordenada colorimétrica L* do compósito reforçado com tecido funcionalizado ao longo do tempo.....	107
Tabela 11 – Coordenada colorimétrica a* do compósito reforçado com tecido funcionalizado ao longo do tempo.....	107
Tabela 12 – Coordenada colorimétrica b* do compósito reforçado com tecido funcionalizado ao longo do tempo.....	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIT Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção

DSC Calorimetria Diferencial de Varredura

DTA Análise Térmica Diferencial

DTG Análise Termogravimétrica Derivada

EMF Efeito de Memória de Forma

FTIR Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

LCE Líquido Cristalino Nemático Termo Responsivo

LMF Ligas de Memória de Forma

MAPP Polipropileno Anidrido Maleico

MEV Microscopia Eletrônica de Varredura

ODS Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU Organização das Nações Unidas

PDDA-CL Poli (cloreto de dialildimetilamônio)

PEEK Poliéter éter-cetona

PPS Sulfeto de polifenileno

RIM Moldagem por Injeção de Resina

R-RIM RIM reforçado

RTM Moldagem por Transferência da Resina

TGA Análise Termogravimétrica

UV Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

a^*	Eixo vermelho/verde
b^*	Eixo amarelo/azul
L^*	Luminosidade
Δa	Diferença de cor no eixo vermelho/verde
Δb	Diferença de cor no eixo amarelo/azul
ΔL	Diferença de cor no eixo da luminosidade
ΔE	Delta E – Diferença de cor
K/S	Intensidade de cor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 ENQUADRAMENTO DA PROBLEMÁTICA DO ESTUDO	20
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 Objetivo Geral	21
1.2.2 Objetivos Específicos	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL	22
2.2 SUSTENTABILIDADE E A INDÚSTRIA TÊXTIL	23
2.3 FIBRAS TÊXTEIS	24
2.2.1 Fibras naturais	26
2.2.1.1 <i>Fibra de juta</i>	28
2.4 TÊXTEIS INTELIGENTES	31
2.4.1 Têxteis com propriedades crômicas	32
2.4.1.1 <i>Têxteis termocrômicos</i>	34
2.4.1.2 <i>Têxteis hidrocromicos</i>	37
2.4.1.3 <i>Têxteis fotocromicos</i>	38
2.5 MATERIAIS COMPÓSITOS	39
2.5.1 Compósitos poliméricos	41
2.5.2 Fabricação dos compósitos poliméricos termorrígidos	43
2.5.3 Compósitos reforçados com tecidos e fibras naturais	45
2.5.4 Biocompósitos	47
2.5.5 Compósitos inteligentes	49
2.5.7 Efeito <i>aging</i> em materiais compósitos	49
3 MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	51

3.2 Materiais	51
3.3 Métodos	52
3.2.1 Preparação da fibra para o processo de incorporação do pigmento termocrômico	53
3.2.2 Processo de funcionalização	55
3.2.3 Preparação dos compósitos	55
3.2.4 Análises físico-químicas	56
3.2.4.1 <i>Microscopia Eletrônica de Varredura</i>	57
3.2.4.2 <i>Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier</i>	57
3.2.4.3 <i>Calorimetria Exploratória Diferencial</i>	57
3.2.4.4 <i>Análise Termogravimétrica (TGA)</i>	58
3.2.4.5 <i>Análises no espectrofotômetro de refletância</i>	58
3.2.4.6 <i>Efeito aging</i>	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1 PREPARAÇÃO E FUNCIONALIZAÇÃO DA JUTA	61
4.2 COMPÓSITO PRODUZIDO	63
4.3 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DAS AMOSTRAS	64
4.3.1 Morfologia	65
4.3.2 Grupos químicos	66
4.3.3 Fluxo de calor do material	68
4.3.4 Decomposição térmica	74
4.3.5 Alterações colorísticas	77
4.3.6 Efeito aging	84
4.3.7 Força colorística (K/S)	87
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
REFERÊNCIAS	93
APÊNDICE A - Tabelas Suplementares	106

1 INTRODUÇÃO

O crescimento significativo de resíduos gerados pelo ser humano tem se tornado um fator de preocupação quando a pauta é voltada para a sustentabilidade. Tratando-se especificamente de setores industriais, como o têxtil, os números cada vez maiores e críticos chamam atenção. Afinal, a manufatura e o descarte correto de resíduos ainda requerem cuidados extras. Produtos têxteis são considerados indispensáveis no cotidiano do homem. Aliado ao crescente consumo mundial de mercadorias têxteis nos países desenvolvidos e em desenvolvimento, a demanda por fibras no setor também segue aumentando, atingindo a marca de consumo de 95,6 milhões de toneladas de fibras em 2015 (PALAMUTCU, 2017).

A indústria têxtil causa impactos ambientais de acordo com a fibra têxtil produzida, havendo diferenças nos tipos e níveis dos conforme cada material fibroso (algodão, lã, viscose, Tencel®, poliamida, poliéster, entre outros) (LEITE, 2020).

Dentro do mercado global, o ramo têxtil ocupa uma posição de destaque, sendo uma das maiores e mais antigas indústrias no mundo (PESUPA et al., 2017), onde as etapas do processo de manufatura têxtil, como o cultivo e manufatura da fibra, fiação, tecelagem, preparação, beneficiamento e tingimento afetam o meio ambiente de maneira ampla e variada (PALAMUTCU, 2017).

Com isso, o segmento têxtil vem buscando incorporar as finalidades e oportunidades das fibras naturais no desenvolvimento de novos produtos para melhor incorporarem os conceitos de sustentabilidade, buscando processos mais limpos e que causem baixo impacto no meio ambiente após o seu uso e descarte (CALDEIRA et al., 2020).

Baseado neste contexto e buscando novas estratégias sustentáveis que possam ser enquadradas a movimentos em prol do meio ambiente, esse trabalho busca englobar alguns Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que fazem parte da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), tratando-se de um pacto global e prol de um mundo mais sustentável, sendo eles (UNESCO, 2017):

- ODS 9 Indústria, inovação e infraestrutura: construir infraestrutura resiliente, promover a industrialização inclusiva e sustentável, e fomentar a inovação;
- ODS 12 Consumo e produção responsáveis: assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis;

- ODS 17: Parcerias e meios de implementação: fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável.

1.1 ENQUADRAMENTO DA PROBLEMÁTICA DO ESTUDO

Ao longo dos anos, vem sendo notável o surgimento de leis ambientais mais restritas e a crescente exigência voltada para a conscientização de processos mais sustentáveis por parte dos consumidores, tanto com a qualidade do produto têxtil quanto com o do ciclo de vida dos produtos. O incentivo para que haja a substituição de fibras sintéticas e, paralelo a isso, o desenvolvimento de têxteis com características ecologicamente corretas dentro do mercado mundial, vem recebendo cada vez mais atenção a nível industrial.

A indústria têxtil manifesta a sua insatisfação devido à estagnação do seu processo produtivo no que diz respeito aos produtos que disponibiliza no mercado. Cada vez mais a busca pelo desenvolvimento de materiais fibrosos com elevado valor agregado vem se tornando fundamental, buscando desenvolver respostas mais simples e diretas para processos e produtos deste setor.

A partir desta concepção, processos vêm sendo aplicados em têxteis com o intuito de funcionalizá-los, a fim de incrementar diferentes propriedades nestes materiais e com isso suprir uma maior demanda de consumidores com diferentes especificações e preferências. São inúmeras as razões para produzir atividades funcionais nos materiais têxteis, destacando-se: a busca por conforto, proteção e segurança, durabilidade de efeitos extras, e a facilitação de cuidados durante o uso. Sendo possível a aplicação do produto final em diversos setores da economia, tais como área de design e arquitetura, construção civil, indústrias automobilística, naval e aeroespacial, e ainda na saúde, desporto, moda, entre outros (GRANCARIC et al., 2018; JIANG et al., 2018; HUANG et al., 2019; KHATKAR et al., 2019; REVAIAH; KOTRESH; KANDASUBRAMANIAN, 2020).

Existem várias formas de se obter os efeitos desejados, seja através do emprego de fibras de elevada tecnologia ou mediante a aplicação de técnicas para funcionalizar substratos transformando-os em materiais inteligentes (SOUZA; PACHECO, 2016). Pesquisadores vêm despertando grande parte da sua atenção para compósitos reforçados com substratos fibrosos naturais, a qual se justifica por diversos argumentos, tais quais: benefícios sociais, materiais

ecológicos, boas propriedades mecânicas, custo e massa relativamente baixos, entre outros (KOTIK, 2019).

Quando se aborda os benefícios sociais, os materiais fibrosos estão associados a regiões de cultivo que produzem estas fibras, as quais podem ser resíduos de algumas culturas agrícolas, justificando assim a possibilidade de se obter benefícios econômicos adicionais para as comunidades que trabalham em seus cultivos (ADEKOMAYA; JAMIRU; SADIKU, 2016; KOTIK, 2019).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um compósito inteligente a partir de tecido natural de juta previamente funcionalizado e verificar suas propriedades mecânicas e funcionais, proporcionando o desenvolvimento de novos produtos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos tem-se:

- Funcionalizar o tecido de juta por meio da utilização de agente inteligente, como termocrômico, com o intuito de trazer novas funcionalidades e possibilidades de aplicação para ele;
- Desenvolver um compósito inteligente responsivo para aplicação e inovação nos mais diversos âmbitos;
- Caracterizar térmica e quimicamente o compósito reforçado pelo tecido natural e funcionalizado;
- Avaliar a transferência da funcionalização do agente inteligente do tecido para o compósito reforçado por este;
- Avaliar o efeito *aging* do compósito funcionalizado após 1, 15 e 30 dias de aplicação do mesmo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A funcionalização de materiais têxteis requer um conhecimento aprofundado sobre suas principais características, sua origem e o tipo de tratamento que pode ser realizado para garantir propriedades extras a estes materiais e assim agregar valor aos mesmos.

Nesta seção será apresentada uma revisão da literatura sobre a indústria têxtil e os diferentes tipos de fibras utilizadas neste setor, especificamente a fibra da juta. Além disso, será explanado o tema de têxteis inteligentes e a aplicação de propriedades crômicas sobre as fibras naturais, técnicas e metodologias que serão utilizadas para garantir a funcionalização e o desenvolvimento de compósitos reforçados com tecidos naturais.

2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL

O setor têxtil representa há longa data um dos maiores segmentos do mercado, com um alto valor agregado ao seu processo devido à elevada demanda dos seus produtos. Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria Têxtil (ABIT), a indústria têxtil brasileira atingiu o posto de 2ª maior empregadora da indústria de transformação, perdendo apenas para o setor de alimentos e bebidas. Em média, a confecção brasileira produz aproximadamente 9 bilhões de peças por ano, tendo 1,5 milhão de colaboradores diretos e cerca de 8 milhões indiretos (ABIT, 2018).

A nível mundial, a indústria têxtil brasileira ocupa a posição de segunda maior fabricante de denim, a terceira na produção de malhas e possui o quinto maior parque industrial, além de ser referência em moda praia, *jeans* e *homewear* (ABIT, 2018).

Dentro do mercado global, assumindo a posição de uma das indústrias mais poluentes (BOSTRÖM; MICHELETTI, 2016), o setor têxtil tem recebido grande atenção ao longo dos anos, por ser responsável por gerar bilhões de dólares na economia, desde o processo inicial de produção da matéria-prima até a última etapa de comercialização dos produtos (CHAN; WONG, 2012).

A indústria têxtil compreende as etapas de fiação, tecelagem, malharia e beneficiamento (tinturaria, estamparia, lavanderia, entre outros processos químicos). O processo produtivo se inicia com a matéria-prima, que é proveniente de fibras naturais e de filamentos sintéticos e artificiais, sendo a seguir transformada em fios nas fábricas de fiação,

partindo depois para a tecelagem ou malharia e por fim o beneficiamento. Por último, o produto é confeccionado (BEZERRA, 2014).

As responsabilidades da indústria têxtil para com o meio ambiente existem da mesma forma que qualquer outro setor no mercado. A quantidade de resíduos gerados, tanto sólidos quanto líquidos, pode atingir valores significativos dentro de todo o processo quando não há um cuidado com a questão ambiental. Desta maneira, é de extrema importância avaliar os efeitos dos têxteis sobre o meio ambiente e também buscar por potenciais melhorias, a fim de garantir a melhor maneira possível para sua coleta, reutilização, reciclagem e descarte durante sua vida útil (YASIN; SUN, 2019).

2.2 SUSTENTABILIDADE E A INDÚSTRIA TÊXTIL

A conscientização a respeito dos problemas ambientais tem crescido gradativamente nas últimas décadas, e com isso vem sendo gerada uma maior discussão e reorientação dos comportamentos sociais e industriais. Dentre os principais requisitos para um meio sustentável, ressalta-se que os novos produtos devem basear-se em recursos renováveis, a fim de otimizar o emprego de recursos não-renováveis e evitar o acúmulo de resíduos que o meio ambiente não seja capaz de absorver (MONTEIRO, 2016).

Com uma produção global complexa e uma rede produtiva extensa, e exigências sobre custo e prazo de entrega, a sustentabilidade no setor têxtil vem se mostrando uma etapa desafiadora, e a demanda por materiais *eco-friendly* tem levado as empresas a repensarem sua produção e investirem na pesquisa e desenvolvimento de novas alternativas aos têxteis tradicionais (MONTEIRO, 2016). Além disso, este setor é particularmente suscetível à poluição ambiental devido às suas características inerentes e processos produtivos envolvendo um elevado uso de produtos químicos e recursos naturais, induzindo impactos ambientais adversos (SHEN et al., 2014).

As fibras vegetais não fogem à regra, afinal, os métodos tradicionais utilizados no seu processamento, ainda que em menor escala, quando comparados à produção de fibras artificiais, também são poluentes. Associado a isso, as problemáticas relacionadas à utilização de fibras naturais, como, por exemplo, baixo módulo de elasticidade, suscetibilidade ao ataque de fungos e insetos, elevada absorção de água, merecem maior atenção e têm um grande potencial de pesquisa. Todavia, as principais vantagens das fibras vegetais em comparação às fibras

sintéticas são o seu custo inferior, abundância natural e a sua biodegradabilidade (FUENTES et al., 2014; MONTEIRO, 2016).

Portanto, a utilização e o reaproveitamento de fibras vegetais é uma alternativa considerada ecológica e que merece atenção, visto os impactos ambientais que a produção de outros tipos de fibra acarreta. Além disso, a produção de fibras vegetais gera efeitos de grande importância à sociedade, como, por exemplo, o fortalecimento de culturas e práticas rurais onde estas fibras são cultivadas e/ou extraídas.

2.3 FIBRAS TÊXTEIS

O têxtil se faz presente na evolução da raça humana há mais de 24 mil anos, onde foram encontrados vestígios na Europa, comprovando serem derivados da técnica de tecelagem no Período Paleolítico (até 10.000 a.C.). Os primeiros materiais fibrosos usados para produzir superfícies têxteis foram derivados de linho, cânhamo e urtigas (PALAMUTCU, 2017) e o motivo principal do uso de têxteis neste período era, principalmente, a proteção contra intempéries (PEZZOLO, 2007).

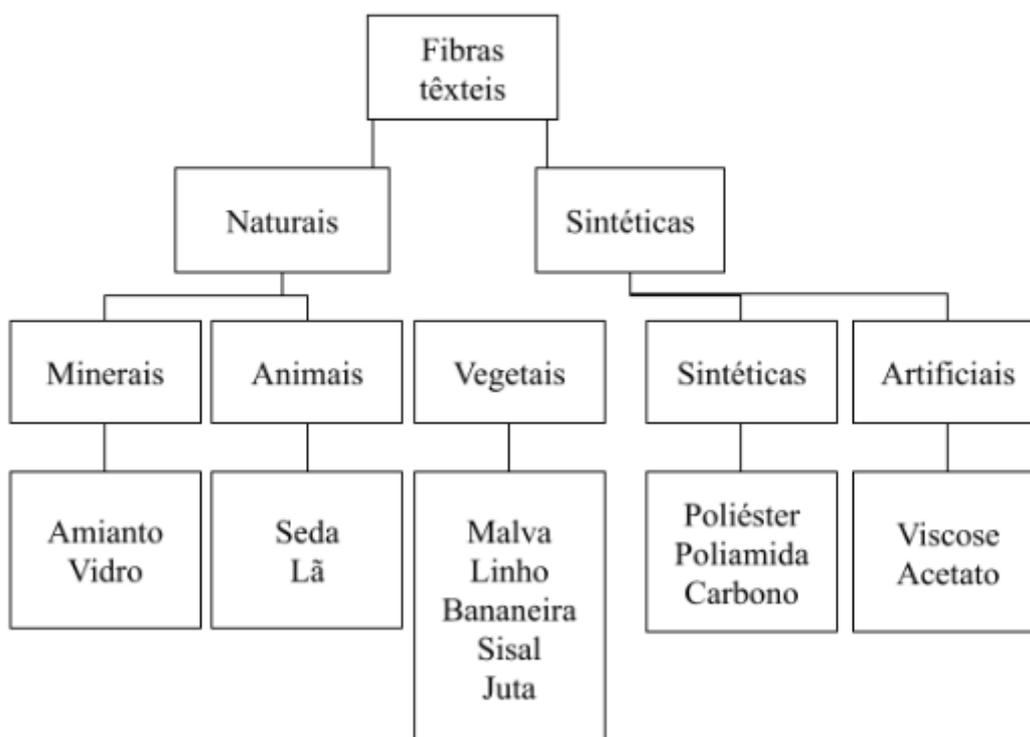
Dentro da história evolutiva do ser humano, sabe-se da existência e importância das fibras têxteis (SOUZA et al., 2010). Logo, a fibra é a peça chave para definir os tipos de tecnologia de processamento, área de aplicação e vida útil de um item têxtil (PALAMUTCU, 2017).

Conforme a tecnologia foi implantada e aprimorada, as fibras têxteis evoluíram, dando espaço para o desenvolvimento de fibras sintéticas e artificiais (PEZZOLO, 2007). Fibras são substratos filiformes, caracterizados por sua finura, flexibilidade e grande relação entre comprimento e a sua seção transversal, podendo ser materiais de alta resistência, visto que possuem elevada proporção entre volume e superfície (ARAÚJO, 2011).

A classificação das fibras pode ser dada em quatro grupos principais, sendo compostos pelas fibras naturais vegetais (derivadas de plantas), animais (provenientes de pêlos) e minerais (amianto), pelas fibras sintéticas (produzidas pelo homem) e as fibras artificiais (também chamadas de regeneradas, provenientes de polímeros naturais) (SANDIN, ROOS, JOHANSON, 2019), conforme apresentado na Figura 1. As fibras naturais de origem mineral, como as fibras de amianto, embora já tenham sido amplamente utilizadas, são atualmente

evitadas devido à sua associação a riscos à saúde (carcinogênese por ingestão/inalação), estando proibidas em diversos países (SHAH; PORTER; VOLLRATH, 2014).

Figura 1 – Classificação das fibras têxteis.



Fonte: Adaptado de ABIT (2018)

As fibras vegetais, no geral, contêm celulose como seu principal componente estrutural (CORREIA, 2011; MARIANO, KISSI e DUFRESNE, 2018), enquanto as fibras animais são constituídas principalmente de proteínas. Por possuírem propriedades mais vantajosas como menor custo e baixa densidade, boa biodegradabilidade e maior hidrofiliabilidade do que as fibras animais, as fibras naturais ganham a preferência do consumidor (MURALI, CHANDRA, MOHAN, 2014; PICKERING, ARUAN EFENDY, LE, 2016; KENGE et al., 2019). Uma exceção é a fibra de seda, a qual pode apresentar uma resistência à tração considerável, porém é relativamente cara, tem baixa rigidez e baixa disponibilidade (SHAH; PORTER; VOLLRATH, 2014).

As fibras manufaturadas são as manipuladas pelo homem, compostas por macromoléculas de origem natural submetidas a processos químicos para permitir o seu uso na

formação da fibra, visto que na forma natural a mesma não apresenta uma macromolécula linear que forme a fibra (GUERRA, 2016). Já as fibras sintéticas são manipuladas em laboratório (SHABBIR, MOHAMMAD, 2019). Elas não existem na natureza e são obtidas a partir de derivados do petróleo, podendo ser adaptadas de acordo com as suas finalidades (GUERRA, 2016).

Dependendo da aplicação, se uma fibra têxtil não atinge uma boa resposta (como mecânica ou térmica) para cada estímulo que é imposto a ela, uma solução é a produção de compósitos reforçados por estas para se atingir melhorias na qualidade do material (KENGE et al., 2019; REX et al., 2019). Devido à sua natureza oca e celular, fibras naturais possuem excelentes propriedades de isolamento acústico e térmico e também apresentam densidade aparente reduzida (BOGOEVA-GACEVA et al., 2007).

Paralelo a isso, o interesse por novas fibras vegetais e seu desempenho no processo de manufatura têxtil vem crescendo cada vez mais e se mostrando uma alternativa sustentável de matéria-prima para essa indústria (QUEIROZ et al. 2020).

2.2.1 Fibras naturais

De acordo com dados e estudos, as fibras vegetais mais antigas cultivadas foram o algodão e o linho, que datam de aproximadamente 3.000 a 5.000 a.C. onde foram muito utilizadas para confecção de vários produtos de diversos segmentos (PEZZOLO, 2007).

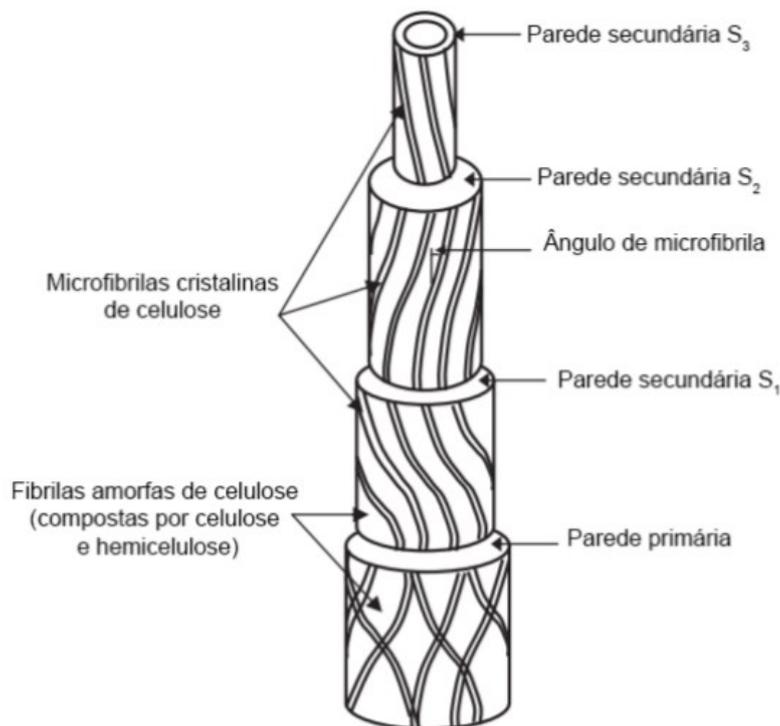
Por serem extraídas diretamente da natureza, as fibras naturais fornecem materiais com propriedades de elevado conforto e flexibilidade. Elas podem apresentar coloração escurecida proveniente do solo, como tons marrons ou amarelados (FEBRATEX GROUP, 2019).

As fibras naturais são um recurso renovável por excelência, pois absorvem a mesma quantidade de dióxido de carbono que produzem. Durante o seu processamento formam resíduos orgânicos e que podem ser usados para gerar eletricidade. No final do seu ciclo de vida, são 100% biodegradáveis (BRITO; AGRAWAL; ARAÚJO, 2011).

Os principais componentes das fibras naturais são celulose, hemicelulose, lignina, pectinas e ceras (CARVALHO, 2020). O tipo da fibra natural é caracterizado pela presença de fibrilas de celulose incorporadas em uma matriz de lignina. Essas fibrilas são alinhadas ao longo do comprimento da fibra (Figura 2), o que confere máxima resistência à tração e à flexão, além

de proporcionar maior rigidez. Relaciona-se a eficiência de resistência mecânica da fibra natural à natureza da celulose e sua cristalinidade.

Figura 2 – Estrutura genérica das fibras naturais.



Fonte: Adaptado de Kabir et al. (2012)

Atualmente, há elevado consumo de substrato têxtil de origem natural, mais especificamente o algodão, que requer uso intensivo de água e produtos químicos (pesticidas e fertilizantes) (FAO-ICAC, 2020; SANDIN; PETERS, 2018). Entretanto, são muito mais valorizadas as atividades econômicas com base orgânica capazes de promover a conciliação entre a utilização econômica sustentada dos recursos naturais e a conservação do ambiente (ARAÚJO, PEREIRA, 2017).

As fibras naturais, ou lignocelulósicas, podem ser extraídas de diversas regiões das plantas, tais como (RWAWIREE; OKELLO; HABBI, 2014):

- Caule: juta, banana, linho, cânhamo, kenaf, rami e malva;
- Folha: abacaxi, sisal, henequém e curauá;
- Fruto ou semente: algodão, mamona, coco e açai.

Muitas delas são amplamente utilizadas em materiais compósitos, apresentando propriedades mecânicas elevadas quando utilizadas como reforço juntamente com resinas poliméricas (RWAWIREE; OKELLO, HABBI, 2014).

Fibras como o cânhamo têm se mostrado uma boa solução devido ao seu rápido crescimento (até 0,31 m por semana), além das suas propriedades sépticas, alta absorção, proteção contra a radiação ultravioleta (UV) e apresentar nenhum efeito alergênico (SCHUMACHER et al., 2020).

Compósitos produzidos a partir de fibras como sisal, coco e juta têm se tornado mais atraentes por causa de sua elevada resistência mecânica e baixa densidade (KENGE et al., 2019).

Outros estudos observaram que ao fazer a junção de duas fibras naturais, compósitos de elevado desempenho podem ser produzidos (IDICULA, JOSEPH, THOMAS, 2010). Saw et al. (2014) desenvolveram compósitos híbridos de três camadas preparados com duas sequências diferentes de arranjos de manta de fibra, usando juta cortada e fibra de coco com matriz de resina epóxi, mantendo a proporção de volume de matriz para fibra de 70:30. Foi investigado a relação da espessura, absorção de água, e suas propriedades mecânicas.

Também foram analisadas as propriedades mecânicas e as características de cura de compósitos de borracha natural reforçados com fibra de sisal e resinados com óleo de palma e os resultados mecânicos obtidos para os compósitos com fibras orientadas na direção longitudinal foram superiores àquelas com direção transversal (JACOB, THOMAS, VARUGHESE, 2004).

Ainda em destaque, pode-se citar a fibra de rami, sendo uma das fibras mais antigas e uma importante matéria-prima no ramo têxtil devido às suas excelentes características, como alta absorção de umidade (RAMAMOORTHY, SKRIFVARS e PERSSON, 2015), elevado módulo de Young e resistência à tração.

2.2.1.1 Fibra de juta

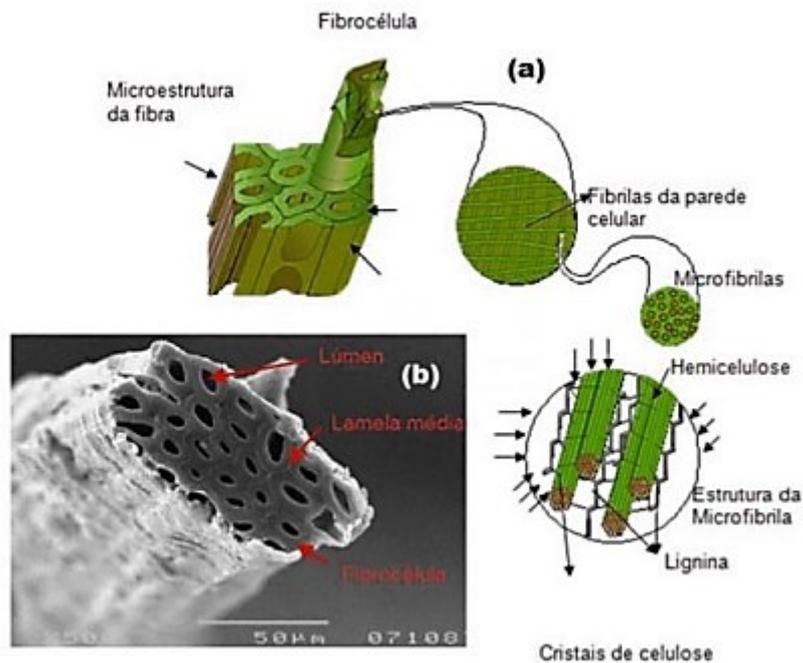
As fibras vegetais utilizadas na fabricação do tecido de juta, destinadas sobretudo à produção de sacarias, são extraídas do caule da planta com nome científico de *Corchorus Capsulares*, conhecida regionalmente como juta (PAIVA, 2015). Esta fibra pode ser plantada em várzeas baixas, estando sujeita às variações dos ciclos das enchentes. É uma planta das

regiões tropicais, onde a média climática anual mantém a umidade relativa alta com temperaturas constantes entre 20 e 25°C.

As fibras de juta são compostas por 33% celulose, 22,7% de hemicelulose e 28% de lignina, conforme ilustrado na Figura 3. De uma forma geral, são formadas pela união de fibrocélulas, que são constituídas pelas paredes celulares, lamela e lúmens. Estas paredes são formadas por fibrilas que são ligadas por uma matriz polimérica de lignina e celulose (CAVALCANTE, 2017).

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

Figura 3 – Representação das fibrocélulas, fibrilas, microfibrilas e cristais de celulose (a) e seção transversal da fibra de juta (b).



Fonte: Adaptado de Melo Filho (2012); e Oliveira (2013)

O processo para a obtenção das fibras envolve pouca tecnologia, e consiste basicamente nas etapas de corte, maceração, trituração, secagem, embalagem e por fim, classificação

(FIDELIS et al., 2016). A Figura 4 ilustra o processo de corte (a) e secagem (b) das fibras de juta.

Figura 4 – Corte (a) e secagem (b) do processo de produção das fibras de juta.

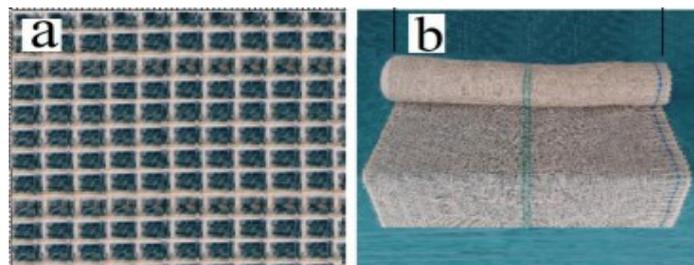


Fonte: Paiva (2015)

A manufatura da juta é um processo industrial que envolve vários setores, desde as etapas de classificação manual e prensagem mecânica de fardos, até setores automatizados com máquinas de emenda, de dobragens, passadeiras, feiras, bobinadoras, urdideiras, engomadeiras, fiação e costura (LIMA, 2019).

Antes do processo de fiação, as fibras recebem um tratamento com óleo vegetal, para o seu amaciamento e para se tornarem mais flexíveis e, conseqüentemente, obterem um condicionamento para serem utilizadas nos equipamentos automáticos que transformam as fibras em cordões, conforme Figura 5 (JUTAL, 2018). O produto que sai da tecelagem é um tecido para fabricação de sacos de embalagem de grãos menores, como café; e também com fator de cobertura não tão elevado, utilizado para a fabricação de sacos para embalagem de tubérculos e outros produtos de consumo (LIMA, 2019).

Figura 5 – Tecido de juta com fator de cobertura não elevado (a) e tecido de juta (b).



Fonte: Lima (2019)

As características dos tecidos de juta referem-se, principalmente, a sua utilização para a produção de sacarias (embalagens). No entanto, estudos voltados para o tratamento das fibras de juta foram efetuados visando o seu emprego como reforço de compósitos de matrizes poliméricas e cimentícias (LIMA, 2019).

2.4 TÊXTEIS INTELIGENTES

Têxteis inteligentes são materiais projetados e fabricados para incluir tecnologias que forneçam ao usuário maior funcionalidade, inovação e conforto (STOPPA; CHIOLERIO, 2014; LI; CHEUNG, 2018; JIA et al., 2019). O seu desenvolvimento é constituído através de polímeros orgânicos capazes de conduzir eletricidade, (GRANCARIĆ et al., 2018), ou também de polímeros não condutores, como os materiais crômicos.

Segundo Langenhove et al. (2007) esse termo é derivado do conceito de “*smart materials*”, o qual foi apresentado pela primeira vez no Japão, em 1989, trazendo consigo a descoberta de novos materiais, como os de memória de forma. A inserção de materiais inteligentes na área têxtil iniciou nos anos 90.

Têxteis inteligentes são utilizados nas mais variadas aplicações (como no isolamento, absorção, filtração, entre outros), sendo uma combinação de diversas propriedades que resultam em um vestuário flexível, leve e em determinados casos com um comportamento mecânico diferenciado, onde a incorporação de agentes ativos permite a obtenção de um vestuário com aplicações tecnológicas diferenciadas (BUTSTRAEN; SALAUN; DEVAUX, 2015).

A base dos têxteis inteligentes consiste na utilização de várias técnicas, incluindo abordagens físicas, químicas e biológicas, como o *laser*, tratamento plasmático e enzimático, inserção de diferentes monômeros na busca de desenvolver novos polímeros, técnicas de aplicação camada por camada, além de diferentes tecnologias de revestimento e laminação (JABBARI et al., 2016; OTTO; VILLIERS, 2020), buscando manter no produto resultante as propriedades intrínsecas do material têxtil, como leveza, flexibilidade (CHEN et al., 2018) e maleabilidade (NECHYPORCHUK et al., 2017), entretanto, com a funcionalidade desejada.

Estes têxteis possuem inúmeras aplicações em potencial, como a capacidade de se comunicar com outros dispositivos, conduzir energia, transformar em outros materiais e até proteger o usuário de riscos ambientais (SYDUZZAMAN et al., 2015). Eles são definidos como

materiais capazes de detectar e reagir a condições, estímulos (MASSARONI et al., 2015; HIREMATH et al., 2018; LI, CHEUNG, 2018; WENGER et al., 2018; EL-KHODARY et al., 2020) ou com o meio em que estão situados, podendo este estímulo ser proveniente de fontes térmicas, mecânicas, químicas, elétricas, magnéticas e por meio da aplicação da nanotecnologia.

Têxteis inteligentes podem ser divididos em três principais categorias, sendo elas: passiva, ativa e superinteligentes (PAILES-FRIEDMAN, 2016; GONG et al., 2019). Os têxteis inteligentes passivos são capazes de alterar as suas propriedades de acordo com um estímulo ambiental, podendo funcionar como tecidos hidrofóbicos ou hidrofílicos, entre outros (KONCAR, 2016). Como exemplos têm-se os têxteis antimicrobianos, antiodor e antiestáticos (SYDUZZAMAN et al., 2015), além da fibra ótica e materiais condutivos (GRANCARIĆ et al., 2018).

Logo após, tem-se os têxteis inteligentes ativos, capazes de sentir, detectar estímulos e reagir a eles. A partir de variações em parâmetros como intensidade de luz, temperatura e até poluição, eles podem agir como atuadores (KONCAR, 2016). Como, por exemplo, materiais cromáticos, materiais com memória de forma e materiais com mudança de fase (GRANCARIĆ et al., 2018).

Por fim, os têxteis superinteligentes, que são capazes de detectar, reagir e se adaptar com base na experiência que o têxtil sentiu e reagiu anteriormente. Exemplos: trajes espaciais e sistemas de monitoramento da saúde (STOPPA; CHIOLERIO, 2014; GRANCARIĆ et al., 2018).

Os têxteis inteligentes e interativos são uma área relativamente nova de pesquisa devido a sua capacidade de interagir com o meio geral. O material pode detectar a fisiologia do usuário e responder às necessidades dele, obtendo resultados como frequência cardíaca e respiratória, níveis de atividade praticados (COYLE; DIAMOND, 2015), ou até mesmo criar têxteis médicos que previnem infecções e melhoram a cicatrização (MIRZAEI; DARROUDI, 2017).

2.4.1 Têxteis com propriedades crômicas

O cromismo representa uma mudança na absorção, reflexão e refração do espectro, ocasionando a alteração na coloração do têxtil de maneira reversível, ou seja, assim que o estímulo aplicado é cessado, a cor do material volta ao seu estado inicial (VIK; PERIYASAMY,

2018). Ou também de maneira irreversível, em que a alteração na coloração não pode ser desfeita após receber o estímulo externo.

Materiais crômicos atuam alterando a mudança de cor no material a partir de uma influência externa (HUANG et al., 2016; PAKOLPAKÇI, 2018; WANG et al., 2017), podendo ser chamados de "materiais camaleônicos" (GAUCHE et al., 2020).

O Quadro 1 apresenta diferentes materiais crômicos com seus respectivos estímulos (MERATI, 2018; SEO; CHOI; LEE, 2019).

Quadro 1 – Tipos de cromismo e seus estímulos

Cromismo	Estímulo
Termocrômico	Calor
Fotocrômico	Luz
Hidrocromico	Líquido
Eletrocromico	Eletricidade
Piezocrômico	Pressão
Solvatocrômico	Polaridade do solvente
Halocrômico	pH
Mecanocrômico	Forças mecânicas

Fonte: Autor (2021).

Segundo os autores Morsümbül e Kumbasar (2018), o cromismo é explorado desde aproximadamente 1900, sendo o termocromismo, fotocromismo e eletrocromismo os tipos mais abundantes na literatura. Os principais exemplos de materiais para aplicação são: corantes, plásticos, cosméticos e também aplicações óticas. Sob os materiais fibrosos, as propriedades crômicas mais aplicadas são do grupo fotocrômico e termocrômico (MATTILA et al., 2006), sendo a maioria das suas aplicações realizadas por meio da técnica de estamperia e tingimento (MAL; IQBAL, 2014).

Para haver o efeito crômico sobre substratos têxteis, podem ser realizados processos como isomerização, clivagem heterolítica, reações pericíclicas e em menor grau, redox ou transferência de elétron (RAMLOW; ANDRADE; IMMICH, 2020). Dois sistemas crômicos foram testados e aprovados para a aplicação e uso em têxteis, sendo eles (EL-KHODARY et al., 2020):

- a) Cristais líquidos microencapsulados: esta metodologia baseia-se no fato de que em determinadas temperaturas os cristais, microencapsulados, se reorientam, o que resulta em uma mudança aparente na cor. Bilhões dessas cápsulas, de 10 micrômetros de diâmetro, podem ser misturadas em um meio adequado para desenvolver tintas de impressão para serem aplicadas sobre a fibra do tecido.
- b) Reorganização molecular: consiste, como o próprio nome sugere, na reorganização da estrutura molecular de um corante, a partir da elevação da temperatura, induzindo a mudança de cor do material crômico. Após o resfriamento, o sistema retorna à primeira cor devido ao arranjo molecular.

Dentre as técnicas de incorporação têxtil, a aplicação de microencapsulação permite proteger os agentes ativos da oxidação causada pelo calor, luz, umidade e outras substâncias, onde o material encapsulado pode ser liberado por diferentes mecanismos, como por exemplo: ruptura mecânica, irradiação, variações de temperatura, modificação do pH, difusão, biodegradação e dissolução (SILVA et al., 2017).

A composição das microcápsulas possui a patente número US 4717710, com o título *Thermochromic composition* como base de referência. Segundo esta patente, que se refere aos pigmentos termocromáticos da Matsui, a composição termocromática abrange: um material cromogênio doador de elétrons, um composto do tipo 1,2,3 – triazole, uma imina (ou base de Schiff) de baixa solubilidade ou um sal de amina primária contendo ácido carboxílico, e um álcool, amida ou éster que atuarão como solvente (LOPES et al., 2009).

A grande maioria das aplicações de materiais crômicos na área têxtil está no segmento de design. Porém, é também uma grande oportunidade de aplicação em outras áreas, como vestuário de proteção, uniformes, têxteis médicos, entre outros (SENGUPTA; BEHERA, 2014).

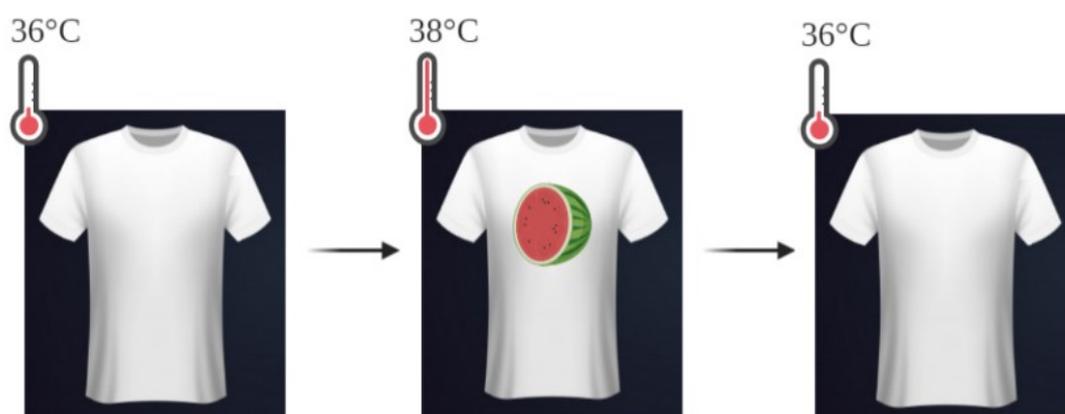
2.4.1.1 Têxteis termocrômicos

Os pigmentos termocrômicos orgânicos, também chamados de leuco corantes, são materiais termocrômicos indiretos. Um corante leuco é geralmente composto de três componentes: um corante halocrômico (sensível às variações de pH), um revelador de cor e um solvente. O desenvolvedor da cor é capaz de doar um próton, que é então aceito pelo corante (FU; HU, 2017). Os agentes termocrômicos, quando aplicados às fibras têxteis, são capazes de alterar sua coloração de acordo com a mudança de temperatura a que são submetidos (CHENG; YOON; TIAN, 2018; SÁ, 2015).

Isto ocorre por técnicas de estamparia ou recobrimento (RADITOIU et al., 2016). Ao expor a fibra que se encontra em temperatura ambiente com o pigmento ali inserido a uma temperatura pré-determinada, ocorre a sua alteração de cor, e após voltar à temperatura inicial, o têxtil retorna à sua cor original (HU; LU, 2014), conforme representado na Figura 6.

Corantes termocrômicos reversíveis são disponíveis comercialmente com várias temperaturas de ativação, a partir de -15 a 65 °C, todavia a maioria das aplicações são limitadas a três gamas de temperatura, ou seja, frio (~ 10 °C), calor do corpo ativado (~ 31 °C) e quente (~ 43 °C) (KULČAR et al., 2010).

Figura 6 – Exemplo de substrato funcionalizado com material termocrômico reversível.



Fonte: Autor (2021)

Os meios de aplicação do mecanismo podem ser divididos em três categorias principais, que são: mudança na estrutura cristalina; rearranjo molecular (sistema ternário) e estereoisomerismo (MERATI, 2018), sendo os dois primeiros métodos aqueles geralmente aplicados em materiais têxteis, apresentando resultados satisfatórios (TÖZÜM; ALKAN; AKSOY, 2019). Isomerizações cis e trans atuam como agentes termocrômicos e afetam a

polaridade do ambiente, resultando na variação das temperaturas de solução crítica inferior ou superior da solução de polímeros termo-responsivos (ABDOLLAHI; ROGHANI-MAMAQANI e RAZAVI, 2019). Os corantes leucos (formadores de cor) mais usados comercialmente pertencem à classe das espirolactonas (TÖZUM; AKSOY e ALKAN, 2018).

Em um estudo realizado por Ajeeb, Younes e Khsara (2017) foram utilizadas malhas 100% algodão, 100% lã e 100% poliéster para analisar o desempenho de corantes termocrômicos, onde se constatou que a condutividade térmica da lã é a mais elevada, mas o fluxo de calor de condução do poliéster é maior na mesma temperatura.

Considerando o segmento da saúde, os têxteis termocrômicos podem ser utilizados como indicadores (GARCIA-SOUTO; DABNICHKI, 2018; ZANG et al, 2020). Langenhove (2015) afirma que a temperatura do corpo humano é um indicio importante para se avaliar sobre a saúde e segurança do indivíduo, onde materiais termocrômicos podem auxiliar na detecção rápida de problemas.

O Quadro 2 apresenta áreas de aplicação de têxteis termocrômicos e os potenciais resultados após a sua aplicação.

Quadro 2 – Aplicações e finalidades da funcionalização de termocrômicos em têxteis.

Desenvolvimento/Inovação	Finalidades	Referências
Vestuário que comunica ao usuário suas condições cardíacas	O substrato têxtil foi capaz de detectar e monitorar a taxa de batimentos dos utilizadores, alterando sua coloração a partir da observação de disfunções	(SONG; VEGA, 2018)
Pigmento termocrômico aplicado em tecidos de poliamida e elastano	O substrato têxtil indica, por meio da temperatura corporal de atletas de <i>endurance</i> , o momento em que os mesmos atingem a exaustão	(POTUCK et al., 2016)
Tecidos com estampas e bordados capazes de auxiliar na verificação febril de um paciente	O tecido altera a sua cor conforme a temperatura corporal do seu usuário aumenta.	(TONG; LI, 2015)

Fonte: Autor (2021)

Diante das pesquisas apresentadas, verifica-se que a utilização de termocrômicos aplicados em substratos fibrosos ainda se encontra em um estado inicial, indicando, portanto, um grande potencial a ser explorado.

2.4.1.2 *Têxteis hidrocrômicos*

Materiais hidrocrômicos são também conhecidos como higrocrômicos (VIK; PERYIASAMY, 2018) e são capazes de sofrer alteração nas propriedades de absorção e/ou emissão de luz em resposta à água (PARK; PARK; KIM, 2016). Eles formam uma categoria de um grupo mais abrangente denominado “solvatocrômico”, capaz de mudar suas próprias propriedades por ser sensível a um determinado solvente (líquido ou gás), relacionado à sua polaridade. Portanto, o solvatocromismo é uma mudança de cor provocada por uma mudança na polaridade do solvente (FERRARA; BENGISU, 2014; GAUCHE et al., 2020).

Os agentes hidrocromáticos podem ser irreversíveis, normalmente encontrados nas cores preta e azul, ou reversíveis (DURDEVIC et al., 2015; CABRAL, SOUTO, 2020) geralmente na cor branca, e quando em contato com água ficam transparentes, retornando a cor original quando secos (MERATI, 2018). Os compostos de oxazina, como corantes hidrocrômicos, são capazes de responder à umidade, além de responder ao estímulo fotocromico, solvatocrômico e de pH (ZHU et al., 2014; BEAUJEAN et al., 2016).

A funcionalização de substratos fibrosos com agentes hidrocrômicos para transformá-los em materiais inteligentes pode ser obtida através da aplicação de uma pasta hidrocrômica sobre a superfície lisa e seca (GAUCHE et al., 2020), a partir de técnicas como serigrafia ou *spray coating*, seguido pela passagem do têxtil durante um tempo específico em uma estufa (FERRARA; BENGISU, 2014).

No estudo realizado por Gauche et al. (2020) ocorreu a aplicação de um agente hidrocrômico em substratos têxteis de algodão e poliamida pela técnica de estamperia. Foi possível concluir que fibras de algodão possuem melhor adesão do material hidrocrômico utilizado, quando comparadas às fibras de poliamida, devido à sua superfície mais irregular, ocasionada pela presença de fibrilas e a existência de grupos hidroxilas, intrínsecas a fibra de algodão, resultando em melhores resultados de solidez à lavagem e à fricção.

De acordo com investigações realizadas, verificou-se que os têxteis inteligentes podem ser utilizados para o mapeamento dos poros defeituosos de suor humano, utilizando polidiacetileno hidrocrômico junto com um filme compósito de polímero hidrofílico contendo fluoresceína (PARK; PARK; KIM, 2016).

2.4.1.3 Têxteis fotocrômicos

Os materiais fotocrômicos são capazes de alterar seu estado incolor quando submetidos à luz solar. Essas estruturas são preparadas através de técnicas convencionais de tingimento para a introdução de moléculas fotocrômicas nas fibras (RAMLOW; ANDRADE; IMMICH, 2020).

Os compostos fotocrômicos podem ser categorizados em dois grupos com base na reação reversa ocorrente no processo: térmico (Tipo-T) e fotoquímico (Tipo-P) (RAMLOW; ANDRADE; IMMICH, 2020). Especialmente, quando em contato com a luz UV, os fotocrômicos mudam de cor como resposta ao estímulo (MERATI, 2018; PERYIASAMY; VIKOVA; VIK, 2017), sendo que no momento em que esta fonte de luz UV é removida, a cor do têxtil retorna ao seu estado original (AKÇAROCA; MORSUNBUL; ALIR, 2018). As classes mais conhecidas de corantes fotocrômicos são espiropiranos, espirooxazinas, naftopiranos, diartyltenenos, fulgídeos e azobenzenos (RAMLOW; ANDRADE; IMMICH, 2020).

Os materiais fotocrômicos podem ser aplicados nos têxteis pela sua inserção na matriz da fibra, a partir da sua mistura com um polímero fotocrômico pela técnica de extrusão, ou misturando-os com uma resina e aplicando sobre a superfície desejada (EL-KHODARY et al. 2020; MERATI, 2018; SKELTE, 2017). Espiroxazina, espiropirano, azobenzeno, diarileno, oxa-zolidina, fulgida e oxazina são compostos fotocrômicos que exibem isomerização entre duas estruturas químicas com diferentes propriedades físicas e químicas em resposta à iluminação (ABDOLLAHI; ROGHANI-MAMAQANI; RAZAVI, 2019).

Atualmente, no campo da fotofarmacologia, a aplicação de propriedades fotocrômicas tem como objetivo introduzir drogas inteligentes nos substratos têxteis que, por meio da incorporação de sensores que detectam luz, permitem o controle espacial e temporal da bioatividade pelos raios UV (WEGENER et al., 2017).

Segundo os autores Fan, Wang e Yu (2018), após a aplicação de corantes fotocromicos em fibras de lã, foram observadas características positivas na fibra têxtil, como aumento da resistência à fadiga, solidez à lavagem e bom desempenho de retração da feltragem após o tratamento (o encolhimento da lã fotocromica permaneceu em cerca de 5% após 5 ciclos de lavagem).

Estudos realizados por Bao et al. (2019) em fibras de algodão também revelaram resultados positivos quanto à aplicação de corantes fotocromicos. Analisando o espiropirano (composto químico com propriedades fotocromicas capaz de ser usado em áreas médicas e tecnológicas) e reação de tiol-eno juntos, observou-se boa resistência à fadiga, rápida resposta na alteração da coloração da lã fotocromica, rápida resposta na alteração da coloração e excelente resistência à luz UV.

2.5 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os compósitos são formados pela combinação de dois ou mais materiais distintos, que são associados com o intuito de aperfeiçoar as propriedades dos constituintes quando unidos, fazendo com que as particularidades resultantes apresentem um melhor desempenho (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2018).

Estes materiais podem ser obtidos a partir de uma mistura macroscópica possuindo dois ou mais constituintes insolúveis entre si, contendo identidades químicas próprias e distintas fases. Estas fases são combinadas química e fisicamente quando sujeitas a condições específicas de tempo, temperatura, pressão ou catálise química, fazendo com que novas propriedades sejam atingidas (CALLISTER, 2007). Dentre as fases, nos compósitos, uma é chamada de matriz, constituída por um polímero, cerâmica ou metal e uma fase dispersa que, normalmente, atua como reforço. A matriz faz a junção das fibras, conservando a sua disposição geométrica, bem como as protegendo do ambiente exterior, sendo uma fase contínua a qual suporta a tensão submetida ao reforço, transferindo para o mesmo. A fase dispersa se encontra distribuída na matriz, a qual tende a ser mais rígida e resistente, por isso atua como um reforço à matriz. Os reforços contribuem para a resistência mecânica do material e podem ser encontrados como materiais particulados laminares, ou na forma de fibras (contínuas ou descontínuas) (LEVY NETO; PARDINI, 2006), conforme ilustrado na Figura 7. A combinação de fibras (reforço) e substâncias aglutinantes (matriz) facilita a produção de materiais, os quais são principalmente

leves, e apesar disso, são resistentes e estáveis, uma vez que os compósitos podem ser mais resistentes mecanicamente que o aço, mas mesmo assim possuem, somente, 1/5 da sua massa (NETO, 2016).

O fator de adesão de um material a outro está associado à interação entre os constituintes, os quais podem ser dos tipos: ligações de hidrogênio, ligações covalentes, forças de Van der Waals e interações eletrostáticas, onde a natureza dessas interações está associada à afinidade química existente entre a matriz e a fase dispersa. Na grande maioria dos casos, a fase dispersa possui natureza hidrofílica, enquanto que a matriz polimérica possui natureza hidrofóbica. A compatibilidade destas duas fases possui papel significativo na determinação das propriedades dos compósitos, a qual pode ser melhorada através da modificação química da superfície de um dos componentes, realizada por um agente de derivatização, que atua incorporando grupos na superfície, os quais são capazes de interagir com a matriz. Como exemplos de derivatizações para compósitos reforçados com as fibras vegetais tem-se a mercerização (tratamento com hidróxido de sódio (NaOH)), a esterificação e a acetilação (ALBINANTE; PACHECO; VISCONTE, 2013; SILVA, 2014).

Materiais lignocelulósicos apresentam grupos hidroxila polares em sua superfície. Isso ocorre devido à celulose, lignina e polioses, sendo que estes grupos podem, em princípio, interagir facilmente com matrizes poliméricas polares, como no caso das resinas fenólicas (SILVA, 2014).

Os compósitos, além de possuírem diversas aplicações devido às suas propriedades estruturais, vêm sendo amplamente utilizados em diversos segmentos, como: transporte, reforços para estruturas civis e engenharia biomédica, por exemplo (MONICH et al., 2016; MORÇA, KEDZIERSKI, MUZOLF, 2016; YE et al., 2017).

Ressalta-se ainda que os compósitos são projetados para atender aplicações que necessitem de um conjunto de propriedades específicas, sejam elas rigidez, resistência estática à fadiga, resistência à corrosão, redução de massa, resistência à abrasão, capacidade de atuação a elevada e baixa temperatura, isolamento ou condutividade térmica, elétrica ou isolamento acústico (MENEZES, 2018).

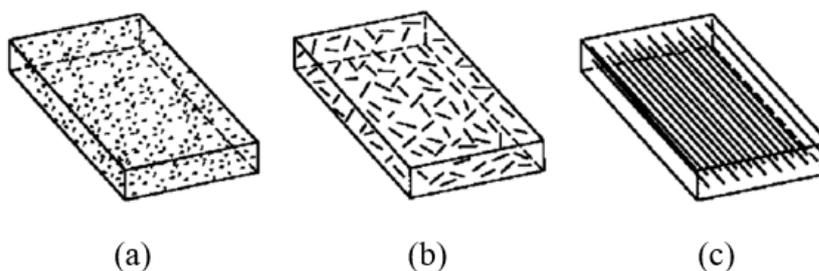
O desempenho de compósitos reforçados por fibras depende de três diferentes fatores (SILVA, 2014):

- A resistência e módulo da fibra;
- Resistência e estabilidade química da resina;

- Efetiva interação entre a resina e fibra para a transferência de esforços na interface.

Os principais tipos de reforços de compósitos estão ilustrados na Figura 7, sendo que o reforço utilizado nesse trabalho se encontra na categoria das fibras longas (c) a partir do uso de um tecido bidirecional.

Figura 7 – Principais reforços de matriz em compósitos: (a) particulado, (b) fibras curtas e (c) fibras longas



Fonte: Adaptado de Panzera (2005)

O aumento do uso de materiais compósitos poliméricos nas últimas décadas vem sendo significativo, principalmente nas indústrias de construção civil, automobilística, aeroespacial e esportiva, onde para cada aplicação, propriedades distintas e específicas são obtidas com diferentes modos de fabricação, tipos de matrizes e de reforços (LEVY NETO; PARDINI, 2016).

2.5.1 Compósitos poliméricos

Matrizes de origem polimérica são constituídas de resinas termorrígidas ou de polímeros termoplásticos. Os polímeros termorrígidos endurecem durante o processo de formação e não amolecem com a elevação de temperatura, devido ao grande número de ligações covalentes que impedem o movimento das cadeias adjacentes. Portanto, não podem ser remoldados ou reprocessados, pois uma temperatura excessiva causará degradação permanente, não retornando à sua forma inicial. O processo de cura do material polimérico é de grande importância para as propriedades mecânicas finais do compósito, visto que uma cura realizada fora de parâmetros, principalmente relativos à temperatura e tempo, pode prejudicar a capacidade estrutural de um componente da matriz (FERNÁNDEZ; BLAS; FRÖVEL, 2003).

Estes materiais podem ser processados em moldes e a disposição dos constituintes pode ser realizada manual ou automaticamente. A cura da resina pode ocorrer com ou sem o auxílio de temperatura, pressão ou vácuo. A produção desses materiais é limitada pelo tempo de produção, todavia são utilizados em larga escala por apresentarem propriedades de resistência superiores (SILVA, 2014).

A baixa viscosidade presente nos polímeros termorrígidos proporciona elevada impregnabilidade perante as fibras e uma alta fluidez. Desta forma, este tipo de resina é bastante utilizado em processos de transferência de resina, como os processos relativos à Moldagem por Transferência da Resina (RTM) e infusão a vácuo (LOPES; MORAES D'ALMEIDA, 2018).

As resinas termorrígidas mais usadas e baratas são os poliésteres, vinil-éster, poliuretanos e resinas fenólicas, que são utilizadas principalmente para compor compósitos reforçados com fibras de vidro. Resinas epóxi possuem um maior valor de aquisição e além de aplicações estruturais, também são comumente utilizadas em aplicações aeroespaciais, devido às suas propriedades mecânicas superiores e melhores resistências à umidade quando comparada as de poliésteres, poliuretanos e as resinas vinílicas (SILVA, 2014). As matrizes termorrígidas também apresentam um enorme potencial para associação com fibras vegetais, pois neste caso, podem-se utilizar métodos de processamento bastante simples e de baixo custo, além de utilizar fibras contínuas sem a necessidade de se promover alterações nos procedimentos e/ou equipamentos de processamento (SILVA, 2003).

Já os termoplásticos são constituídos de longas cadeias poliméricas, com alto peso molecular e viscosidade e a sua utilização vem ganhando notoriedade devido ao desenvolvimento de novos polímeros e processos, principalmente a partir dos anos 80 e 90, como poli(éter-éter-cetona) (PEEK) e poli(sulfeto de polifenileno) (PPS) (LOPES; MORAES D'ALMEIDA, 2018). Outros exemplos de matrizes termoplásticas são: polietileno, poliestireno e polipropileno. De maneira sumarizada, estão apresentadas no Quadro 3 as principais características de polímeros termoplásticos e termorrígidos.

Quadro 3 – Comparativo entre matrizes termoplásticas e termorrígidas.

Termoplástico	Termorrígido
Mecanicamente reciclável	Não reciclável mecanicamente
Tempo ilimitado de armazenamento	Tempo limitado de armazenamento

Altamente viscoso quando fundido	Baixa viscosidade durante o processo
Baixa resistência à fluência	Alta resistência à fluência
Temperatura limitada à temperatura de fusão (T _m) e temperatura de transição vítrea (T _g)	Temperatura de transição vítrea (T _g)
Baixa estabilidade térmica e dimensional	Alta resistência térmica e dimensional

Fonte: Adaptado de Silva (2014).

Compósitos produzidos a partir de matrizes termoplásticas, ao contrário das termorrígidas, após o fim de seu ciclo de vida, podem ser recicladas, e o material reutilizado. Porém, para que isso ocorra, os parâmetros do processo devem ser controlados para evitar qualquer tipo de degradação nas etapas de fabricação e reutilização (MCCOOL et al., 2012).

Para a decisão de qual tipo de matriz utilizar, deve-se analisar o tipo de aplicabilidade do compósito e quais as propriedades desejadas nele. Industrialmente, as matrizes termoplásticas são mais viáveis, devido a quantidade de peças a serem produzidas em curto espaço de tempo, exigindo uma mão de obra menos qualificada. Podem ser moldados por injeção, extrusão ou também por outras técnicas de moldagem por aquecimento. Suas restrições são as dimensões e o custo dos equipamentos de processo, ou seja, quanto maior a peça, maior a sua susceptibilidade ao empenamento e mais caro se torna o equipamento (ALBINANTE; PACHECO; VISCONTE, 2013).

Além do tipo de polímero constituinte da matriz, a diferença mais importante para se observar entre os compósitos termoplásticos e termorrígidos é o tipo de tratamento superficial dado às fibras. Este tratamento, conhecido também como *sizing*, é responsável em grande parte por proporcionar estabilidade da interface entre fibra e matriz, sendo de suma importância para as propriedades do compósito (LOPES; MORAES D'ALMEIDA, 2018).

2.5.2 Fabricação dos compósitos poliméricos termorrígidos

A combinação de diferentes componentes para gerar os mais diversos compósitos está relacionada principalmente com o método e os processos de fabricação utilizados para cada tipo de material desenvolvido. O processo de fabricação depende daquilo que se deseja obter como produto final de um compósito (dimensão, formato da peça, acabamento e utilização). Além disso, deve-se levar em consideração a escala produtiva necessária na fabricação do compósito

(COSTA, 2016). Os autores Kelly e Mileiko (1983) classificam os tipos de processos que são mais utilizados de acordo com o tipo de molde a ser utilizado: molde aberto ou fechado.

Processos em molde aberto utilizam, em geral, baixa tecnologia e baixa escala de produção. São eles:

- Laminação manual (*Hand Lay Up*): feltros de fibras, mechas trançadas, nãotecidos e outros tecidos são colocados sobre o molde para que seja feita a impregnação com resina. Esse processo continua com a colocação das camadas até que se obtenha a espessura (ou configuração) desejada. A cura ocorre sem calor nem pressão (AL- QURESHI, 2010).
- Laminação à pistola (*Spray Up*): é a versão mecanizada da laminação *Hand Lay Up*, transferindo a resina por pulverização para a superfície do molde (ABMACO, 2009).
- Enrolamento filamental (*Filament Winding*): Este processo é bastante utilizado na fabricação de peças cilíndricas e tubulações. A modelagem é feita através de enrolamento das fibras contínuas (*roving*) sobre molde rotatório. Também pode ser feita a utilização de mantas ou tecidos intercalados nas etapas de enrolamento do *roving* (MOROZOV, 2006).

Já os processos em molde fechado são caracterizados devido à presença de molde e contramolde, paralelo ao uso de alta tecnologia e produção em média e larga escala. São eles:

- Moldagem por compressão: o processo utiliza pré-impregnados, ou seja, produtos semiacabados, onde as fibras já se encontram previamente impregnadas pela resina ao serem colocadas no molde aquecido (CALLISTER, 2008).
- Pultrusão: neste processo as fibras são orientadas de forma a serem inseridas no laminado na configuração desejada, passando por um banho de resina e, logo em seguida, por um sistema aquecedor no qual se completa a impregnação de resina, a cura do material ocorre na sua forma final. As propriedades estruturais dos laminados são de boa qualidade, porém o custo desse processo é elevado (MARTINEZ, 2011).
- Injeção: Processo utilizado para alta produção e confecção de peças de formas variadas. A injeção da resina é feita por pressão em um molde fechado contendo em seu interior um reforço pré-formado. Os processos mais conhecidos são: RTM, Moldagem por Injeção de Resina (RIM) e RIM Reforçado (R-RIM) (CALLISTER, 2008).

2.5.3 Compósitos reforçados com tecidos e fibras naturais

O uso de matérias-primas provindas de fontes renováveis vem sendo de extremo interesse nos mais diversos estudos e pesquisas científicas, devido ao seu grande potencial na substituição de produtos sintéticos (SHAHID-UL-ISLAM; SHAHID; MOHAMMAD, 2013), sendo aplicada de maneira significativa dentro da fase dispersa do compósito. Essas fibras podem atuar como carga de enchimento ou reforço de baixo custo, melhorando algumas características da matriz. Fibras naturais vegetais são utilizadas em compósitos onde há baixa necessidade de uma maior resistência e rigidez (DEMIR et al., 2006; DE PAULA, 2011). A Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas de alguns compósitos formados por fibras naturais e epóxi.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de compósitos de fibras naturais e epóxi

Compósitos	Resistência à tração [Mpa]	Resistência à flexão [Mpa]	Resistência ao impacto [Kj/m²]
Banana/epóxi	59	76.53	149.66
Pseudocaule da banana/epóxi	45.57	73.58	92.66
Banana+sisal/epóxi	2	62	92.66
Rami/epóxi	9	110	105.40
Sisal/epóxi	37.40	52.80	56.70
Juta/epóxi	43	55.80	65

Fonte: Adaptado de Jeyapragash; Srinivasan; Sathiyamurthy (2019)

Por serem fonte de recursos naturais e renováveis, as fibras naturais apresentam baixo custo, além de serem biodegradáveis, não tóxicas, recicláveis e ser permitida a sua incineração. Essas fibras apresentam estruturas de comprimento alongado, seção transversal oca e arredondada e podem estar distribuídas ao longo de todo o vegetal (PAULA, 2011).

O uso de fibras naturais para o reforço de polímeros representa uma alternativa às fibras sintéticas como para-aramida, amianto, boro, poliamida, carbono e vidro, entre outras, que apesar de possuírem boas propriedades mecânicas, apresentam custo elevado de aquisição, possuem alta densidade, são abrasivas aos equipamentos de processamento, geram produtos com elevado custo de reciclagem, não são biodegradáveis, além do comprometimento com a saúde humana que essas fibras podem oferecer (SILVA, 2014).

Entretanto, diversos inconvenientes existem ao se utilizar fibras naturais em materiais compósitos, visto que estas fibras apresentam maior variabilidade nas propriedades do que as fibras sintéticas, podendo afetar a qualidade do compósito resultante, além de outros fatores contribuintes para as variações nas propriedades das fibras naturais como, por exemplo, a superfície, geometria, comprimento e conteúdo (LI et al., 2006).

As fibras vegetais utilizadas em maior escala como material de reforço em compósitos poliméricos são as fibras de sisal, coco, juta e da bananeira, além de fibras de madeira, bagaço de cana de açúcar e bambu (LI; WANG, 2006; BENGTSSON, 2006).

Souza, Silva e Fujiyama (2005) avaliaram as propriedades mecânicas da fibra de malva em conjunto com a fibra de juta. Os autores evidenciaram que a fibra híbrida apresentou o segundo melhor comportamento de resistência à carga máxima, quando comparada às fibras de coco maduro, coco verde e curauá. A fibra de malva também apresenta níveis de resistência à tração semelhante às fibras vegetais usadas na produção de compósitos, onde a sua resistência é considerada superior à da fibra de kenaf (planta nativa do sul da Ásia com características similares à da fibra de juta). Em determinadas situações, algumas espécies de malva se equiparam ou até mesmo superam a resistência à tração da fibra de juta (COSTA et al., 2012).

Costa (2016) desenvolveu compósitos de matriz polimérica híbridos com as fibras de sisal, malva e juta, utilizando um processo laminação manual. O seu estudo apresentou um aumento de 15% a 95% das propriedades mecânicas (tração, flexão e impacto). Também se evidenciou uma melhora na estabilidade térmica (10% a 50%) dos compósitos com adição das fibras, o que os torna bons candidatos para certos tipos de aplicações, tais como forros, painéis, revestimento interno de automóveis, paredes divisórias e portas internas, calhas residenciais e outros.

Oliveira (2017) realizou a caracterização mecânica de telhas cimentícias reforçadas com duas camadas de tecido de juta impregnada com resina acrílica. Para tanto, foi desenvolvida uma matriz a base de cimento Portland, o qual, teve substituição parcial por resíduo de tijolo

moído, para reduzir o teor do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) gerado durante o processo de hidratação do cimento. Os resultados apresentaram valores de tensão máxima de 3,75 MPa na de tração direta e de 15,02 MPa na de tração na flexão.

Portela (2016) pesquisou sobre compósito com matriz geopolimérica, tendo como ativadores, hidróxido de potássio e silicato de hidróxido de potássio, misturados a metacaulinita, cimento e areia. O compósito foi reforçado com três camadas de tecido de juta, com o qual foram produzidas placas para ensaios mecânico de flexão e de tração direta. Os resultados apresentaram os respectivos valores de 21,4 MPa e de 1,53 MPa.

As fibras naturais têm ainda muitos desafios para se tornarem largamente utilizadas como compósitos. Entretanto, o uso destes recursos para a produção de materiais poliméricos é uma alternativa de grande importância tecnológica por ser uma fonte renovável, reciclável, biodegradável, de baixo custo, baixa densidade e baixa abrasividade, contribuindo para produção de um material que, além de colaborar com o meio ambiente, possui boas propriedades físicas e mecânicas (LI; WANG, 2006; PAULA, 2011).

2.5.4 Biocompósitos

O meio ambiente se encontra em uma situação onde a disponibilidade de recursos é finita (BARRA et al., 2015). Além disso, com o aumento constante das preocupações em relação às emissões de carbono e do enrijecimento das legislações quanto ao descarte correto dos materiais ao final de sua vida útil, vem se tornando necessário o desenvolvimento de novas alternativas para substituição dos materiais baseados em petróleo (ARIADURAI, 2013).

Esses compósitos, conhecidos como compósitos verdes ou biocompósitos, podem ser classificados como parcialmente biodegradáveis no qual uma fase (reforço ou matriz) é sintética e a outra fase é de fonte natural. Ou podem ser totalmente biodegradáveis onde a matriz e reforço são provenientes de fontes naturais (PREET SINGH et al., 2017).

Segundo Bedin (2014), o processamento dos compósitos de base polimérica reforçados com fibras vegetais advém da combinação e da interação entre eles. E, esse processo é principalmente realizado em duas fases. A primeira fase é realizada a partir da incorporação das fibras à matriz. E na segunda fase, o biocompósito é moldado na forma do produto.

Além de suas propriedades, os biocompósitos tendem a apresentar baixo custo, baixa densidade, além de serem de fontes renováveis, em sua maioria recicláveis e apresentarem

característica de biodegradabilidade. Portanto, são produtos considerados como amigáveis ao meio ambiente e de elevado desempenho em grande parte das vezes. Além disso, apresentam características como o baixo peso, redução do desgaste de máquinas, baixa abrasividade, baixo risco à saúde durante a produção como vantagens atraentes (GODA et al, 2006).

Um exemplo de aplicação é na indústria automotiva, onde diversos componentes já estão sendo substituídos por biocompósitos e o mesmo também vem ocorrendo no setor de construção civil, de embalagens, entre outros (LEAL et al., 2017). Outro método bastante utilizado para obtenção de materiais com finas espessuras é o casting, que consiste em espalhar a solução formadora do filme em uma superfície lisa e deixar secar (BALAKRISHNAN et al., 2017).

Esses materiais geralmente apresentam vantagens nos fatores de custo e leveza comparados aos compósitos poliméricos convencionais. Apresentam menor toxicidade e agressividade, pois são reforçados com matérias-primas de origem vegetal, como amido, óleos e celulose (LIGOWSKI; SANTOS; FUJIWARA, 2015).

As técnicas de fabricação de biocompósitos mais utilizadas incluem laminação manual, moldagem por transferência de resina, pultrusão, extrusão e moldagem por injeção (SALIT, 2014). Escolher o processo de fabricação adequado para produção dos biocompósitos reforçados com fibras naturais vegetais é imprescindível para a obtenção das melhores propriedades, aumento da produção e redução dos custos (HO et al., 2012).

Os biocompósitos são a chave para diminuir o desequilíbrio ecológico do meio ambiente. Com a admissão dos biocompósitos no mercado, estudos confirmam que será notável a redução de problemas de controle de resíduos na agricultura, de poluição ambiental, de resíduos sólidos derivados principalmente das embalagens, entre outros. Além do mais, esse novo material é almejado em várias aplicações nos ramos da engenharia, eletrônica e automotiva.

Portanto, uma combinação entre conscientização ambiental, políticas globais e incentivos financeiros podem ajudar no aproveitamento de resíduos orgânicos para futuras aplicações desses materiais (VÄISÄNEN et al., 2016). Com isso, é possível observar que estudos e publicações na área de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais, suas propriedades e aplicações têm se tornado cada vez mais recorrentes na literatura (PEREIRA et al., 2015).

2.5.5 Compósitos inteligentes

A diferença mais perceptível ao se comparar o compósito tradicional e o compósito inteligente, é que ao invés do foco exclusivo em questões estruturais do elemento, como propriedades mecânicas por exemplo, o compósito inteligente possui também a capacidade de se adaptar às transformações impostas ao seu meio, através de alterações de temperatura e força (GOMES; GONÇALVES, 2018).

Para se obter estes compósitos ativos, capazes de tornarem-se uma “estrutura inteligente”, uma das possibilidades é a integração de fios finos de ligas de memória de forma (LMF) como elementos microatuadores no interior de matrizes, as quais são geralmente poliméricas, contendo ou não fibras de reforço (VILAR et al., 2012).

Ohzono et al. (2020) desenvolveram um compósito termocrômico de poliéster com um elastômero líquido cristalino nemático termorresponsivo (LCE) com fricção, a fim de reduzir o atrito criado sob o mesmo, conforme o aumento da temperatura. O efeito termocrômico aplicado foi reversível, ou seja, variou de acordo com os ciclos de aquecimento e resfriamento e demonstrou ser uma aplicação eficiente para compósitos inteligentes.

2.5.7 Efeito *aging* em materiais compósitos

O estudo do envelhecimento natural do material, também conhecido como efeito *aging*, é de extrema importância, pois essa degradação é combinada com outros fatores externos, como a radiação solar, calor, poluição, carregamentos estáticos ou dinâmicos, os quais acarretam no envelhecimento do material e conseqüentemente, na diminuição das propriedades de rigidez e resistência (RODRIGUES, 2007).

De acordo com estudos, o envelhecimento em polímeros classifica-se tradicionalmente por duas vertentes principais: envelhecimento físico e químico. Em grande parte das aplicações, ambos os efeitos ocorrem de maneira simultânea no material compósito. No envelhecimento químico, ocorre a degradação irreversível da estrutura molecular do material, causada por mecanismos como oxidação, quebra em cadeia, mudanças nas densidades das ligações cruzadas e despolimerização (BARBOSA et al., 2016). Já o envelhecimento físico é um processo irreversível, caracterizado pelas alterações nas conformidades moleculares, sem mudar a

integridade estrutural das mesmas (ODEGARD; BANDYOPADHYAY, 2011). Este processo ocorre devido a longos períodos de exposição a uma temperatura elevada e menor que a temperatura de transição vítrea (T_g). As alterações na conformidade molecular resultam em aumento do limite de escoamento, módulo de *Young*, viscosidade, densidade e reduções na fluência e alívio de tensão (BARBOSA et al., 2016).

Fidelis (2014) avaliou o comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibra de juta. Para aumentar a durabilidade dos compósitos foi utilizada uma matriz com baixo teor de hidróxido de cálcio, além de um tratamento superficial do tecido de juta com o polímero estireno butadieno, que é hidrofóbico. O efeito *aging* dos compósitos foi investigado através de processos de envelhecimento acelerado (5, 10, 15, 20 e 25 ciclos de molhagem e secagem) e natural (4, 8 e 12 meses de exposição ao intemperismo). Foram realizados ensaios de tração direta, análise termogravimétrica e microestrutural após o período de análise. O tratamento com polímero contribuiu no aumento da aderência, resistência e durabilidade dos compósitos os quais apresentaram bom comportamento mecânico, de até 20 ciclos de molhagem e secagem e 8 meses de exposição ao envelhecimento natural.

Em um estudo realizado por Poletto (2019) em compósitos poliméricos de matriz de polipropileno (PP), reforçado com fibra de juta, onde os compósitos foram submetidos à análise de envelhecimento acelerado pelo período de um mês, bem como testes de resistência à tração e ao escoamento, antes e depois da análise. Com isso, foi possível observar que os compósitos reforçados com a fibra de juta não apresentaram perda nas propriedades mecânicas, enquanto os compósitos sem a fibra natural apresentaram queda de até 20% no valor de tração e escoamento.

Ainda há pouca literatura que apresenta o desenvolvimento destes compósitos responsivos, principalmente quando se refere a introdução de reforços a partir de tecidos naturais, o que faz desta pesquisa uma excelente oportunidade de desenvolvimento de um compósito inteligente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são descritos os materiais, métodos e equipamentos utilizados no desenvolvimento dos tecidos funcionalizados e na produção e caracterização dos compósitos.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa foi de natureza aplicada, fazendo uso de teorias já existentes como referência para as atividades executadas (SANTOS, FILHO, 2011), visando à construção de um compósito funcionalizado.

Quanto aos objetivos, a pesquisa foi de caráter explicativo e exploratório. Explicativa no que tange o aprofundamento do conhecimento paralelo à realidade, utilizando-se do método experimental, onde foram fabricados corpos de prova para posterior realização de ensaios, bem como avaliação técnica do material elaborado. Exploratória, visto que se realizou um estudo preliminar para definir os objetivos, para se obter maior familiaridade com o assunto do trabalho desenvolvido e suas peculiaridades (GIL, 2010).

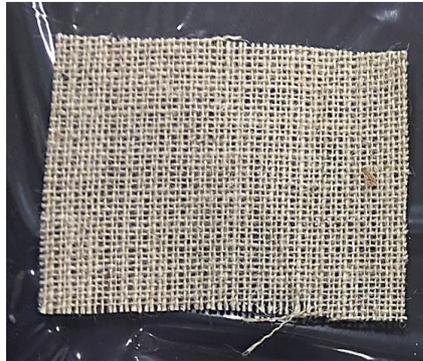
Quanto à abordagem, a pesquisa foi de caráter quantitativo e qualitativo, afinal, além de avaliar os resultados dos ensaios, foram realizadas também análises físico-químicas para observar a qualidade e acabamento dos materiais utilizados e dos processamentos aplicados. Em relação aos procedimentos, foi experimental (GIL, 2010).

3.2 Materiais

Para o desenvolvimento dos compósitos inteligentes foi utilizado tecido de juta de raporte tafetá, gramatura de 190 gm/2, com 3 fios/cm na direção do urdume e 2 fios/cm na direção da trama, fornecido pela empresa CASTANHAL COMPANHIA TÊXTIL, cujo aspecto é apresentado na Figura 8. A resina utilizada é poliéster cristal FORTCOM 6100, da empresa OSWALDO CRUZ QUÍMICA. Optou-se por utilizar uma resina translúcida, pois esta permite melhor controle visual da alteração da cor do compósito em relação ao tecido funcionalizado.

Por fim, o agente funcionalizante para o tingimento foi o corante Chromicolor AQ Ink, marca BRASCHEMICAL, cor Fast Blue.

Figura 8 – Tecido de juta utilizado como matéria-prima para a obtenção dos compósitos.

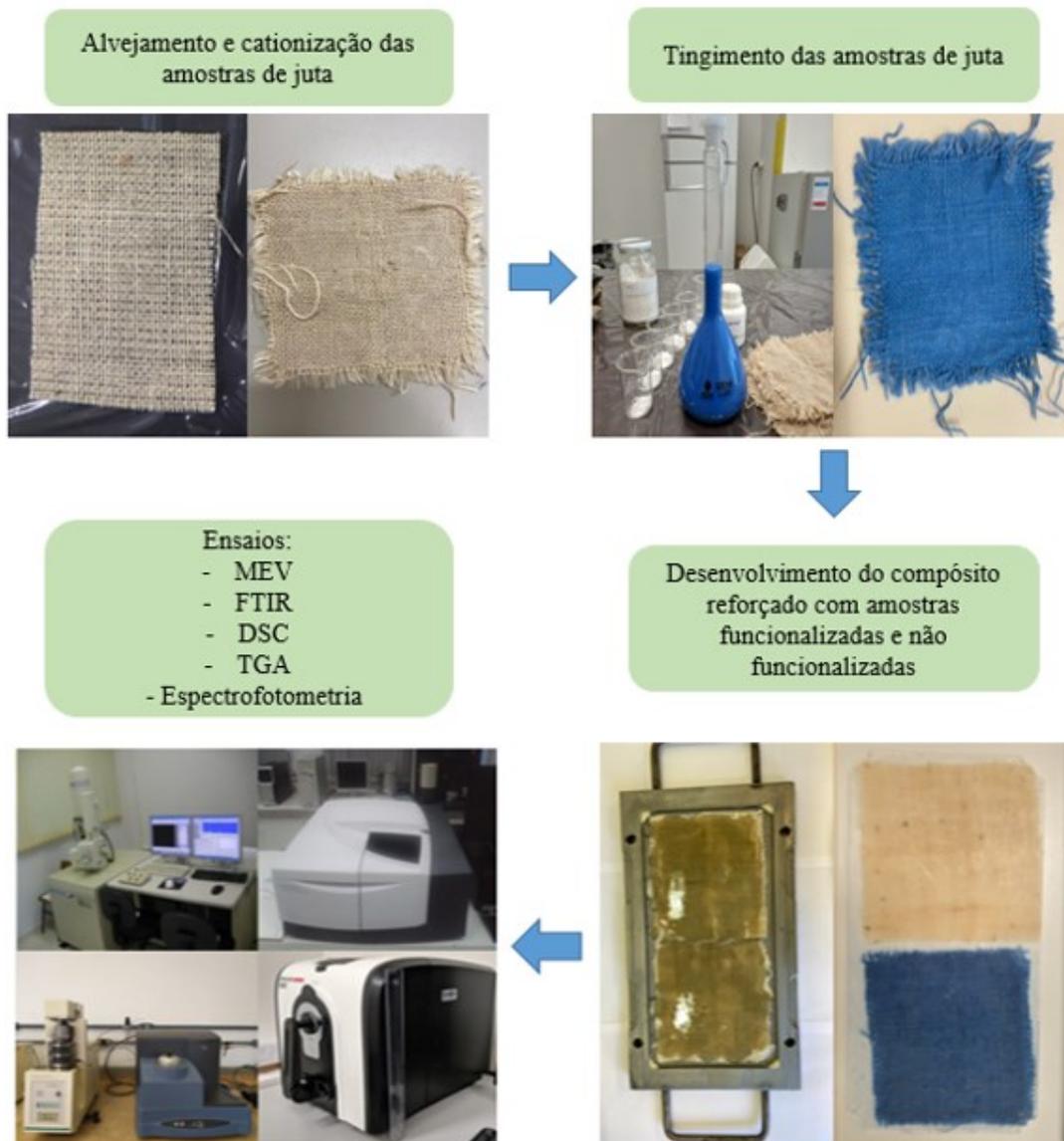


Fonte: Autoria própria (2022)

3.3 Métodos

Os tingimentos e as lavagens redutivas foram realizados no Laboratório de Beneficiamento (LABENE). As medições no espectrofotômetro ocorreram no Laboratório de Cuidados Têxteis (LABCT) e as análises dos substratos e compósitos foram realizadas no Laboratório de Tecidos e Malhas (LABTEC) – todos localizados na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) no Departamento de Engenharia Têxtil, Campus Blumenau. A Figura 9 apresenta um demonstrativo das etapas para realização deste trabalho.

Figura 9 – Etapas de desenvolvimento do trabalho



Fonte: Autoria própria (2022)

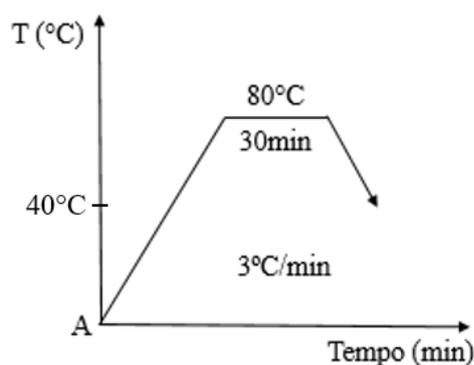
3.2.1 Preparação da fibra para o processo de incorporação do pigmento termocrômico

Primeiramente, foram separadas 10 amostras de tecido de juta, de 10 g cada. As amostras foram alvejadas utilizando o equipamento da marca HT-IR DYER da empresa TEXCONTROL, modelo TC 2200, com aquecimento por infravermelho (IR), presente no LABENE. O alveamento foi realizado com o objetivo de transformar as impurezas coloridas em particulados incolores, produzindo um material mais branco.

Para o processo de alvejamento foi preparada uma solução de 1 L com concentrações de 1 % de hidróxido de sódio industrial 50 %, 1 % de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), 4 % de detergente da marca COLOR QUÍMICA (Color emulg EMG 441) e 4 % de agente dispersante de cálcio e magnésio, da marca Colorsperse DSP 1098.

A relação de tecido para banho foi de 1:20. As amostras e a solução foram colocadas individualmente nos canecos de tingimento e o processo iniciou-se na temperatura ambiente (A), em torno de 23 °C, aquecendo até 80 °C com uma rampa de aquecimento de 3 °C/min. Após atingir 80 °C, o processo ficou nessa temperatura por 30 minutos e procedeu-se o resfriamento até 40 °C. Ao fim do processo as amostras foram lavadas com água deionizada, com o intuito de retirar os residuais de detergente e NaOH, até obter-se pH neutro. Após, as mesmas foram colocadas em estufa para sua secagem. A Figura 10 apresenta a curva do alvejamento.

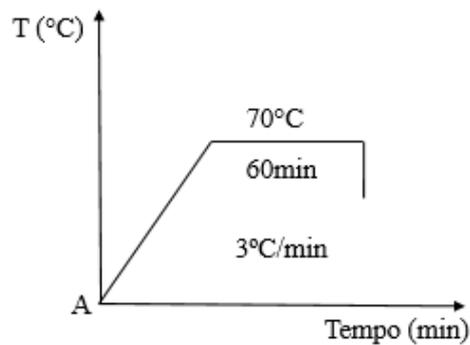
Figura 10 – Curva do alvejamento



Fonte: Autoria própria (2022)

Após o alvejamento foi aplicado o agente cationizante, onde se utilizou 5 % de poli(cloreto de dialildimetilamônio) (PDDA-CL) sobre a massa do material, totalizando 0,5 g do agente. As mesmas foram colocadas individualmente nos canecos e o processo de cationização iniciou na temperatura ambiente, aquecendo até 70 °C com uma rampa de aquecimento de 3 °C/min. Ao atingir 70 °C as amostras permaneceram por uma hora nessa temperatura e após esse período foram retiradas do equipamento. A Figura 11 apresenta a curva de cationização.

Figura 11 – Curva de cationização



Fonte: Autoria própria (2022)

3.2.2 Processo de funcionalização

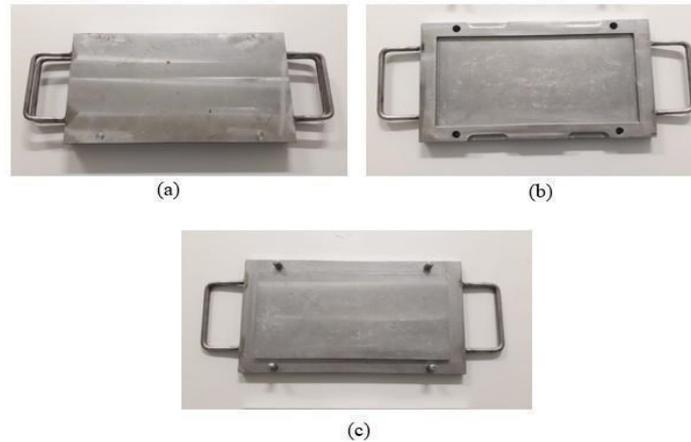
O tecido de juta, após passar pelo processo de alveamento, seguiu para o banho de tingimento. Esse processo ocorreu pelos métodos chamados de *pad-dry* e *pad-bath*, os quais são sistemas de tingimento contínuo por banho em foulard, constituído por um chassis contendo dois rolos de compressão. No *pad-dry*, o tecido é seco a quente à uma temperatura de 80 °C após o tingimento, enquanto o *pad-bath* seca em temperatura ambiente. Ambas as formas foram testadas, não apresentando alteração significativa no tingimento das amostras. Foi optado por utilizar as amostras submetidas ao *pad-bath*.

Para a funcionalização, foi utilizada a concentração de 50 g de agente para uma solução de 1 L. O corante foi depositado no foulard, o qual foi ajustado a uma pressão de 4 bar, a uma velocidade de 4 m/min. As amostras passaram pelo foulard duas vezes, a fim de se obter uma maior impregnação do pigmento termocrômico no tecido.

3.2.3 Preparação dos compósitos

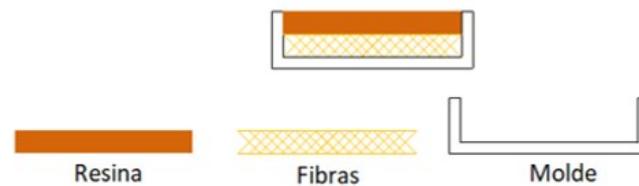
Os compósitos foram preparados pelo método de *Hand Lay Up*, onde foi utilizado um molde fechado para a sua formação, conforme pode ser visualizado na Figura 12. A formação do compósito foi dada com o tecido sendo depositado no molde e a resina sobre o mesmo, conforme ilustrado na Figura 13. Foram desenvolvidos compósitos com o tecido *in natura* e funcionalizado.

Figura 12 – Molde fechado (a), parte inferior do molde (b), parte superior do molde (c)



Fonte: Autorial própria (2021)

Figura 13 – Disposição dos materiais no molde do compósito.



Fonte: Adaptado de Schuch et al. (2020)

Utilizou-se 150 ml de resina juntamente com 1,5 ml de catalisador sobre a massa da resina. A cura das amostras ocorreu em capela, e após o período de 24 h, as mesmas foram retiradas do molde.

Com o auxílio de um paquímetro foi possível observar que os compósitos desenvolvidos ficaram com a espessura aproximada de 0,5 mm. Todos os processamentos foram realizados a uma temperatura ambiente controlada de 23 °C. Os procedimentos de manuseio e segurança exigidos pelos laboratórios foram seguidos.

3.2.4 Análises físico-químicas

Os corpos de prova desenvolvidos foram submetidos a análises térmicas e químicas, a fim de se verificar a caracterização das amostras desenvolvidas.

3.2.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

Através dessa análise é possível obter imagens com elevada resolução da superfície dos substratos têxteis. As análises dos tecidos alvejados e funcionalizados, bem como dos compósitos reforçados com a juta alvejada e funcionalizada foram realizadas no laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) da UFSC Florianópolis, através do microscópio eletrônico de varredura da marca JEOL JSM-6390LV Scanning Electron Microscope (MEV).

3.2.4.2 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier

Essa análise tem como objetivo verificar as estruturas moleculares e cadeias químicas dos seus constituintes, neste caso, o tecido funcionalizado e o compósito reforçado com tecido funcionalizado. As análises foram realizadas em um espectrofotômetro Frontier FTIR da marca AGILENT TECHNOLOGIES – Cary 660 FTIR, na Central de Análises (EQA) da UFSC, campus Florianópolis. Os espectros foram obtidos em números de onda de 4000 a 400 cm^{-1} .

3.2.4.3 Calorimetria Exploratória Diferencial

Essa análise foi realizada na Central de Análises (EQA) da UFSC, Campus Florianópolis. Utilizou-se o equipamento de modelo Jade-DSC (PERKIN ELMER), equipado com um Sistema Intracooler 2P. Essa análise permite obter os valores de transição vítrea (T_g) tanto do tecido como do compósito funcionalizado. Ainda, as amostras foram analisadas nas seguintes condições:

- Massa das amostras: 10 mg;
- Temperatura: 30 a 450 °C;
- Atmosfera: ar sintético;
- Taxa de aquecimento: 10 °C/min;
- Fluxo de N_2 : 20 mL/min.

3.2.4.4 Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica (TGA) é uma técnica de análise térmica onde a alteração da massa da amostra é avaliada em função da variação controlada da temperatura ao longo tempo (FERREIRA et al., 2017). Essa análise é amplamente utilizada para investigar a temperatura de decomposição de polímeros, como o poliéster, e para determinar os parâmetros cinéticos de decomposição térmica (ZOHDY, 2005), ou seja, é utilizada para ter uma melhor compreensão da estabilidade térmica dos materiais.

A técnica foi aplicada para avaliar a estabilidade térmica do tecido de juta alvejado e funcionalizado, bem como dos compósitos reforçados com ambos os tecidos (alvejado e funcionalizado). Os ensaios de TGA foram realizados no Laboratório de Controle e Processos de Polimerização da UFSC Campus Florianópolis. O equipamento utilizado foi da marca NETZSCH, modelo STA 449 F3 Júpiter, utilizado cadinho de alumina, fluxo de gás de 50 mL/min, taxa de aquecimento de 20 °C/min, atmosfera de nitrogênio e range de temperatura 30 a 600°C, para uma amostra de 10 mg.

3.2.4.5 Análises no espectrofotômetro de refletância

As amostras alvejadas e tingidas antes e após sua aplicação no compósito foram medidas no equipamento espectrofotômetro da marca DATACOLOR (modelo 500) com o intuito de se analisar a uniformidade da aplicação e o efeito do corante no tecido de juta (Figura 14). Foi utilizado o iluminante D65, que representa a luz do dia, observador 10° e abertura 6 mm.

Para a avaliação da uniformidade do tingimento, relacionada à ausência de manchas e à qualidade do produto, foram realizadas medições de cor em três amostras funcionalizadas em quatro pontos diferentes.

Figura 14 – Espectrofotômetro DATACOLOR 500



Fonte: Autoria própria (2022)

Foram medidos os parâmetros de cor CIELAB L^* , a^* e b^* . O L^* representa a luminosidade, que varia entre 0 (preto ideal) e 100 (branco ideal); a coordenada a^* representa a cor vermelha (+ a^*) e verde (- a^*); a coordenada b^* representa a cor amarela (+ b^*) e azul (- b^*) (ANAND, 2016).

A partir destes parâmetros é possível obter a diferença de cor que pode ser indicada por meio de um único valor, o Delta E (ΔE), o qual representa a distância geométrica entre dois pontos no espaço de cor, obtendo desta forma o valor da diferença de cor entre as amostras analisadas. Quanto maior o valor de ΔE , maior a diferença de cor. Por meio das análises de cor nos tecidos tintos também foi possível verificar a uniformidade do tingimento, realizando a leitura em 4 pontos e analisando o ΔE em uma mesma amostra. A variação da cor foi calculada conforme a Equação 1, onde ΔE representa a diferença de cor, ΔL diferença de cor da coordenada L^* , Δa diferença de cor da coordenada a^* e Δb diferença de cor da coordenada b^* .

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (1)$$

Para verificar a alteração da coloração do tecido de juta, os testes foram realizados em ambiente com temperatura mantida entre 22.8°C~23.8°C, um dia após a funcionalização. O estímulo nas amostras ocorreu através de duas maneiras:

- Aplicação de calor por meio de um secador de cabelo, a uma temperatura de 60 °C e distância de 5 cm das amostras;
- Aplicação de calor através de uma placa de aquecimento, chegando a uma temperatura de 60 °C, entrando em contato direto com as amostras.

Para a obtenção dos valores de cada coordenada foram realizadas análises em triplicata para cada amostra. Em seguida, foi realizada a média dos resultados obtidos.

Os valores de K/S também foram avaliados a fim de se comparar a intensidade colorística das amostras, ou seja, quanto maior o valor, mais intensa é a cor. Através dos valores de K/S gerados pelo espectrofotômetro, realizou-se o somatório de todos os valores em cada concentração, para que posteriormente fossem utilizados para construir os gráficos.

3.2.4.6 Efeito aging

O efeito *aging* foi analisado sobre os tecidos funcionalizados e os compósitos desenvolvidos, a fim de observar se no decorrer do tempo as amostras funcionalizadas sofreriam algum comprometimento. Aplicando-se um calor de 60 °C, conforme planejamento experimental, foi realizado o acompanhamento durante o período de 1, 15 e 30 dias e durante esse período foi feita a medição das coordenadas colorimétricas L*, a*, b* e ΔE das amostras no espectrofotômetro, realizando-se um comparativo dos resultados a fim de se observar a existência da degradação do agente funcionalizante.

Além disso, foi verificado a alteração da coloração das amostras após os instantes de 10, 20, 30, 40, 50 segundos, 1 minuto, 2 minutos, 5 minutos e 10 minutos a partir da aplicação de calor nas amostras.

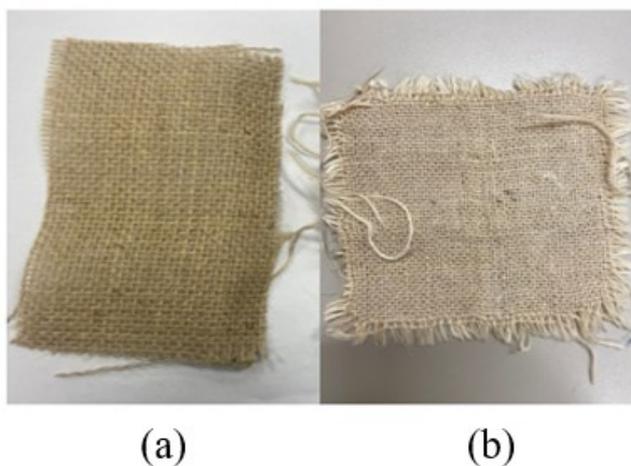
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são discutidos os resultados obtidos com o desenvolvimento do compósito de matriz poliéster cristal utilizando como reforço tecido de juta funcionalizado com pigmento termocrômico. Primeiramente, foram avaliadas as características colorimétricas das amostras e na sequência as características térmicas dos tecidos e dos compósitos, finalizando com a avaliação do efeito *aging*. A solução apresentada na pesquisa visou a (re)utilização do tecido de juta, buscando encontrar uma nova aplicação para esses substratos, aliada aa inovação, no desenvolvimento de compósitos inteligentes.

4.1 PREPARAÇÃO E FUNCIONALIZAÇÃO DA JUTA

O tecido de juta foi previamente alvejado e cationizado, para a seguir ser funcionalizado. O resultado do alvejamento pode ser observado na Figura 15.

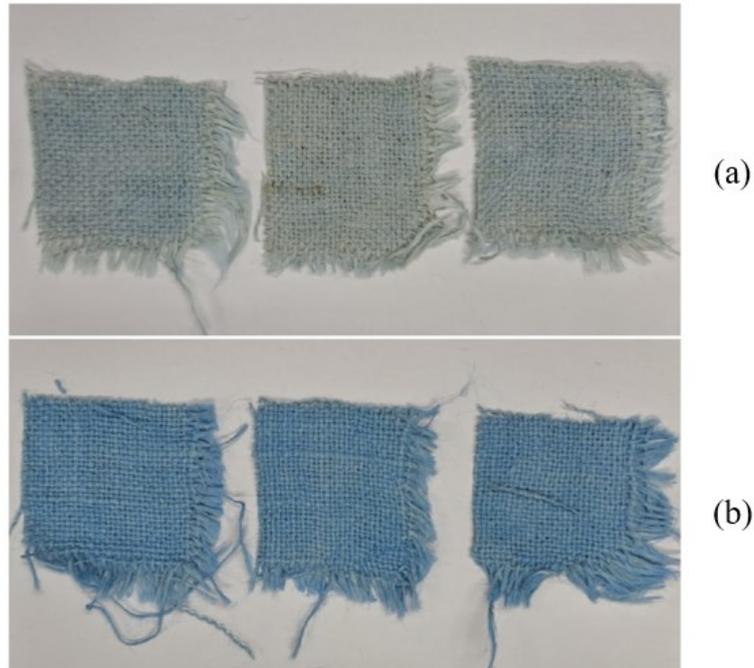
Figura 15 – Comparativo entre as amostras sem (a) e com alvejamento (a)



Fonte: Autoria própria (2022)

O resultado da cationização nas amostras e a influência que o processo gerou na pigmentação da juta pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 – Comparativo das amostras sem (a) e com (b) agente cationizante

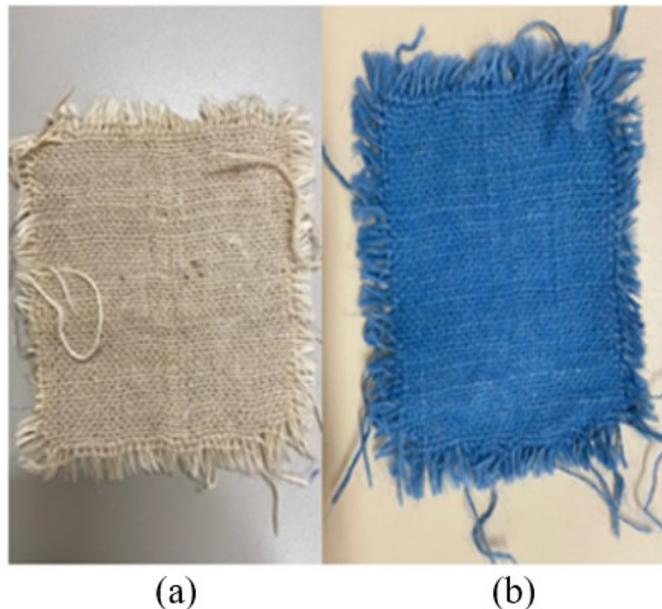


Fonte: Autoria própria (2022)

A incorporação de grupos catiônicos na celulose tem por finalidade não apenas eliminar a repulsão entre corante e fibra, porém a criação de uma atração iônica, de maneira a aumentar a eficiência do processo de tingimento. Observando a Figura 16 é possível concluir que a cationização da fibra favorece a fixação do termocrômico, o que provavelmente é decorrente das interações químicas iônicas entre grupos funcionais aniônicos do termocrômico e os grupos cationizados da celulose da juta.

A Figura 17 ilustra o tecido alvejado e a seguir funcionalizado com o agente termocrômico.

Figura 17 – Comparativo entre as amostras de tecido alvejado e cationizado (a) e funcionalizado (b)



Fonte: Autoria própria (2022)

Visualmente observa-se a partir desta Figura 17, que o tingimento apresentou boa qualidade e uniformidade do tecido.

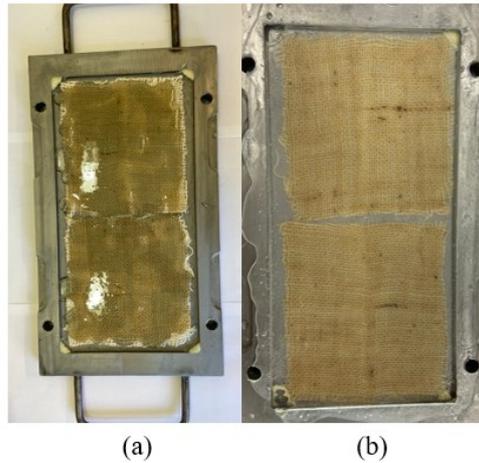
4.2 COMPÓSITO PRODUZIDO

Após a preparação e tingimento do tecido juta foi realizado o compósito, unindo a resina de poliéster cristal às amostras preparadas e funcionalizadas, conforme pode ser observado nas Figuras 18 e 19.

Com base nas Figuras 18 e 19, conclui-se que o compósito apresentou um bom resultado final, onde após curado a resina manteve o seu aspecto incolor, não influenciando na análise final da mesma. Ainda, para o compósito com tecido funcionalizado foi possível observar que não houve migração do agente funcionalizante para a resina, o que indica que o mesmo incorporou de maneira satisfatória no tecido.

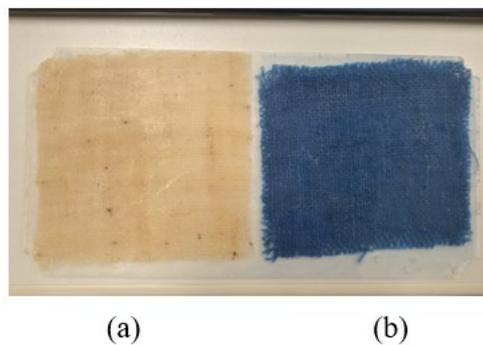
Fazendo uma comparação entre amostra de tecido funcionalizado e compósito reforçado com o mesmo, observa-se uma acentuação na coloração da amostra, o que indica que a resina influencia na força colorística da mesma.

Figura 18 – Aplicação da resina no tecido de juta (a) e resultado do compósito após 24h (b)



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 19 – Compósito produzido com reforço de tecido de juta alvejada e cationizada (a) e com juta funcionalizada (b)



Fonte: Autoria própria (2022)

4.3 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DAS AMOSTRAS

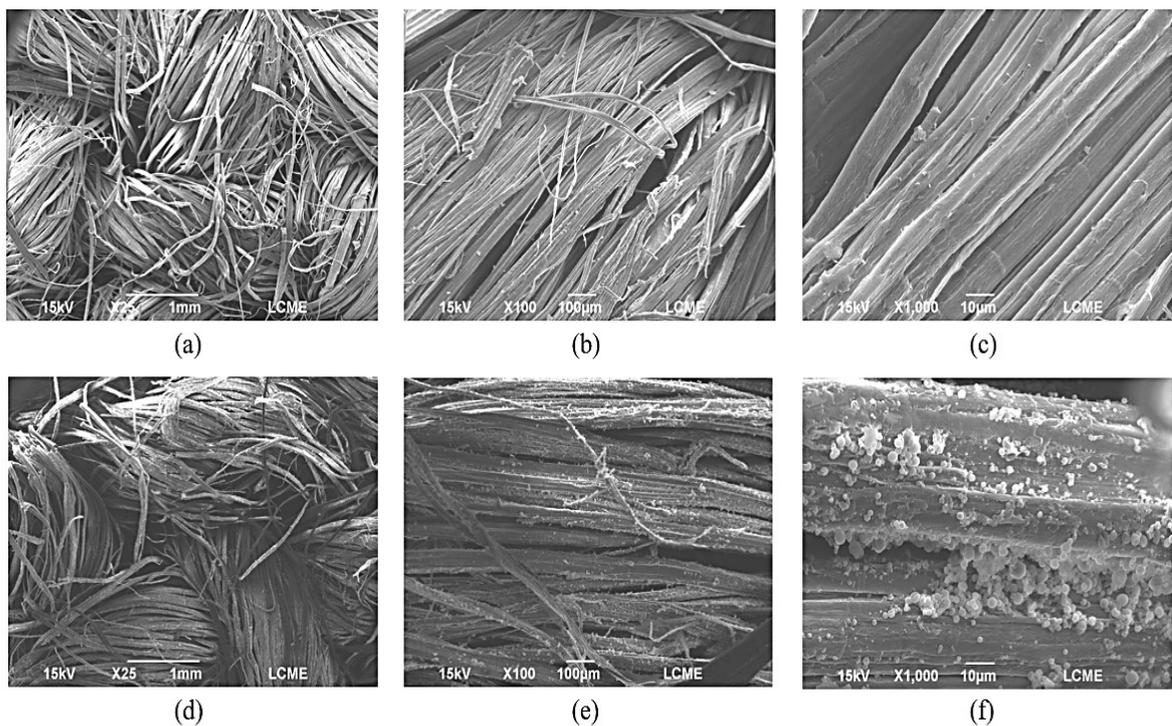
Foram realizadas análises termoanalíticas das amostras de tecido de juta alvejada e cationizada, funcionalizada e dos compósitos reforçados com as mesmas, com o intuito de avaliar termicamente a influência que a proporção reforço/matriz ocasionam no compósito.

4.3.1 Morfologia

As análises por microscopia eletrônica de varredura têm por objetivo determinar as características das fibras do tecido juta quanto à sua morfologia e ao aspecto superficial. A resina poliéster cristal é um material polimérico termofixo com hidrofobicidade.

As micrografias da superfície do tecido de juta alvejada e funcionalizada, são apresentadas em diferentes magnitudes (25x, 100 e 1000x) na Figura 20 (a), (b), (c), (d), (e) e (f). Analisando as imagens da Figura 20, foi possível detectar a presença do agente funcionalizante na superfície das fibras, a qual apresenta uma distribuição relativamente heterogênea, devido a existência de regiões com aglomerados.

Figura 20 – Micrografias das amostras de juta alvejada (a), (b) e (c) e funcionalizada (d), (e) e (f)

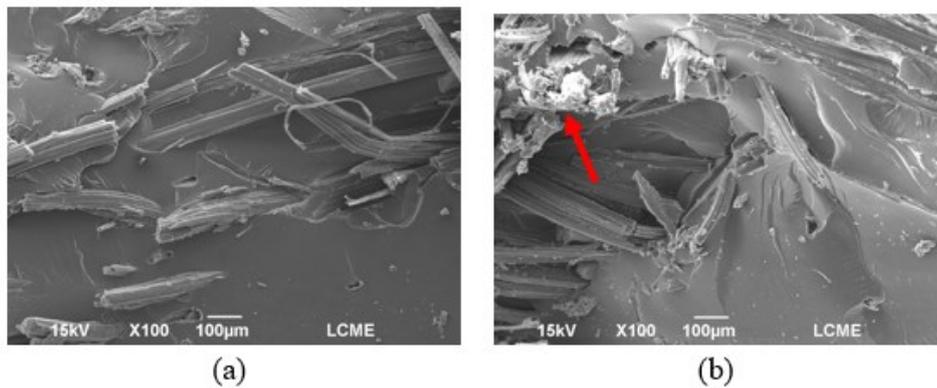


Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 21 mostra as micrografias obtidas do compósito reforçado com juta alvejada e cationizada (a), e do compósito reforçado com juta funcionalizada (b). Nas imagens observa-se que as fibras do tecido foram envoltas com a resina após o desenvolvimento. Ainda, na

imagem do compósito com juta funcionalizada (b) é possível observar os aglomerados do agente funcionalizante presentes na juta.

Figura 21 – Micrografias das amostras de compósito reforçado com juta alvejada e cationizada (a) e funcionalizada (b)

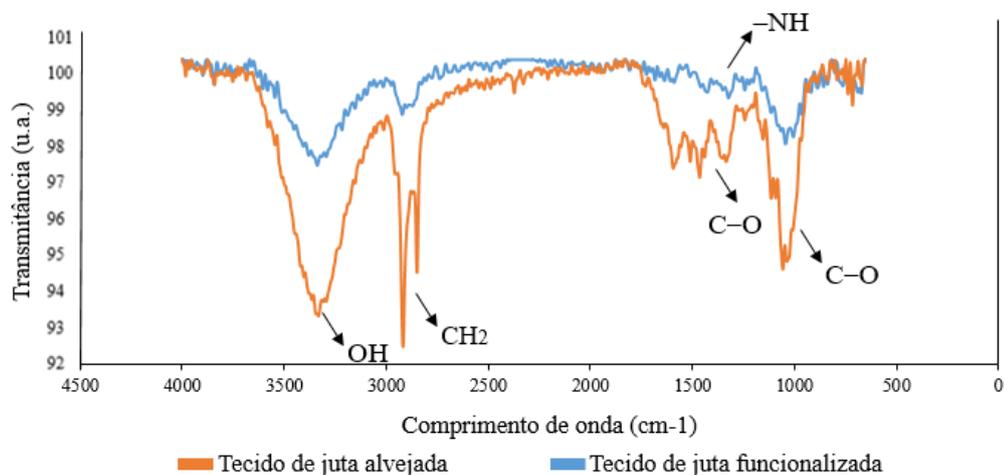


Fonte: Autoria própria (2022)

4.3.2 Grupos químicos

Relativo à composição dos compósitos reforçados com os tecidos alvejado e funcionalizado, realizou-se a análise de FTIR. O gráfico da Figura 22 apresenta as bandas correspondentes ao tecido com juta alvejada e ao tecido reforçado com juta funcionalizada. É necessário ressaltar que a composição química do agente funcionalizante não é conhecida.

Figura 22 – FTIR do tecido reforçado com tecido de juta alvejada e funcionalizada



Fonte: Autoria própria (2022)

Antes de analisar a Figura 22, vale ressaltar que a juta é uma fibra celulósica hidrofílica com uma grande quantidade de grupos hidroxila. Observa-se na Figura 22 um pequeno estiramento na banda 713 cm^{-1} , o qual representa uma deformação angular de $-\text{CH}$ aromático (PAVIA et al., 2015). O pico em 1052 cm^{-1} , observado no espectro para o tecido alvejado, está associado ao alongamento das vibrações C-O e a deformação C-H do anel de celulose da piranose esquelética. Isso é justificado devido ao branqueamento da juta, evidenciando esses picos na faixa de 1170 cm^{-1} a 1040 cm^{-1} , correspondendo à remoção de constituintes amorfos, e consequente gerando exposição à celulose (VISHNU VARDHINI e MURUGAN, 2017).

As bandas presentes em 1602 cm^{-1} referem-se ao alongamento C-O do álcool primário em polissacarídeos típicos (LINDINO et al., 2014), podendo ser perceptível na amostra de juta alvejada.

Uma banda mais forte em 2917 cm^{-1} refere-se a um pico de deformação axial da ligação carboxil C=O, o que pode representar grupos amida, ou grupos carboxílicos. Há também a deformação em um CH metileno (CH_2) (LINDINO et al., 2014).

É possível de se observar que os tecidos citados possuem bandas nas faixas entre 3336 a 3341 cm^{-1} , que estão associadas ao hidrogênio, ligado ao grupo OH, presente nas duas amostras, referente à estrutura da celulose (TRAVALINI, 2015), sendo possível de se observar uma redução da intensidade após a adição do termocrômico.

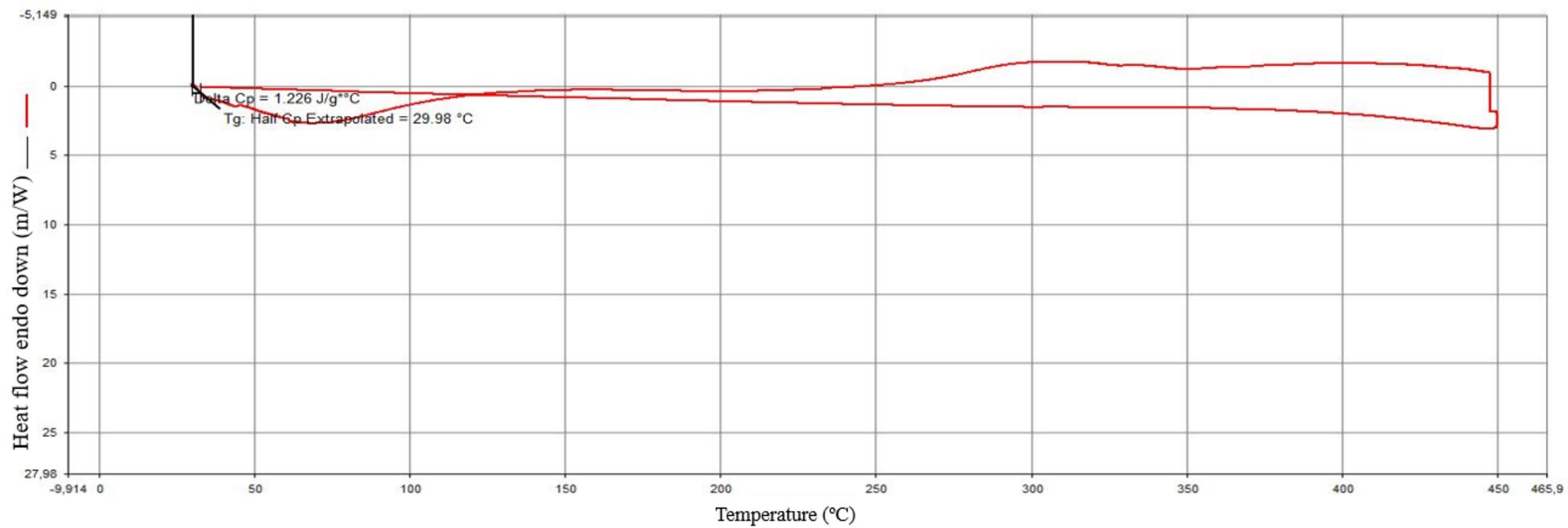
Através do resultado da análise de FTIR, observa-se que o agente termocrômico utilizado possui uma banda em 1515 cm^{-1} , o que indica o dobramento do grupo $-\text{NH}$ (PAVIA et al., 2015). Os picos em 1500 e 1600 cm^{-1} foram devido a picos de estiramento provenientes da abertura do anel fechado no corante. (TÖZÜM; AKSOY; ALKAN, 2020). Portanto, é possível concluir uma alteração expressiva entre as amostras, o que indica a ligação entre o termocrômico e o tecido. Ainda, é concluí-se que o agente utilizado neste trabalho possui uma estrutura química contendo grupos funcionais, que estão presentes no corante leuco comumente utilizado em sistemas de pigmentos termocrômicos (AKISHINO, 2014).

4.3.3 Fluxo de calor do material

A análise de DSC possibilita a avaliação do fluxo de calor do material em função da temperatura e do tempo. Foram obtidos valores de transição vítrea (T_g) das amostras em tecido como do compósito (tecido alvejado e cationizado, tecido funcionalizado, compósito reforçado com tecido alvejado e cationizado e compósito reforçado com tecido funcionalizado).

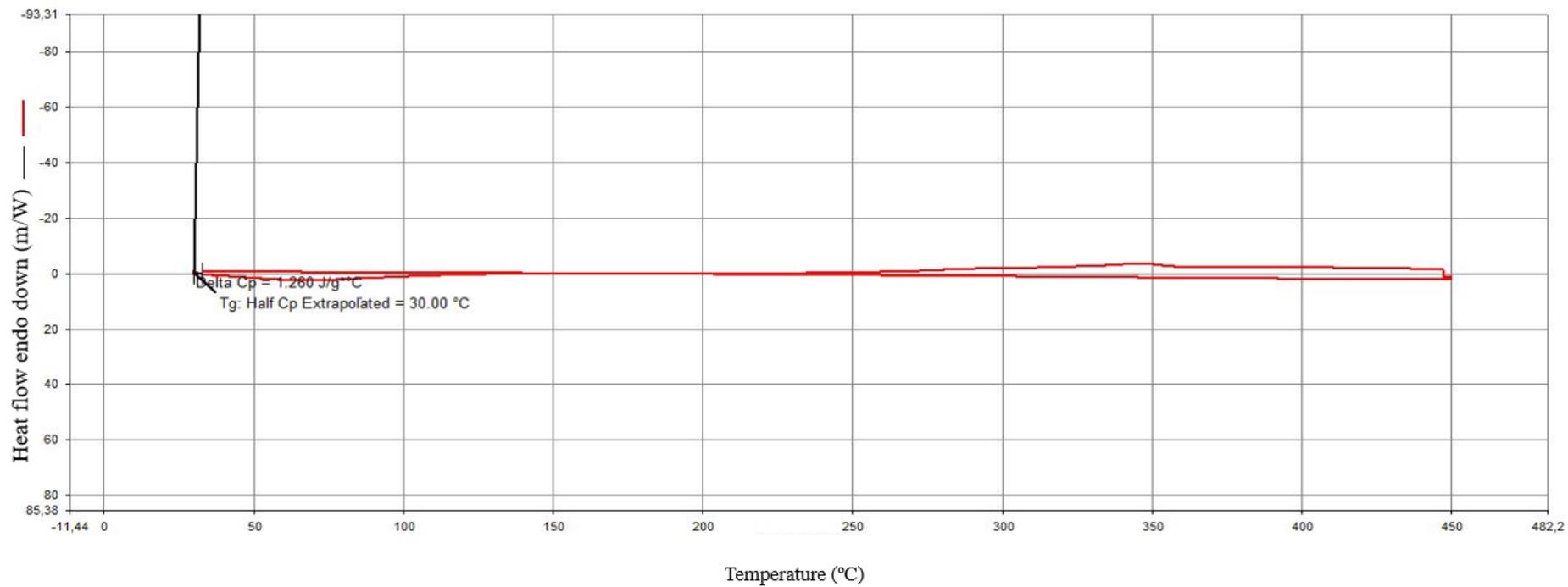
Com apenas um ciclo de aquecimento foi possível determinar a temperatura de transição vítrea das amostras. Os resultados estão presentes na Tabela 2, a partir da análise dos gráficos nas Figuras 23, 24, 25 e 26.

Figura 23 – Curvas de DSC do tecido alvejado e cationizado



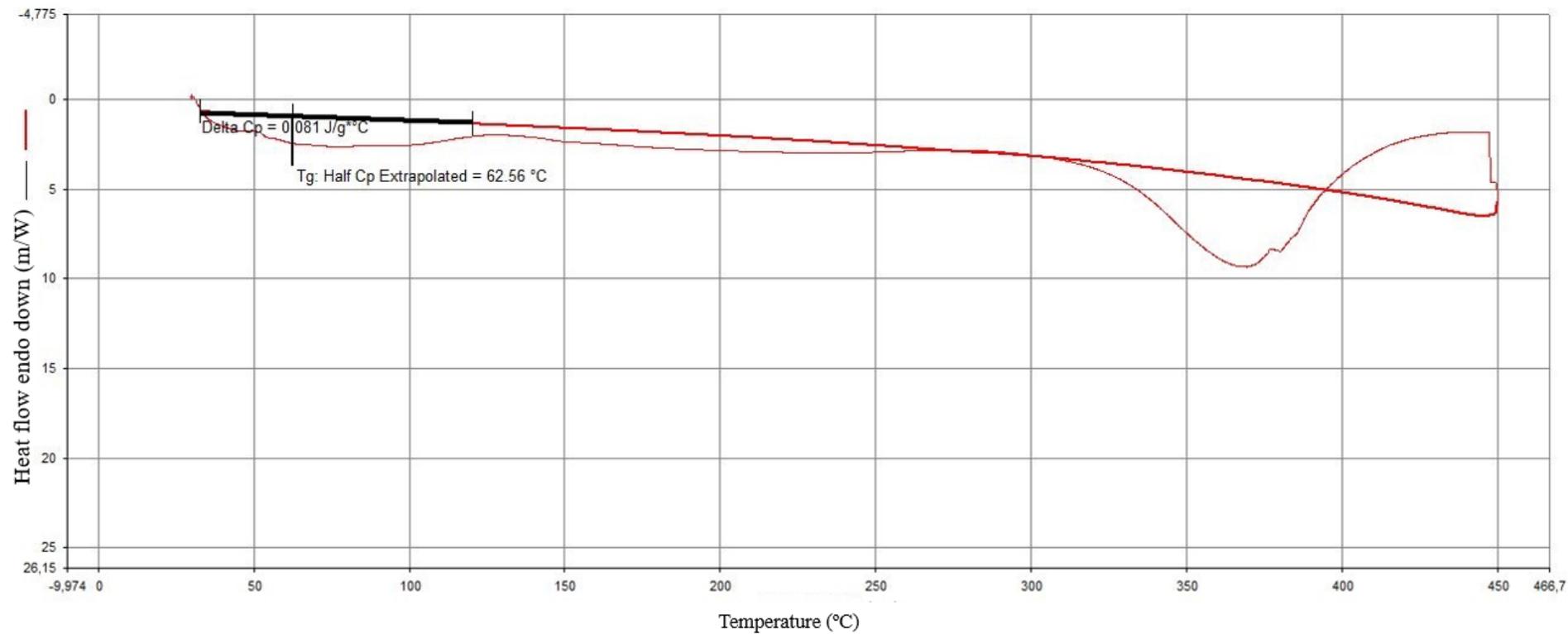
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 24 – Curvas de DSC do tecido funcionalizado



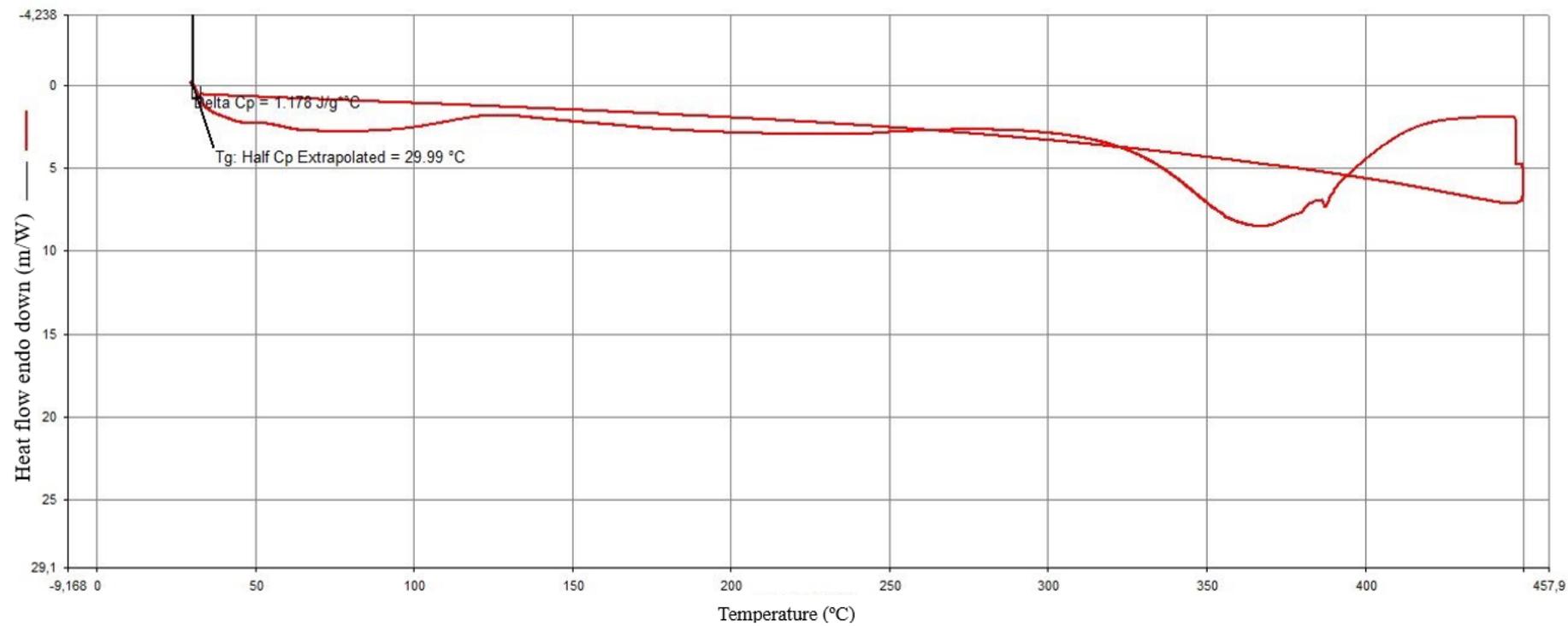
Fonte: Aatoria própria (2022)

Figura 25 – Curvas de DSC do compósito reforçado com tecido alvejado e cationizado



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 26 – Curvas de DSC do compósito reforçado com tecido funcionalizado



Fonte: Autorial própria (2022)

Quando comparados os primeiros dois gráficos das Figuras 23 e 24, referentes aos tecidos alvejado e funcionalizado, observa-se uma pequena perda de massa entre 55°C e 70°C, o que corresponde a perda de umidade presente na estrutura dos tecidos. Além disso, é possível observar na Tabela 2, que a Tg pertencente às duas amostras permaneceu muito semelhante.

Analisando-se na literatura curvas de DSC de materiais termocrômicos verifica-se que a temperatura de fusão e o congelamento de agentes termocrômicos na cor azul são de 34,41 °C e 23,31 °C, respectivamente (HU; WANASEKARA e YU, 2014), o que justifica a queda no valor da Tg do tecido funcionalizado.

Analisando os gráficos das Figuras 25 e 26, verifica-se que a primeira curva de aquecimento dos compósitos apresenta um pico endotérmico em aproximadamente 60 °C. Isso ocorre devido a faixa de temperatura de transição vítrea do poliéster, que é aproximadamente 69 °C (CALLISTER, 2012). Esta é uma reação de segunda ordem e é explicada pelo aumento da mobilidade da cadeia polimérica, como uma transição do estado vítreo para o um estado borrachoso (VERMA et al., 2012). Além disso, há um segundo evento exotérmico a 360°C, relacionado ao processo de pós-cura do material.

Ao se comparar as amostras de compósito de matriz polimérica reforçados com os tecidos de juta, é possível observar um comportamento distinto entre as ambas. A amostra de compósito reforçado com juta alvejada apresenta uma Tg de 62,56 °C, enquanto o compósito reforçado com juta funcionalizada permaneceu na casa dos 30 °C. Essa distinção nas Tgs leva a entender que a adição do agente funcionalizante no tecido de juta influencia em uma menor temperatura de transição vítrea do compósito, enquanto a amostra de compósito com juta alvejada refere-se ao segmento flexível da resina de poliéster cristal.

Há também a possibilidade de o agente funcionalizante possuir uma maior massa molecular, fato que promove uma maior distância entre as ligações presentes no compósito e maior mobilidade das cadeias. Outra hipótese para tal distinção seria que na realização da análise de DSC do compósito com o tecido de juta funcionalizada, o tecido tenha se destacado na análise, e conseqüentemente no resultado, uma vez que se tratam de amostras de massa e tamanho reduzido.

Tabela 2 –Tg das amostras

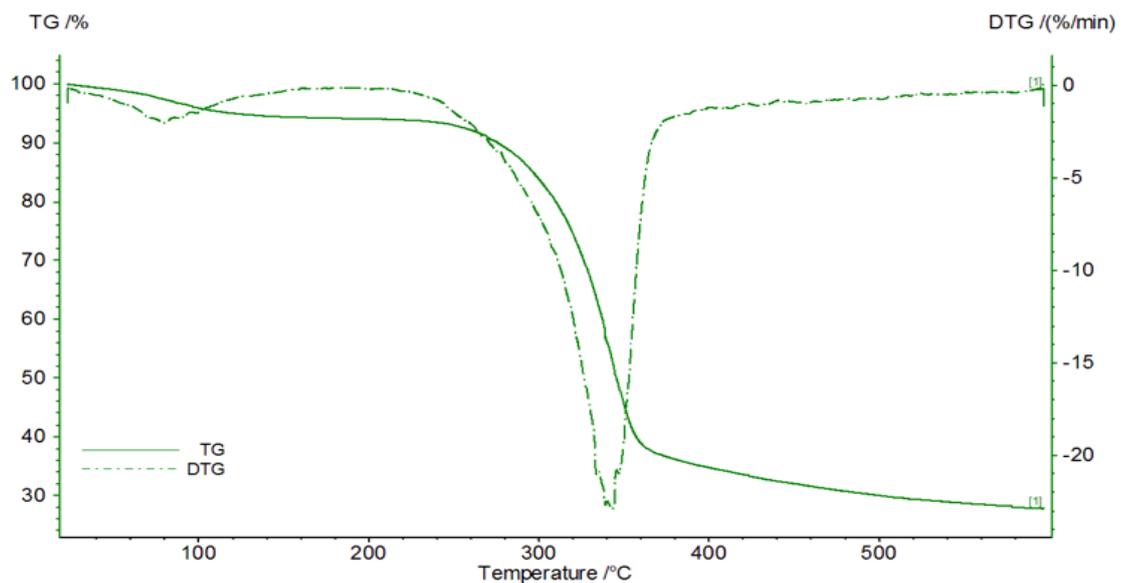
Amostras	Temperatura de transição vítrea [°C]
Tecido alvejado	30
Tecido funcionalizado	29,98
Compósito reforçado com tecido alvejado	62,56
Compósito reforçado com tecido funcionalizado	29,99

Fonte: Autoria própria (2022)

4.3.4 Decomposição térmica

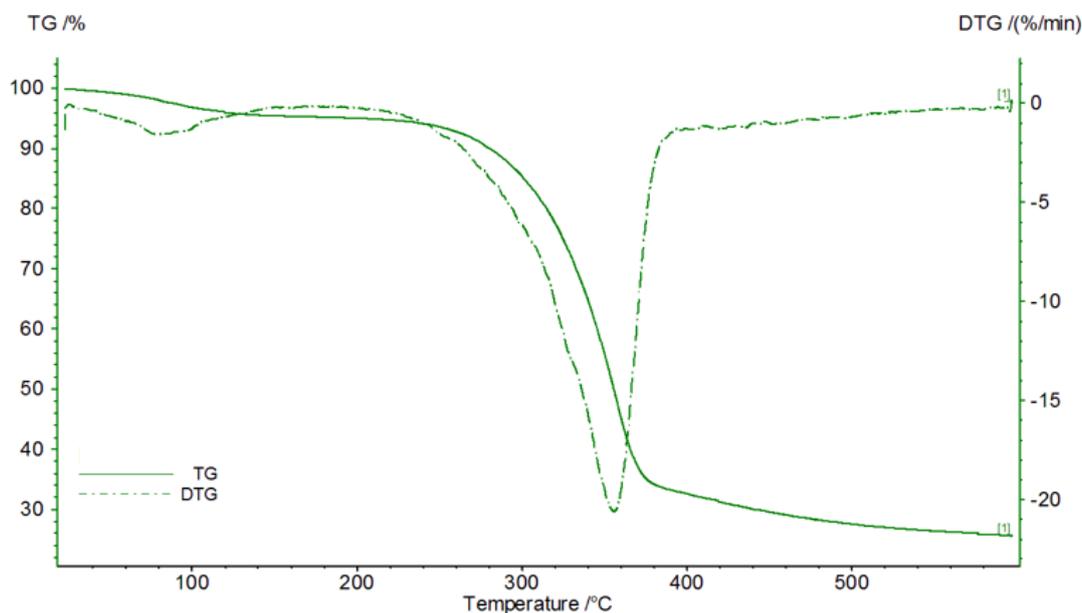
Nas Figuras 27 e 28 são apresentados os gráficos com os resultados obtidos análise de TGA e as suas derivadas (DTG) da amostra alvejada e cationizada e também da amostra funcionalizada, respectivamente.

Figura 27 – TGA e DTG do tecido alvejado e cationizado



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 28 – TGA e DTG do tecido funcionalizado



Fonte: Autoria própria (2022)

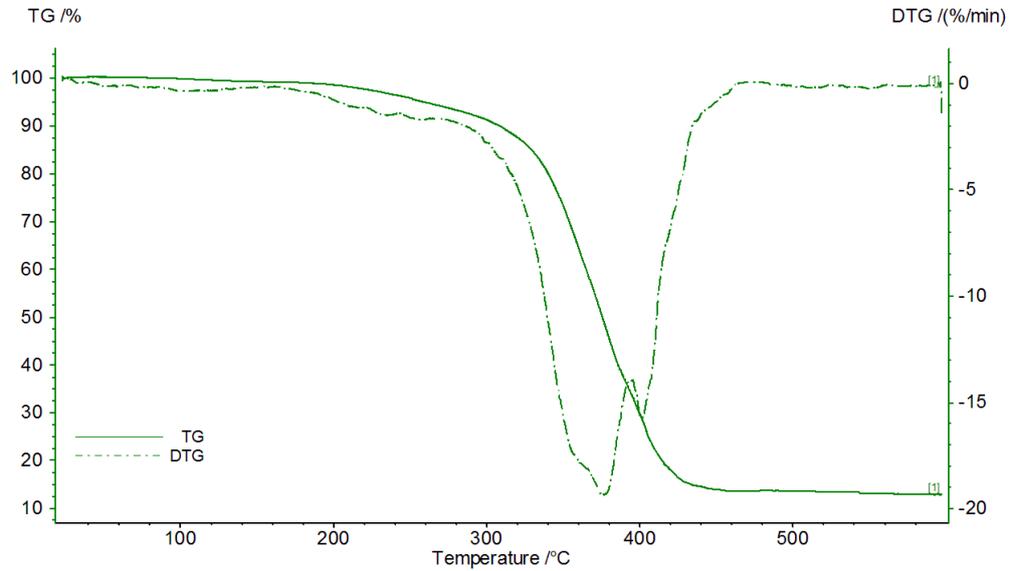
Com base nas duas Figuras, observa-se os níveis importantes de perda de massa associada com eventos para a degradação térmica da juta. A primeira pequena queda de massa devido à perda de umidade absorvida é relativamente estreita para ambas as amostras, sendo 4 % para o tecido alvejado e cationizado, e 5 % para o tecido funcionalizado, ambas situadas entre 0 – 120 °C, com as duas amostras possuindo seu ponto máximo da DTG para essa primeira perda de massa em 180 °C.

A segunda perda de massa durante a decomposição do tecido de juta alvejada e do tecido funcionalizado, foi de 62 % e 56 %, respectivamente, a qual ocorreu na faixa de temperatura de 280 – 375 °C para a juta alvejada e cationizada, e 280 – 400 °C para a juta funcionalizada. Pode-se observar uma maior resistência ao calor aplicado para a juta funcionalizada, o que pode estar relacionado com a introdução do agente termocrômico.

As curvas de DTG apresentam seu pico máximo em 360 °C, correspondendo à decomposição térmica da celulose (ZHANG et al., 2018), que mostra considerável perda de massa nessa faixa de temperatura, observando-se picos equivalentes para ambas as amostras. O resíduo final apresentado, após a degradação dos componentes do pigmento, foi de aproximadamente 25 % de massa à 600 °C.

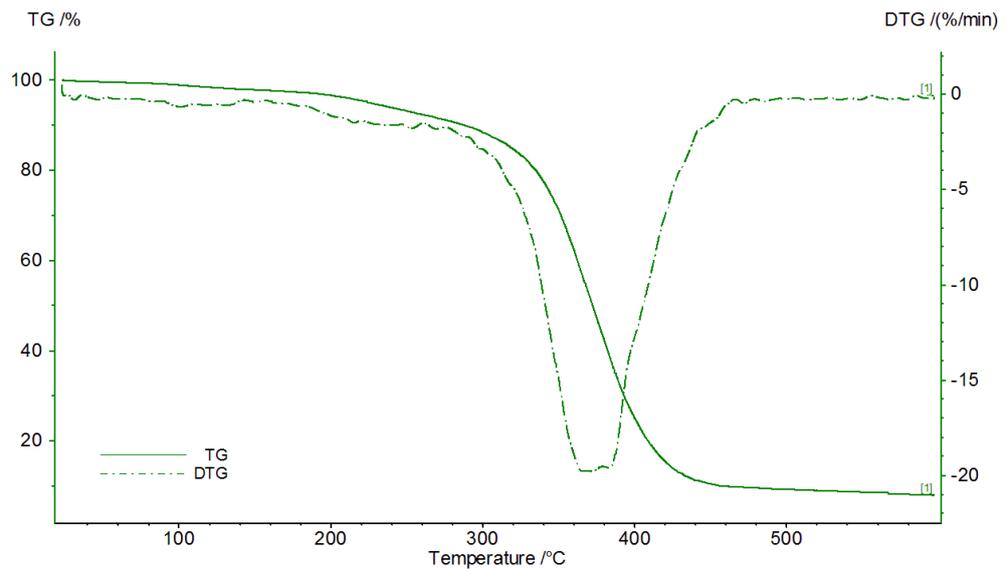
Nas Figuras 29 e 30 são apresentados os TGAs dos compósitos desenvolvidos, tanto utilizando tecido alvejado e cationizado quanto funcionalizado, respectivamente.

Figura 29 – TGA e DTG do compósito reforçado pelo tecido alvejado e cationizado



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 30 – TGA e DTG do compósito reforçado pelo tecido funcionalizado



Fonte: Autoria própria (2022)

Com base nas duas imagens observa-se comportamento similar de perda de massa. A primeira pequena queda ocorre novamente devido à perda de umidade da juta, sendo 5 % para o compósito com tecido alvejado e cationizado, e 6 % para o compósito com tecido funcionalizado, ambas situadas entre 100 – 280 °C, com as duas amostras possuindo seu ponto máximo da DTG para essa primeira perda de massa em 210 °C e 220 °C, respectivamente.

A segunda perda de massa ocorreu durante a decomposição do tecido de juta alvejado e do tecido funcionalizado, a qual representou perda de 85 % e 88 %, respectivamente, ocorrendo na faixa de temperatura de 320 – 420 °C para ambas as amostras. Pode-se observar uma maior perda de massa para o compósito com juta funcionalizada, o que pode estar relacionado à presença do agente termocrômico.

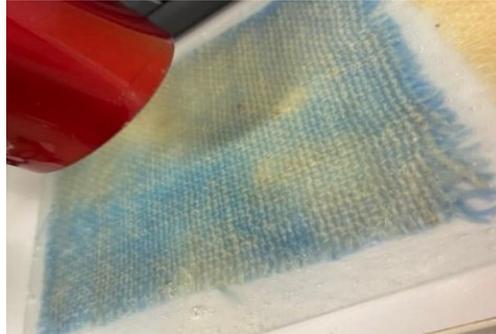
As curvas de DTG apresentam seu pico máximo em 380 °C para o compósito com juta alvejada e cationizada e 360 °C para o compósito com juta funcionalizada, que mostra considerável perda de massa nessa faixa de temperatura. O resíduo final apresentado, após a degradação dos componentes do pigmento, foi de aproximadamente 15 % de massa para o compósito com juta alvejada e cationizada e 5% de massa para o compósito com juta funcionalizada, à 600 °C.

Pode-se verificar que ambas as amostras comportamentos de degradação térmica similares, isto pode ser atribuído ao fato de que o agente funcionalizado não altera as características estruturais do tecido, apenas modifica a sua superfície, devido formar apenas um revestimento.

4.3.5 Alterações colorísticas

A partir da análise da cor do tecido funcionalizado e do compósito reforçado por este, a transferência do efeito do agente termocrômico pode ser avaliada. A Figura 31 ilustra o compósito sendo estimulado a partir da introdução de calor por intermédio de um secador de cabelo a uma distância de 5 cm.

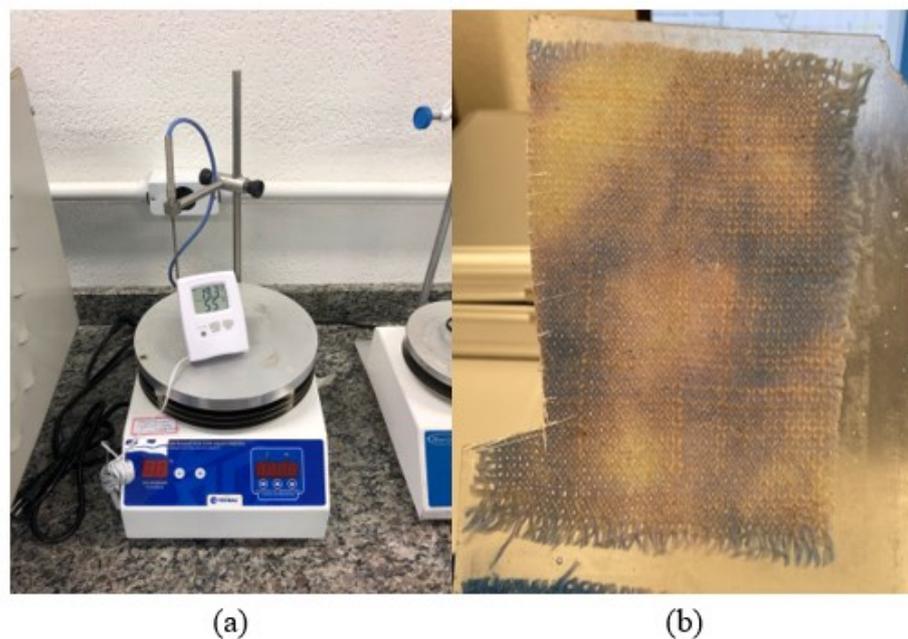
Figura 31 – Aplicação de calor nos compósitos funcionalizados



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 32 ilustra o compósito (b) após submissão ao calor por meio da placa de aquecimento (a). Quando atingida a marca de 60 °C as amostras foram colocadas sobre a placa e alteraram sua coloração no momento do contato. Observou-se alteração da coloração instantânea da amostra de tecido funcionalizado, porém quando colocado o compósito funcionalizado, o mesmo apresentou amolecimento da resina devido à temperatura elevada da chapa diretamente em contato com a superfície do compósito.

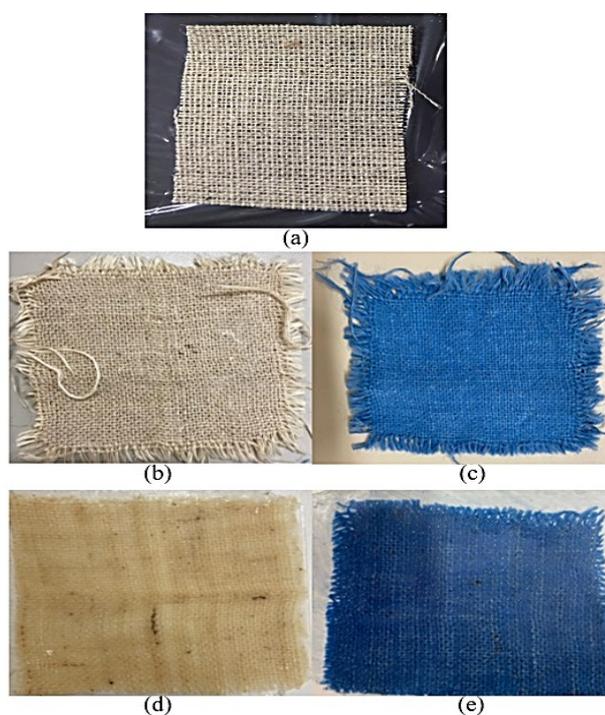
Figura 32 – Placa de aquecimento (a) e compósito após aplicação de calor por meio da placa (b)



Fonte: Autoria própria (2022)

A partir da Figura 33 é possível se observar o tecido de juta *in natura* (a); o tecido alvejado e cationizado (b); o tecido de juta funcionalizado (c); o compósito a partir do tecido sem os agentes termocrômicos (d) e o compósito reforçado com tecido de juta funcionalizado (e).

Figura 33 – Tecido de juta *in natura* (a), tecido alvejado e cationizado (b), tecido funcionalizado (c), compósito reforçado com tecido alvejado e cationizado (d) e compósito reforçado com tecido funcionalizado (e)

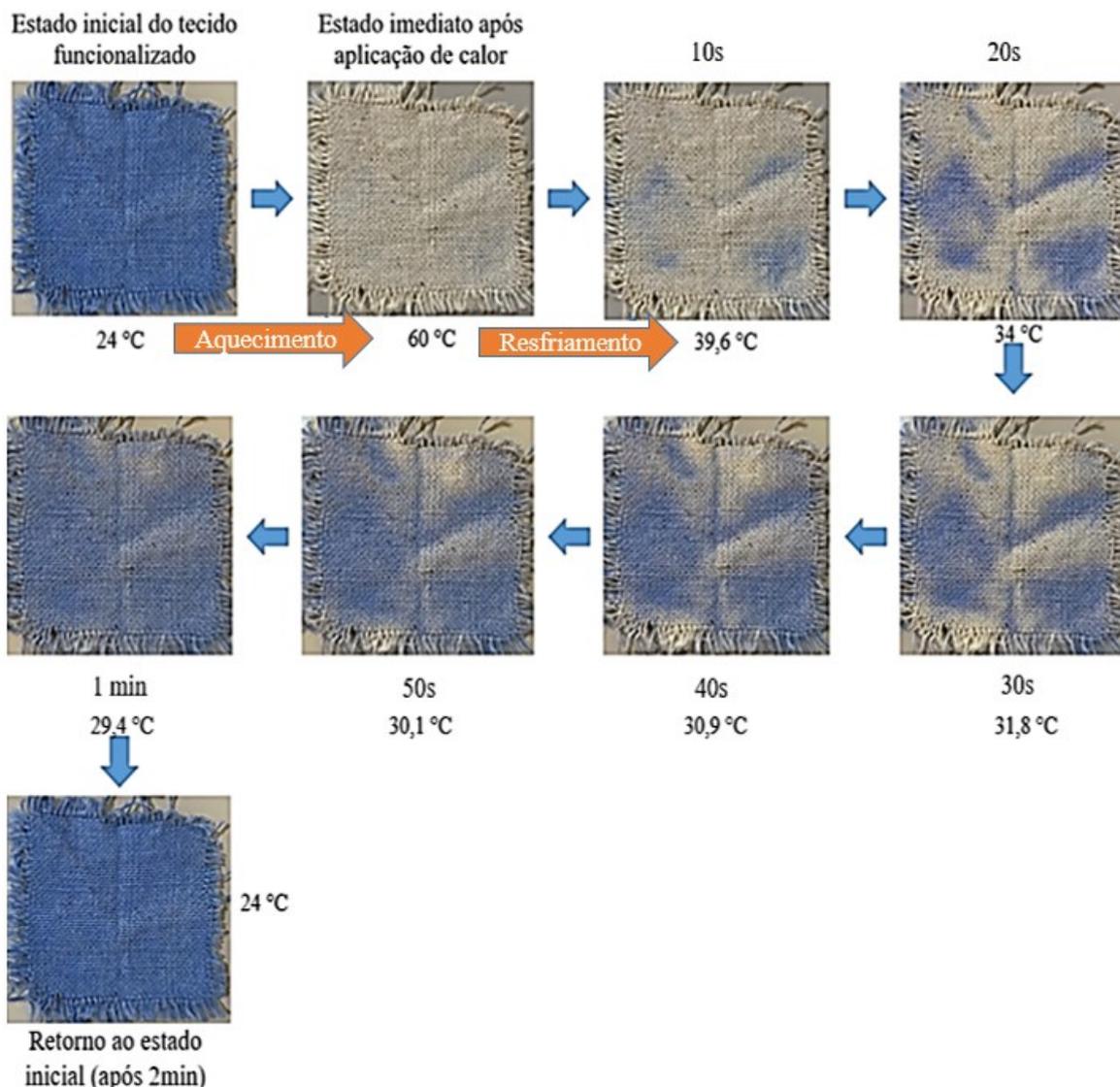


Fonte: Autoria própria (2022)

Para o tecido de juta funcionalizado o período de aplicação de calor e observação da alteração total da coloração da amostra foi de 7 segundos. Para o compósito funcionalizado o período de aplicação de calor e alteração total da cor da amostra foi de 2 minutos e 23 segundos. Este aumento no tempo era esperado, visto que a presença da resina aumentou a resistência à condução de calor até o agente termocrômico. Da mesma forma, o efeito termocrômico durou mais durante o resfriamento, pela resistência à condução de calor da parte interna para o ambiente. Tal ação foi realizada em triplicata e o tempo apresentado consiste na média obtida. A ação do agente funcionalizante após aplicação e remoção de calor nas amostras pode ser observada nas Figuras 34 e 35.

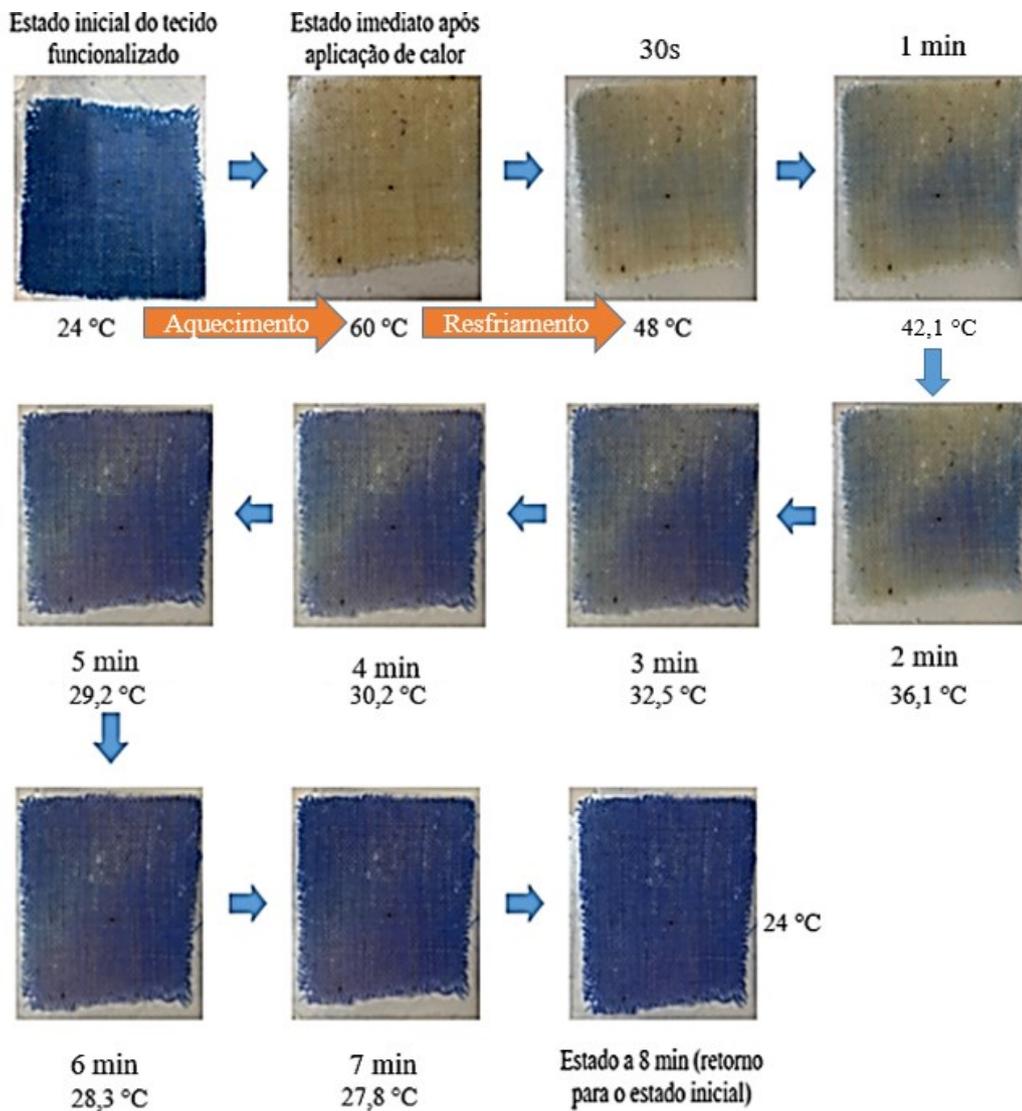
Observou-se que, quanto maior o período de estímulo sobre a amostra funcionalizada, mais tempo a mesma demora para retornar ao seu estado inicial, o que se dá devido à dissipação mais onerosa de calor da amostra. Ainda, é válido ressaltar que o efeito termocrômico do agente funcionalizante inicia a sua alteração na coloração por volta dos 31 °C, podendo ser considerado um agente sensível ao toque humano.

Figura 34 – Ação do agente termocrômico no tecido de juta



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 35 – Ação do agente termocrômico no compósito reforçado com tecido de juta



Fonte: Autoria própria (2022)

Na Tabela 3 estão apresentadas as médias das leituras por quadrantes bem como os valores de ΔE e desvio médio padrão de cada amostra de tecido funcionalizado.

Tabela 3 – Leitura das cores por quadrantes

Tecido funcionalizado 1	Partida CIE L*	Partida CIE a*	Partida CIE b*	ΔE
Média dos 4 quadrantes	53,90	-11,60	-21,63	0,26
Desvio médio padrão	0,18	0,04	0,26	0,10
Tecido funcionalizado 2	Partida CIE L	Partida CIE a	Partida CIE b	ΔE
Média dos 4 quadrantes	52,90	-11,56	-21,66	0,22
Desvio médio padrão	0,07	0,04	0,25	0,07
Tecido funcionalizado 3	Partida CIE L	Partida CIE a	Partida CIE b	ΔE
Média dos 4 quadrantes	52,25	-11,66	-22,53	0,31
Desvio médio padrão	0,21	0,06	0,29	0,07

Fonte: Autoria própria (2022)

Todas as leituras realizadas nas amostras funcionalizadas apresentaram ΔE abaixo de 1, em relação à média da própria amostra, ou seja, indicaram que a variação visual não foi perceptível.

Na Tabela 4 foram comparadas as coordenadas L*, a* e b* para os tecidos *in natura*, alvejado e cationizado, e funcionalizado. Como padrão para o cálculo do ΔE foram utilizados os valores referentes ao tecido de juta *in natura*, a fim de se observar também a ação do alvejamento e da cationização nas amostras.

Tabela 4 – Coordenadas colorimétricas dos tecidos

Amostra	L*	a*	b*	ΔE
Tecido não alvejado	68,09	2,98	16,39	-
Tecido alvejado + cationizado	80,08	2,59	16,32	11,99
Tecido funcionalizado	53,09	-11,63	-21,94	43,67

Fonte: Autoria própria (2022)

Analisando a Tabela 4, verifica-se que os valores encontrados indicam que o alvejamento da juta trouxe grande alteração na coloração do tecido, o que possibilitou maior destaque do agente termocrômico, ao ser aplicado nas amostras. Ainda, a cor do tingimento do tecido de juta apresentou grandes alterações na sua coloração, indicando que o agente funcionalizante foi aplicado de maneira uniforme ao tecido, onde a diferença total de cor deve-

se à mudança nas três coordenadas, sobretudo na coordenada b^* , que quanto mais negativa, indica que a coloração é mais azul.

As coordenadas L^* , a^* , b^* e ΔE dos corpos de prova foram analisadas e estão apresentadas nas Tabelas 5 e 6, sempre sendo comparado no seu estado tecido e o compósito reforçado pelo mesmo.

Tabela 5 – Coordenadas colorimétricas do tecido alvejado e cationizado e do compósito

Amostra	L^*	a^*	b^*	ΔE
Tecido alvejado + cationizado	80,08	2,59	16,32	-
Compósito (tecido de juta alvejada + cationizada)	72,28	27,12	3,72	28,65

Fonte: Autoria própria (2022)

A coordenada L^* apresenta valor mais elevado para o tecido alvejado do que para o compósito reforçado com o mesmo, o que reforça o entendimento de que a resina intensifica a coloração do reforço utilizado junto à mesma, afinal quanto menor o valor de L^* , mais escura é a amostra. A coordenada a^* apresenta valor superior para o compósito quando comparado ao tecido, entendendo-se a intensificação na coloração natural do tecido por parte da resina. Para a coordenada b^* o valor é mais baixo para o compósito, o que reforça o entendimento de que a resina intensifica a cor do tecido. Observa-se um valor elevado do ΔE para o compósito, fator que leva a concluir que a resina intensifica a coloração do material de reforço.

Tabela 6 – Coordenadas colorimétricas do tecido funcionalizado e do compósito

Amostra	L^*	a^*	b^*	ΔE
Tecido funcionalizado	53,09	-11,63	-21,94	-
Compósito (tecido de juta funcionalizada)	38,23	-12,85	-7,17	20,98

Fonte: Autoria própria (2022)

Continuando a análise, a Tabela 6 apresenta as coordenadas colorimétricas comparativas entre o tecido funcionalizado e a sua aplicação como reforço no compósito. A partir desta Tabela, confirma-se que a presença da resina no desenvolvimento do compósito

influencia na coordenada L^* (diminuindo seu valor), tanto utilizando como padrão o tecido não funcionalizado (Tabela 5) como funcionalizado (Tabela 6). Isso era esperado, justamente porque quanto menor o valor de L^* mais escura é a amostra, o que visualmente é perceptível, indicando que a resina, mesmo sendo translúcida, acaba influenciando nesta coordenada. Ainda, quanto mais negativo o valor da coordenada b^* , mais azul é a amostra, o que pode ser observado com maior evidência nas amostras com agente funcionalizante. Na presença da resina, houve uma alteração expressiva, indicando que a cor do compósito é menos azul. O valor de a^* para ambas permaneceu semelhante.

4.3.6 Efeito *aging*

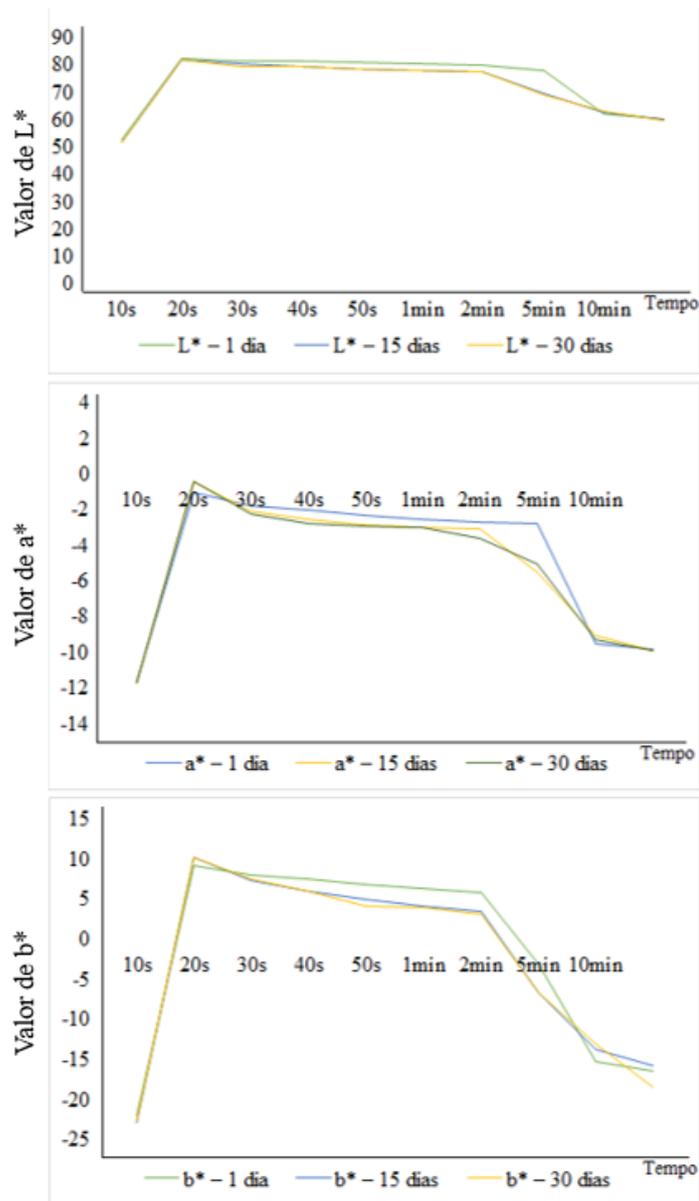
A durabilidade da reversibilidade do agente funcionalizante aplicado tanto no tecido de juta como no compósito, através da aplicação de calor, foi também analisada, para amostras em triplicata. Foi observado que o efeito do agente no tecido ao longo do tempo manteve a sua reversibilidade ao seu estado inicial sem uma alteração relevante, permanecendo em torno dos 2 minutos e 20 segundos. Para o compósito, os resultados também não apresentaram alterações significantes, permanecendo aproximadamente 8 minutos e 12 segundos para retornar ao seu estado inicial.

Como já era de se esperar, pode-se observar que a resina de poliéster cristal garante o efeito por um maior período de tempo, devido à sua camada de proteção ao tecido, consequentemente proporcionando maior concentração de calor aplicado na amostra.

O resultado das análises colorimétricas pode ser observado nas Tabelas 7, 8, 9, 10, 11 e 12 presentes no Apêndice A. A partir destas Tabelas, foi criada a Figura 36 para auxiliar na análise do efeito do agente termocrômico no tecido funcionalizado, bem como a Figura 37 para verificação do compósito reforçado pelos tecidos funcionalizados.

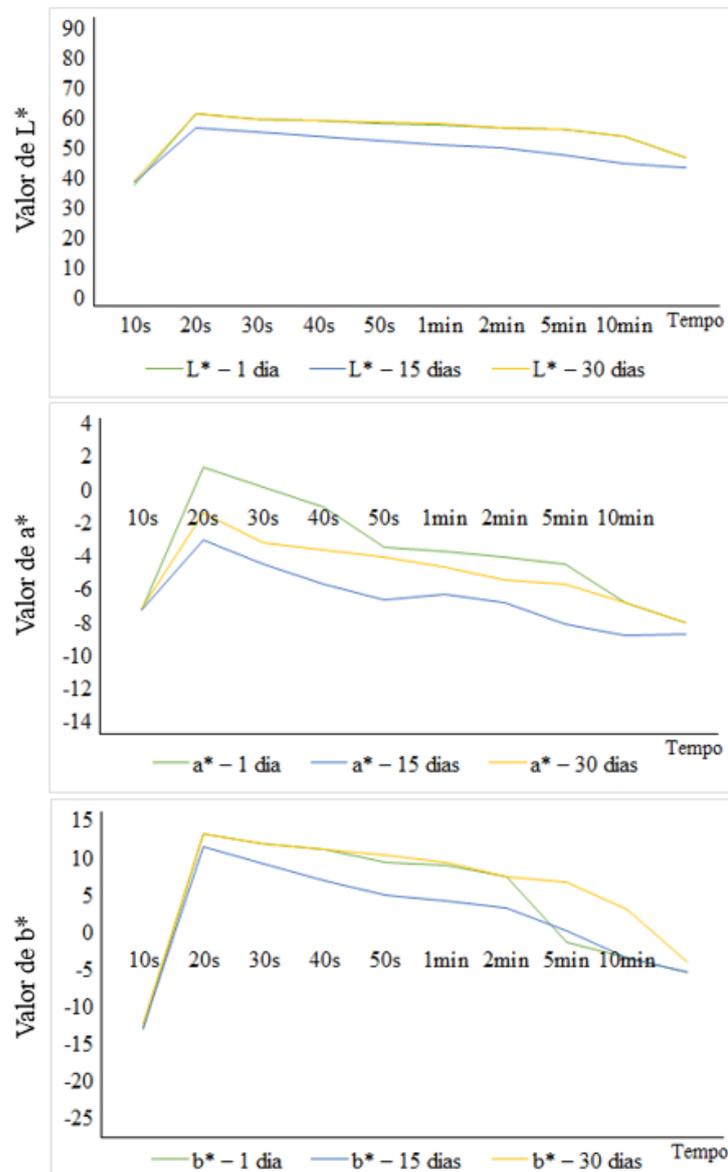
Para todas as amostras, independente de ser tecido ou compósito, o tempo de 10 minutos não foi suficiente para retornar a cor original. Ainda, no tempo 0 (zero), ou seja, logo a seguir a aplicação de calor, os valores das coordenadas mantiveram-se de certa forma constantes.

Figura 36 – Análise das coordenadas colorimétricas do tecido de juta funcionalizado após 1, 15 e 30 dias



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 37 – Análise das coordenadas colorimétricas do compósito de juta funcionalizada após 1, 15 e 30 dias



Fonte: Autoria própria (2022)

Analisando as Figuras, observa-se que houve uma diminuição muito pequena nos valores das coordenadas para as amostras durante o período estudado, podendo-se concluir que o efeito funcionalizante manteve o mesmo desempenho tanto no tecido como no compósito.

Para as coordenadas L* do compósito, comparando a análise entre 1, 15 e 30 dias, é possível observar certa linearidade no seu valor ao longo do tempo de aplicação de calor. Entretanto, verifica-se que após 30 dias a coordenada L* apresenta uma estabilização.

Um fator a se observar é que o valor de L^* para o compósito é mais baixo do que para a amostra de tecido, o que reforça que a presença da resina auxilia na intensidade da coloração da amostra, aumentando o grau do agente azul aplicado na mesma.

Tanto no tecido, como no compósito, comparando grupos de dias, verifica-se uma linearidade da coordenada a^* . Entretanto, para o compósito, ela é ligeiramente mais negativa, quando comparado com o tecido, indicando ser mais verde. Observa-se valor mais negativo de b^* no tecido do que no compósito, indicando ser mais azul. A coloração da juta sofreu uma pequena diminuição do pigmento ao longo do período de análise, porém ainda assim insignificante, uma vez que a olho nu não foi identificada, apenas através das coordenadas colorimétricas.

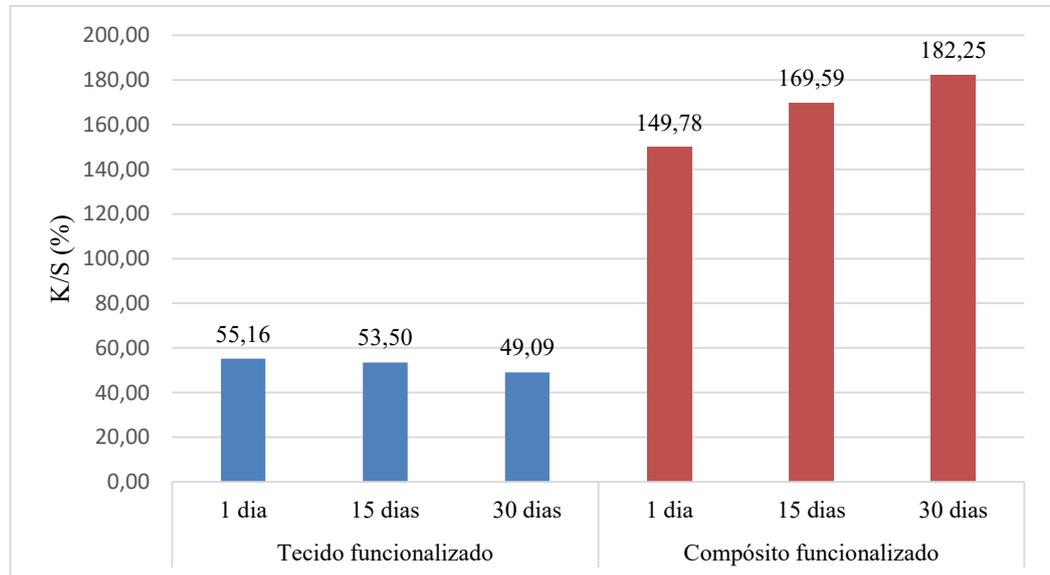
Ainda, é possível de se observar que após os 10 minutos de aquecimento das amostras, tanto de tecido como de compósito, as coordenadas L^* , a^* e b^* ainda não retornam ao seu estado original. A olho nu a amostra retorna à coloração inicial, porém, pela análise no espectrofotômetro o efeito se estende após esse período para ambas.

Com base nas análises desenvolvidas foi possível observar a transferência de cor do tecido funcionalizado para o compósito, possibilitando a aplicação do tecido de juta para outros fins que não como sacarias de tubérculos, como por exemplo para fins de arquitetura e revestimentos. Além disso, essa alternativa torna o desenvolvimento de um compósito, em um biocompósito, uma vez que a fase dispersa passa a ser proveniente de uma fonte natural e renovável, possibilitando um meio mais ecologicamente viável de produzir esse material.

4.3.7 Força colorística (K/S)

Os valores de K/S foram calculados com o objetivo de comparar a intensidade de cor do tecido funcionalizado e do compósito reforçado com o mesmo. Foram analisados os valores por coordenada de onda (nm) das amostras funcionalizadas, os quais foram gerados pelo *software* DataColor Match Textile, e realizada a somatória com o intuito de verificar a quantidade de cor refletida nas amostras. A partir disso foi possível verificar a influência da resina de poliéster cristal sobre o agente funcionalizante nesta propriedade colorística após os períodos de 1, 15 e 30 dias (Figura 38).

Figura 38 – Comparação entre os valores de K/S para o tecido e o compósito funcionalizados

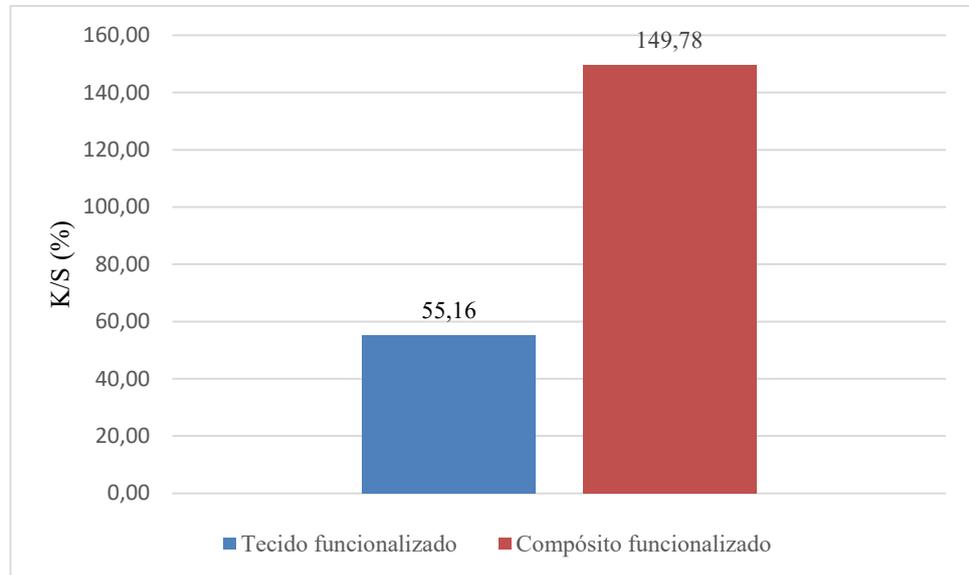


Fonte: Autoria própria (2022)

Analisando a Figura 38 observa-se a perda da coloração das amostras ao longo do período observado para o tecido, enquanto que para o compósito houve um aumento na força colorística. Esse fator pode ocorrer devido à presença da resina, a qual pode estar sendo refletida também na análise, e também proteger o tecido funcionalizado.

Ainda, foi comparada a força colorística para as amostras de tecido e compósito funcionalizados após um dia do seu desenvolvimento (Figura 39). Observou-se maiores valores de força colorística para o compósito, comparado ao tecido. Isso reforça o entendimento de que a resina de poliéster cristal intensifica a coloração do agente ao envolver o tecido funcionalizado.

Figura 39 – Comparação entre os valores de K/S para o tecido e o compósito funcionalizados (após 1 dia de funcionalização)



Fonte: Autoria própria (2022)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do desenvolvimento desta dissertação de mestrado foi possível evidenciar a possibilidade da utilização de tecido de juta como reforço para o desenvolvimento de compósitos com propriedades inteligentes, capaz de reagir termicamente ao meio em que está inserido.

A partir da análise morfológica foi verificada a presença do agente funcionalizante envolvendo tanto o tecido de juta, quanto a juta presente no compósito desenvolvido. Ao se analisar os grupos químicos presentes nas amostras, comprovou-se que os tecidos eram compostos por materiais celulósicos, neste caso a juta, pois foram observados os mesmos grupos funcionais e bandas características deste tipo de fibra. A presença do agente funcionalizante foi confirmada a partir da presença da banda $-NH$ na análise do tecido funcionalizado. Verificou-se ainda o êxito na ligação do tecido de juta e do agente funcionalizante termocrômico.

Quando analisadas as características térmicas das amostras, através do DSC, observou-se uma T_g similar para as amostras de tecido alvejado e cationizado e de tecido funcionalizado. Para o compósito reforçado com o tecido de juta alvejada e cationizada a T_g foi de $62\text{ }^{\circ}\text{C}$, distinta do valor da T_g do compósito reforçado com juta funcionalizada, de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que se dá por duas hipóteses, sendo elas o efeito do agente funcionalizante, que possui a T_g nessa faixa de temperatura, ou pela maior exposição do tecido durante a análise, resultante do preparo da amostra.

Na análise térmica de TGA e DTG foi possível observar os processos de desidratação e decomposição de cada material. O comportamento térmico não sofreu alteração, concluindo que o agente funcionalizante não influenciou nas características térmicas de degradação do tecido.

Os resultados para a verificação das características colorísticas das amostras mostraram que para os tecidos de juta funcionalizados, todas as leituras no espectrofotômetro apresentaram ΔE abaixo de 1, ou seja, as amostras após tingimento apresentam coloração uniforme. Ainda, os tecidos funcionalizados apresentaram bons resultados visuais, de acordo com a espectrofotometria. Quando verificados os períodos de duração do efeito termocrômico para o tecido e para o compósito, foi possível observar que no compósito o efeito apresentou duração

superior se comparado ao tecido, concluindo-se que a resina contribui na maior durabilidade do efeito termocrômico no tecido, atuando como uma proteção para o agente termocrômico.

Ao observar o comportamento das amostras funcionalizadas ao longo do tempo, houve uma diferenciação entre as coordenadas colorimétricas após o período de análise 1, 15 e 30 dias, onde foi possível de se observar uma redução do valor de b^* ao longo do tempo, podendo-se entender com isso uma leve perda na coloração da mesma, apesar de não ser perceptível a olho nu. Entretanto, a análise demonstrou que a perduração do agente termocrômico se manteve estável durante o período de estudo, não perdendo sua eficácia quando aplicado calor na amostra.

A força colorística das amostras funcionalizadas ao longo do tempo de estudo confirmou que o compósito reforçado com juta funcionalizada apresenta valores mais elevados quando comparado ao tecido funcionalizado. Isso reforça o entendimento de que a resina de poliéster cristal intensifica a coloração do agente ao envolver o tecido funcionalizado e também protege o agente, prologando o efeito termocrômico na juta.

Portanto, após as análises realizadas foi possível verificar a transferência do agente funcionalizante termocrômico do seu estado tecido para o compósito reforçado por este, bem como realizar o desenvolvimento de um compósito com características inteligentes utilizando uma nova possibilidade de aplicação para a fibra de juta. Pelos resultados apresentados, este trabalho fornece novas informações sobre o desenvolvimento de materiais termocrômicos inteligentes, viabilizando o uso e aplicação de substratos naturais para aplicações, as quais até então não são amplamente exploradas. Como consequência, possibilita-se um maior (re)aproveitamento do tecido de juta, direcionando o seu uso para uma maior diversidade de áreas como engenharia, arquitetura e *desing*.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante das análises e resultados obtidos, algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros são apresentadas a seguir.

- Realizar o estudo do efeito *aging* por um período superior a 30 dias, a fim de se verificar a influência do tempo num intervalo maior sobre o agente termocrômico no tecido e no compósito.
- Ensaiai mecanicamente os compósitos com o objetivo de se verificar suas propriedades de tração.
- Desenvolver um biocompósito utilizando uma resina sustentável.
- Avaliar a aplicação do agente termocrômico diretamente na resina e verificar sua eficácia a longo prazo.

REFERÊNCIAS

ABDOLLAHI, A.; ROGHANI-MAMAQANI, H.; RAZAVI, B. Stimuli-chromism of photoswitches in smart polymers: Recent advances and applications as chemosensors. **Progress in Polymer Science**, v. 98, 2019.

AKISHINO, J. K. **Desenvolvimento e avaliação de sensor termo sensível para detecção de aquecimento de conectores elétricos**. Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. Curitiba. 2014.

ARIADURAI, S. Bio-Composites: Current Status and Future Trends. Research Gate, Department of Textile and Apparel Technology, **Open University of Sri Lanka**, 2013. Associação Brasileira de Materiais Compósitos (ABMACO). **Compósitos 2**. Tecnologia e Processos. [s.l.:s.d.], 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL (ABIT). **Perfil do setor**. Disponível em: < <http://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor> > acessado em 09 de jun. de 2020.

AGARWAL, B. D.; BROUTMAN, L. J.; CHANDRASHEKHARA, K. Analysis and performance of fiber composites. **Wiley**, 2018.

AJEEB, F., YOUNES, B. and KHSARA, A.K. Investigating the relationship between thermochromic pigment based knitted fabrics properties and human body temperature. **IOSR Journal of Polymer and Textile Engineering**, v. 4. n. 3, p. 44–52, 2017.

AKÇAROKA KUMBASAR, E. P., MORSUNBUL, S. and ALIR, S. Photochromic Nanofibers Novel Aspects of Nanofibers. **Intech Open**, chap. 4, p 69-85, 2018.

AKISHINO, J. K. **Desenvolvimento e avaliação de sensor termo sensível para detecção de aquecimento de conectores elétricos**. Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. Curitiba. 2014.

AL-QURESHI, Hazim A. **Materiais Compostos: Análises e Fabricação**. [s.l.:s.d.], 2010.

ALBINANTE, S. R., PACHECO, É. B. A. V., VISCONTE, L. L. Y. Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas. **Química Nova**, vol. 36, n. 1, p. 114-122, 2013.

ANAND, Dhruv et al. Shade selection: Spectrophotometer vs. digital camera—A comparative in vitro study. **Ann Prosthodont Restor Dent**, v. 2, p. 73-8, 2016.

ANTONIO, M. T. E. **Relación de la capacidad antioxidante total y color de la quinua (Chenopodium quinoa willd.) medido por colorimetria y espectrofotometria de reflectancia difusa**. Dissertação (Mestrado). Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión - Peru, 2019.

ARAÚJO, M. Fibrous and composite materials for civil engineering applications. **Woodhead Publishing**, 2011.

ARAÚJO, K. da S.; PEREIRA, H. dos S. Políticas públicas e as fibras naturais: a experiência recente da cadeia produtiva da malva e juta amazônica. **Rev. Cienc. Agrar.**, v. 60, n. 1, p. 60-69, 2017.

BAO, B. et al. A novel and durable photochromic cotton-based fabric prepared via thiol-ene click chemistry. **Dyes Pigments**, 2019.

BARBOSA, A. P. et al. Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites. **Composites Part B**, v. 110, p. 298-306, 2016.

BEAUJEAN, P. et al. Oxazines: A New Class of Second-Order Nonlinear Optical Switches. **Chem. Soc.**, v. 138, n. 15, p. 5052–5062, 2016.

BEDIN, A. C. **Caracterização de misturas de amidos de feijão e tuberosas (mandioca e batata-doce) e sua aplicação na obtenção de biofilmes**. Dissertação, UFGP, Ponta Grossa, 2014.

BENAARBIA, A.; CHRYSOCHOOS, A.; ROBERT, G. Influence of relative humidity and loading frequency on the PA6.6 cyclic thermomechanical behavior: Part I. mechanical and thermal aspects. **Polymer Testing**, [s.l.], v. 40, p. 290-298, 2014.

BOGOEVA-GACEVA, G., et al. Natural fiber eco-composites. **Polym. Compos.**, v. 28, n. 98, 2007.

BOSTRÖM, M.; MICHELETTI, M. Introducing the sustainability challenge of textiles and clothing. **J. Consum. Policy**, v. 39, p. 367–375, 2016.

BRITO, G. F. et al. Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 6, n. 2, p. 127-139, 2011.

BUTSTRAEN, C.; SALAÛN, F.; DEVAUX, E. Sol–gel microencapsulation of oil phase with Pickering and nonionic surfactant based emulsions. **Powder Technology**, v. 284, p. 237-244, 2015.

CABRAL, I.; SOUTO, A. P. Dynamic colour in textiles: combination of thermo, photo and hydrochromic pigments. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, v. 827, n. 012059, 2020.

CALDEIRA, A. et al. Inovação e competitividade no setor têxtil: Fatos e tendências. **Pretexto**, v. 21, n. 2, p. 24-45, 2020.

CALLAHAN, P. G. et al. Transmission scanning electron microscopy: Defect observations and image simulations. **Ultramicroscopy**, v. 186, p. 49-61, 2018.

CALLISTER, W. D. **Material science and engineering: an introduction**. Ed. 7. USA: John Wiley & Sons, 2007.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**, Ed. 7. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 8 a ed. Danvers: John Wiley & Sons. 2012.

CARVALHO, G. C. **Estudo das propriedades mecânicas de compósitos com matriz de epóxi reforçados com fios de sisal e linho**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, São Paulo, 2020.

CHAN, T. Y.; WONG, C. W. Y. The consumption side of sustainable fashion supply chain: Understanding fashion consumer eco-fashion consumption decision. **Journal of Fashion Marketing and Management**, v. 16, p. 193–215, 2012.

CHEN, S. et al. Electrospinning: An Enabling Nanotechnology Platform for Drug Delivery and Regenerative Medicine. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 132, p. 188 –213, 2018.

CHEN, X. et al. Quantitative physical and handling characteristics of novel antibacterial braided silk suture materials. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 50, n. 2999, p. 160–170, 2015.

CHENG, H., YOON, J., TIAN, H. Recent advances in the use of photochromic dyes for photocontrol in biomedicine. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 372, p. 66-84, 2018.

CORREIA, E. A. S. **Compósitos de Matriz Geopolimérica Reforçados com Fibras Vegetais de Abacaxi e de Sisal**. Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal de Paraíba para obtenção do grau de Doutor, 2011.

COSTA, D. S.; PERES, M. N. P. B.; BARREIRA, R. M. et al. Compósitos reforçados com fibras de sisal e malva: análise da tensão x comprimento de fibras. In: 20º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2012c, Joinville - SC. **Anais...** Joinville, 2012.

COSTA, F. R. T. **Microscopia Eletrônica de Varredura: potencialidades e aplicações**. Trabalho de Conclusão de Curso para Bacharelado em Química Industrial. Universidade Federal do Maranhão, 2016.

DE PAULA, P. G. **Formulação e caracterização de compósitos com fibras vegetais e matriz termoplástica**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia e ciência dos Materiais do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2011.

DEMIR, H.; ATIKLER, U.; BALKOSE, D. et al. The effect of fiber surface treatments on the tensile and water sorption properties of polypropylene–luffa fiber composites. **Composites: Part A**, v. 37, p. 447–456, 2006.

DURDEVIC, S. et al. The development of novel smart packaging labels and mobile application for protection, information and identification of product shelf life. **Acta Graphica** **236**, v. 4, p. 35-41, 2015.

EL-KHODARY, E. et al. Critical Review on Smart Chromic Clothing. **Journal of Design Sciences and Applied Arts**, v. 1, n. 1, p. 90-95, 2020.

FAN, J.; WANG, W.; YU, D. Preparation of photochromic wool fabrics based on thiol-halogen click chemistry. **Dyes and pigments**, v. 151, p. 348-355, 2018.

FAO-ICAC. **Measuring Sustainability in Cotton Farming System - towards a Guidance Framework**. 2020. Disponível em: <<http://www.fao.org/publications/card/en/c/c2658c57-5edd-4bd2-bc0d-024ccd8a9785/>> Acessado em 09 jun. 2020.

FEBRATEX GROUP. **SEGMENTOS TÊXTEIS: CONHEÇA OS 4 PRINCIPAIS DO MERCADO BRASILEIRO**. 2019. Disponível em: <<https://fcem.com.br/noticias/segmento-textil-os-4-principais-do-mercado-brasileiro/>>. Acesso em: 09, jun. 2020.

FERNÁNDEZ, I.; BLAS, F.; FRÖVEL, M. Autoclave forming of thermoplastic composite parts. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 143-144, p. 266-269, December 2003.

FERRARA, M.; BENGISU, M. **Materials that Change Color**. 1st ed. London: Springer, Cham, p. 9–60, 2014.

FERREIRA, B. T. M. et al. Use of the β -cyclodextrin additive as a good alternative for the substitution of environmentally harmful additives in industrial dyeing processes. **Fibers and Polymers**, n. 21, p. 1266-1274, 2020.

FIDELIS, M. **Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, 2014.

FIDELIS, M. E. A. et al. The effect of accelerated aging on the interface of jute textile reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 74, p. 7–15, 2016.

FUENTES C. A. et al. Equilibrium contact angle measurements of natural fibers by an acoustic vibration technique. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 455, p.164–173, 2014.

GARCIA-SOUTO, M.D.P.; DABNICHKI, P. Non-invasive and wearable early fever detection system for young children. **Measurement**, v. 116, p. 216–229, 2018.

GAUCHE, H. et al. Screen Printing of Cotton Fabric with Hydrochromic Paste: Evaluation of Color Uniformity, Reversibility and Fastness Properties. **Journal of Natural Fibers**, 2020.

GODA K, S.; MS, G. A. et al. Improvement of plant based natural fibers for toughening green composites – effect of load application during mercerization of ramie fibers. **Tokiwadai**, p. 755-8611, Japan, 2006.

GOMES, I. C. N. R.; GONÇALVES, T. C. **Análise dos esforços no ensaio de flexão do material compósito inteligente uniaxial reforçado com fibras de vidro contínuas e fio de SMA em matriz epoxídica**. Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2018.

GRANCARIĆ, A. M. et al. Conductive polymers for smart textile applications. **Journal of Industrial Textiles**, v. 48, n. 3, p. 612-642, 2018.

GUERRA, J. R. F. **Projeto de antena de microfita flexível utilizando de tecido malha à base de fibras naturais e sintéticas**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, 2016.

GUJJALA, R. et al. Mechanical properties of woven jute-glass hybrid-reinforced epoxy composite. **Journal of Composite Materials**, v. 48, p. 3445–3455, 2014.

HO, M.; WANG, H.; LEE, J. H.; HO, C. K.; LAU, K. T.; LENG, J.; HUI, D. Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 43, p. 3549-3562, 2012.

HU, J.; WANASEKARA, N.; YU, X. Thermal Properties of Thermochromic Asphalt Binders by Modulated Differential Scanning Calorimetry. **Journal of the Transportation Research Board**, 2444, p. 142-150, 2014.

HUANG, Y. et al. Heterojunction Architecture of N-Doped WO₃ Nanobundles with Ce₂S₃ Nanodots Hybridized on a Carbon Textile Enables a Highly Efficient Flexible Photocatalyst. **Advanced Functional Materials**, v. 29, 2019.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Conjuntura Agrícola**_ julho 2016. Disponível em: < https://downloads.ibge.gov.br/downloads_estatisticas.htm>. Acesso em: 10 de jun. de 2021.

IDICULA, M., JOSEPH, K., THOMAS, S. Mechanical Performance of Short Banana/Sisal Hybrid Fiber Reinforced Polyester Composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 29, n. 1, 2010.

IDRIS, A. M.; EL-ZAHHAR, A. A. Indicative properties measurements by SEM, SEM-EDX and XRD for initial homogeneity tests certified reference materials. **Microchemical Journal**, v. 146, p. 429-433, 2019.

ISLAM M. A. et al. Thermal analysis of hybrid composites reinforced with Al₂O₃ and SiO₂ filler particles. **Materials Research Express**, v. 6, n. 125361, 2020.

JABBARI, M. et al. Introducing all polyamide composite coated fabrics: a method to produce fully recyclable single-polymer composite coated fabrics. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 133, n. 7, 2016.

JACOB, M., THOMAS, S. and VARUGHESE, K. T. Natural Rubber Composites Reinforced with Sisal/oil Palm Hybrid Fibres: Tensile and Cure Characteristics, **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 93(5), p. 2305–2312, 2004.

JEYAPRAGASH, R.; SRINIVASAN, V., SATHIYAMURTHY, S. Mechanical properties of natural fiber / particulate reinforced epoxy composites – A review of the literature. **Mater. Today Proc.**, n. xxxx, 2019.

JIA, T. et al. Moisture Sensitive Smart Yarns and Textiles from Self-Balanced Silk Fiber Muscles. **Advanced Functional Materials**, v. 29, n. 1808241, 2019.

JUTAL, Empresa Industrial de Juta S/A – JUTAL. **Beneficiamento de produtos do setor primário**. Manaus, Am. 2018.

KABIR, M. M. et al. Chemical treatments on plantbased natural fibre reinforced polymer composites: An overview. **Compos. Part B Eng.**, v. 43, n. 7, p. 2883–2892, 2012.

KHATKAR, V. et al. Potential of Textile Structure Reinforced Composites for Automotive Applications. *In*: UL-ISLAM, S.; BUTOLA, B. S. **Advanced Functional Textiles and Polymers: Fabrication, Processing and Applications**. 1 Ed. United States of America: Wiley, 2019, p. 65-97.

KENGE, A. et al. Development and Mechanical Characterization of Natural-Artificial Fiber Hybrid Composite. **International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE 2019)**, 2019.

KOTIK, H. G. Fibras naturais e compósitos reforçados com fibras naturais: a motivação para sua pesquisa e desenvolvimento. **Revista Matéria**, v. 24, n. 3, 2019.

KULČAR, R. et al. Colorimetric properties of reversible thermochromic printing inks. **Dyes and Pigments**, v. 86, n. 3, p. 271–277, ago. 2010.

LANGENHOVE, L. V. et al. Smart textiles for Medicine and Healthcare. Woodhead Publishing, chap. 6, p. 106-122, 2007.

LEAL, G. B. et al. Processamento e estudo das propriedades mecânicas e da morfologia de biocompósitos de acetato de celulose reforçados com fibra de coco. *In*: IX Workshop de Nanotecnologia Aplicada ao Agronegócio, IX, 2017. **Anais...** São Paulo: Embrapa Instrumentação, 2017, p. 1-4.

LEITE, R. P. **Impactos ambientais das fibras têxteis e alternativas**. 2020. Disponível em: <<http://textileindustry.ning.com/m/discussion?id=2370240%3ATopic%3A926807>> Acessado em: 27/08/2020.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. Ed. 1. São Paulo: Edgar Blücher, 2006.

LEVY NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: Ciência e tecnologia**. Ed. 2. São Paulo: Edgar Blücher, 2016.

LI, L.; CHEUNG, T. W. Sustainable development of smart textiles: a review of 'self-functioning' abilities which makes textiles alive. **Journal of Textile Engineering & Fashion Technology**, v. 4 n. 2, 2018.

LIGOWSKI, E., SANTOS, B. C., & FUJIWARA, S. T. Materiais compósitos a base de fibras da cana-de-açúcar e polímeros reciclados obtidos através da técnica de extrusão TT - Composite materials based on fibers from sugar cane and recycled polymers obtained by extrusion technique. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 25, n. 1, p. 70-75, 2015.

LIMA, J. A. Q. **Forma colaborante para elementos estruturais usuais de concreto armado - produzida com matriz cimentícia, reforçada com armadura**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, 2019.

LOPES, B. J.; MORAES D'ALMEIDA, J. R. **Desenvolvimento e Caracterização de Compósitos Termoplásticos Reforçados por Fibras de Carbono**. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 108p., 2018.

LOPES, C. C. A. et al. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) application chemical characterization of enamel, dentin and bone, **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 53, n. 9, p. 747-769, 2018.

MARIANO, M.; KISSI, N. E.; DUFRESNE, A. Cellulose nanomaterials: seize and surface influence on the thermal and rheological behavior. **Polímeros**, 28(2), 93-102, 2018.

MARTINEZ, C. B. **Estudo da influência do ciclo de cura nas propriedades mecânicas de compósitos fabricados pelo processo de infusão de resina**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

MATTILA, H. R. **Intelligent textiles and clothing**. 1 ed. Finland: Woodhead Publishing, 2006.

MCCOOL, R. et al. **Thermoforming carbon fibre-reinforced thermoplastic composites**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. Belfast: IMechE. 2012. p. 91- 102.

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

MENEZES, P. L. **Desenvolvimento e caracterização de um compósito polimérico reforçado com resíduos têxteis de tecido de Juta e malha de poliéster**. Dissertação

(mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Natal, RN, 2018.

MONICH, Mechanical and biological behavior of biomedical PEEK matrix composites: a focused review. **Materials Letters**, v. 185, n. 15, p. 593–597, 2016.

MONTEIRO, A. S. **Tururi (Manicaria saccifera Gaertn.): caracterização têxtil, processos e técnicas artesanais em comunidade local amazônica**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

MORKA, A; KEDZIERSKI, P; MUZOLF, P. Optimization of the structure of a ceramic-aluminum alloy composite subjected to the impact of hard steel projectiles. **Mechanics of Composite Materials**, v. 52, p. 333–346, 2016.

MOROZOV, E. V. The effect of filament-winding mosaic patterns on the strength of thinwalled composite shells. **Composite Structures**, v. 76, p. 123-129, 2006.

MURALI, B., CHANDRA MOHAN, D. Chemical treatment on hemp/polymer composites. **Journal of Chemical and Pharmaceutical Research**, v. 6(9), p. 419-423, 2014.

LE, N.-M.N. et al. Grafting of wool fibers through disulfide bonds: An advanced application of S-protected thiolated starch. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 147, p. 473–481, 2020.

LINDINO, C. A. et al. Adsorption of cadmium in vegetable sponge (*Luffa cylindrica*). **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, 2014.

LOPES, F. et al. Weathering of Microencapsulated Thermochromic Pigments. **RJTA**, v. 13, n. 1, 2009.

NECHYPORCHUK, O. et al. Cellulose nanofibril-based coatings of woven cotton fabrics for improved inkjet printing with a potential in e-textile manufacturing, **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 5, p. 4793–4801, 2017.

NEHER, B. et al. Study of the Physical, Mechanical and Thermal Properties of Banana Fiber Reinforced HDPE Composites. **Materials Sciences and Applications**, v. 11, p. 245-262, 2020.

NETO, J. A. M. **Obtenção, caracterização e utilização de um compósito com matriz de resina poliéster e carga de fibras de sisal**. Tese (Doutorado) apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 101 p., 2016.

NETO, S. F. M. et al. Compósito de matriz frágil reforçado com fibra de malva: caracterização e correlação da variação dos comprimentos das fibras, no material. In: CONGRESSO DE CERÂMICA, 55., 2011, Porto de Galinhas. **Anais...**: Porto de Galinhas, 2011, p. 1 - 12.

ODEGARD, G.M, BANDYOPADHYAY, A. Physical aging of epoxy polymers and their composites. **Journal Of Polymer Science Part: Polymer Physics**, n. 49, p. 1695-716, 2011.

OECD – FAO – Agricultural Outlook. **Perspectivas Agrícolas 2015-2024**. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/i4738e/i4738e.pdf>>. Acesso em 10 de jun. de 2021.

OHZONO, T. et al. Dynamic Manipulation of Friction in Smart Textile Composites of Liquid-Crystal Elastomers. **Adv. Mater. Interfaces**, v. 7, 2020.

OLIVEIRA, I., R.C. **Propriedades mecânicas, físicas e químicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras longas de juta e de malva**. Dissertação (Mestrado) - Programa de pós-graduação em engenharia civil da Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2013.

OLIVEIRA, M. S. **Desenvolvimento e Caracterização de Telhas Cimentícias Reforçadas com Tecido de Fibras Vegetais da Amazônia**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas - (UFAM), 2017.

PAIVA A. M. Agricultura camponesa e desenvolvimento rural/local : Um estudo da organização da produção de juta e malva n a várzea do município de Manacapuru. **Statewide Agricultural Land Use Baseline**, v. 1, 2015.

PALAMUTCU, S. Sustainable Textile Technologies. *In*: MUTHU, S. S. **Textiles and Clothing Sustainability: Sustainable Technologies**. Hong Kong: Elsevier, 2017, p. 1-22.

PAVIA, D. L. et al. **Introdução À Espectroscopia**. Tradução da 5 ed. NorteAmericana. Cengage Learning Brasil, 2015.

PEREIRA, P. H. F. et al. Vegetal fibers in polymeric composites : a review. **Polimeros**, v. 25, n. 1, p. 9–22, 2015.

PERIYASAMY, A. V., VIKOVA, M. and VIK, M. A review of photochromism in textiles and its measurement. **Textile Progress**, v. 49, n. 2, p. 53-136, 2017.

PESUPA, N. et al., Recent Trends in Sustainable Textile Waste Recycling Methods: Current Situation and Future Prospects. **Topics in Current Chemistry**, v. 375, n. 76, 2017.

PEZZOLO, D. B. **Tecidos. Histórias, tramas, tipos e usos**. p. 9 – 13. ISBN: 978-85- 7359-909-1. Senac São Paulo, 2007.

PICKERING, K. L., ARUAN EFENDY, M. G. and LE, T. M. A review of recent developments in natural fibre compositesand their mechanical performance. **Composites: Part A**, v. 83, p. 98-112, 2016.

POLETTI, M. R. L. **Efeito da adição de resíduo de borossilicato como aditivo retardante de chama em compósitos de polipropileno e fibra natural**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo. 2019.

POTUCK, A. et al. Development of Thermochromic Pigment Based Sportswear for Detection of Physical Exhaustion. **Fashion Practice**, v. 8, n. 2, p. 279-295, 2016.

PREET SINGH, J. I. et al. Study of effect of surface treatment on mechanical properties of natural fiber reinforced composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 2, p. 2793–2799, 2017.

QUEIROZ, R. S., da SILVA, A. P. V., BROEGA, A. C. L., & SOUTO, A. P. G. V. New Brazilian pineapple leaf fibers for textile application: cottonization and dyeing performance. **S Applied Sciences**, 2(1), 72, 2020.

RADITOUIU, A. et al. Optical and structural dynamical behavior of Crystal Violet Lactone-Phenolphthalein binary thermochromic systems. **Dyes and Pigments** v. 134, p. 69–76, 2016.

RAMAMOORTHY, S.K., SKRIFVARS, M., PERSSON, A. A review of natural fibers used in biocomposites: plant, animal and regenerated cellulose fibers. **Polym**, rev. 55, p. 107–162, 2015.

RAMAWAT, K.G.; AHUJA, M. R. Fiber plants: an overview. In: Ramawat KG, Ahuja M (eds) Fiber plants, sustainable development and biodiversity. **Springer Nature, Cham**, pp 3–15, 2016.

RAMLOW, H.; ANDRADE, K. F.; IMMICH, A. P. S. Smart textiles: an overview of recent progress on chromic textiles. **The Journal of The Textile Institute**, 2020.

REVAIAH, R. G.; KOTRESH, T. M.; KANDASUBRAMANIAN, B. Technical textiles for military applications, **The Journal of The Textile Institute**, v. 111, n. 2, p. 273-308, 2020.

REX, D., OKCABOL, S., ROOS, S. Technical properties of possible sustainable fibers on the market. “Fiber Bible” part 1. **Mistra Future Fashion Report**. 2019.

RODRIGUES, L. P. S. **Efeitos do envelhecimento ambiental acelerado em compósitos poliméricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

RWAWIREE, S.; HABBI, G.; OKELLO, J. Comparative evaluation of dynamic mechanical properties of epoxy composites reinforced with woven fabrics from Sansevieria (*Sansevieria trifasciata*) fibres and banana (*Musa sapientum*) fibres. **Tekstilec**, p. 315-320, 2014.

SÁ, C. S. A. Desenvolvimento de um material têxtil termossensível com micro/nanocápsulas imobilizadas em fibras regeneradas. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, 2015.

SALIT, M. S. **Tropical Natural Fibre Composites: Properties, Manufacture and Applications**. New Delhi, India: Springer Singapore, 2014.

SAMANTA, A. et al. Synthesis of Nano Calcium Hydroxide in Aqueous Medium. **J. Am. Ceram. Soc.**, p. 1–9 2015.

SANDIN, G., PETERS, G.M. Environmental impact of textile reuse and recycling: a review. **J. Clean. Prod.**, v. 184, p. 353-365, 2018.

SANDIN, G., ROOS, S., JOHANSON, M. Environmental impact of textile fibers – what we know and what we don't know: Fiber Bible part 2. **Göteborg**, p. 98, 2019.

SAW, S. K. et al. Hybrid composites made from jute/coir fibers: Water absorption, thickness swelling, density, morphology, and mechanical properties. **Journal of Natural Fibers**, 11, 39–53, 2014.

SCHUCH, A. et al. Estudo de fibras lignocelulósicas como reforço alternativo para matriz polimérica. In: I CONGRESSO BRASILEIRO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA **Anais...Diamantina(MG)** Online: 2020, p. 1-5. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/icobicet2020/268464-ESTUDO-DE-FIBRAS-LIGNOCELULOSICAS-COMO-REFORCO-ALTERNATIVO-PARA-MATRIZ-POLIMERICA>>. Acesso em: 08/08/2021.

SCHUMACHER, A. G. D. et al. Industrial hemp fiber: A sustainable and economical alternative to cotton. **Journal of Cleaner Production**, v. 268, n. 122180, 2020.

SHABBIR, M.; MOHAMMAD, F. Introduction to textile fibers: An overview. In: YUSUF, M. **Handbook of Renewable Materials for Coloration and Finishing**, India: Wiley-Scrivener, 2019, p. 3-8.

SHAH, D. U., PORTER, D. and VOLLRATH, F. Can silk become an effective reinforcing fibre? A property comparison with flax and glass reinforced composites. **Compos Sci Technol**, v.101, pp. 173-183, 2014.

SHAHID-UL-ISLAM, F.; SHAHID, M.; MOHAMMAD, F. Perspectives for natural product based agents derived from industrial plants in textile applications – a review. **J. Cleaner Prod.**, v. 57, p. 2–18, 2013.

SENGUPTA, A.; BEHERA, J. Smart chromic colorants draw wide attention for the growth of future intelligent textile materials. **Journal of Advanced Research Manufacturing Materials Science Metallurgy Engineering**, v. 1, p. 89–112, 2014.

SHEN, B.; ZHENG, J.H.; CHOW, P.S.; CHOW, K.Y. Perception of fashion sustainability in online community. **J. Text. Inst.**, v. 105, p. 971–979, 2014.

SILVA, I. L. A. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta**. Tese (Doutorado), Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2014.

SILVA, J. P. M. **Estudo comparativo das propriedades mecânicas em compósitos da fibra modal e poliéster**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

- SILVA, M. et al. Functionalized textiles with PUU/limonene microcapsules: effect of finishing methods on fragrance release. **The Journal of The Textile Institute**, v. 108, n. 3, p. 361-367, 2017.
- SIMBANÃ, E. A. et al. **Handbook of Natural Fibres**. Ed. 2. Poland: Woodhead Publishing, 2020, v.1, p. 197-218.
- SKELTE, G., Enhancing Colour Development of Photochromic Prints on Textile. The Swedish School of Textiles, **Thesis for the Degree of Master in Science**, 2017.
- SONG, M., VEGA, K. HeartMe: **Thermochromic Display as An Expression of Heart Health**. DIS '18 Companion: Proceedings of the 2018 ACM Conference Companion Publication on Designing Interactive Systems, p. 311–314, 2018.
- SOUZA, A. A. U., MELO, A. R., PESSOA, F. L. P. , SOUZA, S. M. A. G. U. The modified water source diagram method applied to reuse of textile industry continuous washing water. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, p. 1405–1411, 2010.
- SOUZA, F. A.; PACHECO, N. M. R. A. C. Funcionalização de materiais têxteis. **Revista Icônica**, v. 2, n. 1, 2016.
- SOUZA, G. Q.; SILVA, A. F. B.; FUJIYAMA, R.T. Comparação da resistência mecânica de fibras naturais para emprego em materiais de engenharia. In: **XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - Ilha Solteira – SP**, 2005.
- STOPPA, M.; CHIOLERIO, A. Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical Review. **Sensors**, v. 14, p. 11957–11992, 2014.
- TONG, J.; LI, L. Thermal regulation of electrically conducting fabrics. In: Tao X, editor. **Handbook of Smart Textiles**, p. 689–718, 2015.
- TÖZÜM, M. S.; AKSOY, S. A.; AKLAN, C. Preparation of poly(methyl methacrylate-*co*-ethylene glycol dimethacrylate-*co*-glycidyl methacrylate) walled thermochromic microcapsules and their application to cotton fabrics. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 137, n. 24, 2019.
- TRAVALINI, A. P. **Extração, modificação e aplicação da fibra do bagaço da mandioca**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia em Ciência e Tecnologia do Alimento. Ponta Grossa, 2015.
- UNESCO. **Educação para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: Objetivos de aprendizagem**, 2017.
- VÄISÄNEN, T. et al. Utilization of agricultural and forest industry waste and residues in natural fiber-polymer composites: a review. **Waste Management**, v. 54, p. 62–73, 2016.

- VÁSQUEZ, A. M. **Estimación de las coordenadas CIEL*a*b* en concentrados de tomate utilizando imágenes digitales**. Dissertação (Mestrado). Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia, 2015.
- VERMA, D. et al. Bagasse Fiber Composites-A Review. **J. Mater. Environ. Sci.** 3, 1079 (2012).
- VILAR, Z.T. et al. Caracterização da Funcionalidade de um Compósito Ativo CFRP/ Ni-Ti. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v .7, n. 1, 2012.
- VIK, M.; PERIYASAMY, A. P. **Chromic Materials: Fundamentals, Measurements, and Applications**. CRC Press, 2018.
- WEGENER, M. et al. Photocontrol of Antibacterial Activity: Shifting from UV to Red Light Activation. **Journal of the American Chemistry Society**, v. 139, p.17979–17986, 2017.
- XAVIER, P. H. **Preparação de Cerâmicas Nanoestruturadas de Ca₃Co₄O₉ para Aplicação em Dispositivos Termoelétricos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Alfenas, 2018.
- YASIN, S.; SUN, D. Propelling textile waste to ascend the ladder of sustainability: EOL study on probing environmental parity in technical textiles. **Journal of Cleaner Production**, v. 233, p. 1451-1464, 2019.
- ZANG, H. et al. A ratiometric optical thermometer with multi-color emission and high sensitivity based on double perovskite LaMg_{0.402}Nb_{0.598}O₃: Pr³⁺ thermochromic phosphors. **Chemical Engineering Journal**, v. 380, n. 122491, 2020.
- ZHANG, T. et al. Green Fabrication of Regenerated Cellulose/Graphene Films with Simultaneous Improvement of Strength and Toughness by Tailoring the Nanofiber Diameter. **ACS Sustain. Chem. Eng.**, 2018.
- ZHENG, Q. et al. Understanding Glass through Differential Scanning Calorimetry. **Chemical Reviews**, v. 119, p. 7848-7939, 2019.
- ZHU, S. et al. Electrochromic Switching and Microkinetic Behaviour of Oxazine Derivatives and Their Applications. **Eur. J. Org. Chem.**, p. 1227–1235, 2014.
- ZOHDY, M. H. Cationization and gamma irradiation effects on the dyeability of polyester fabric towards disperse dyes. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 73, p. 101-110, 2005.

APÊNDICE A - TABELAS SUPLEMENTARES

Tabela 7 – Coordenada colorimétrica L* do tecido funcionalizado ao longo do tempo

Amostra	Tempo de análise após aplicação de calor	L* – 1 dia	L* – 15 dias	L* – 30 dias
Tecido funcionalizado	0	53,09	51,89	52,14
	10	82,57	82,3	82,21
	20	81,8	80,42	79,7
	30	81,49	79,47	79,59
	40	81,01	78,79	78,7
	50	80,63	78,19	77,9
	1	80,3	77,69	77,6
	2	78,22	69,71	69,43
	5	62,14	62,93	63,12
	10	60,41	60,16	60,04

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 8 – Coordenada colorimétrica a* do tecido funcionalizado ao longo do tempo

Amostra	Tempo de análise após aplicação de calor	a* – 1 dia	a* – 15 dias	a* – 30 dias
Tecido funcionalizado	0s	-11,63	-11,69	-11,73
	10s	-1,04	-0,43	-0,4
	20s	-1,76	-2,1	-2,18
	30s	-1,99	-2,55	-2,74
	40s	-2,3	-2,82	-2,9
	50s	-2,5	-2,94	-2,99
	1min	-2,64	-3,04	-3,62
	2min	-2,76	-5,5	-5,02
	5min	-9,52	-9,01	-9,24
	10min	-9,84	-9,87	-9,9

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 9 – Coordenada colorimétrica b* do tecido funcionalizado ao longo do tempo

Amostra	Tempo de análise após aplicação de calor	b* – 1 dia	b* – 15 dias	b* – 30 dias
Tecido funcionalizado	0s	-21,94	-22,79	-22,7
	10s	9,3	10,29	10,31
	20s	8,1	7,34	7,62
	30s	7,62	5,96	6,12

40s	6,91	4,99	4,12
50s	6,35	4,16	4,03
1min	5,88	3,5	3,11
2min	-3,08	-6,55	-6,55
5min	-15,19	-13,62	-13,02
10min	-16,34	-15,65	-15,47

Fonte: Aatoria própria (2022)

Tabela 10 – Coordenada colorimétrica L* do compósito reforçado com tecido funcionalizado ao longo do tempo

Amostra	Tempo de análise após aplicação de calor	L* – 1 dia	L* – 15 dias	L* – 30 dias
Compósito funcionalizado	0	38,23	39,03	39,73
	10	61,91	57,1	61,91
	20	60,21	55,61	60,21
	30	59,75	54,16	59,75
	40	58,57	52,88	59,26
	50	58,32	51,23	58,57
	1	57,38	50,53	57,38
	2	56,79	48,28	56,79
	5	54,25	45,44	54,25
	10	47,4	46,83	47,4

Fonte: Aatoria própria (2022)

Tabela 11 – Coordenada colorimétrica a* do compósito reforçado com tecido funcionalizado ao longo do tempo

Amostra	Tempo de análise após aplicação de calor	a* – 1 dia	a* – 15 dias	a* – 30 dias
Compósito funcionalizado	0	-7,17	-7,19	-7,11
	10	1,46	-3	-1,32
	20	0,17	-4,46	-3,15
	30	-1,01	-5,68	-3,6
	40	-3,39	-6,62	-4,04
	50	-3,68	-6,26	-4,59
	1	-4	-6,77	-5,35
	2	-4,41	-8,04	-5,68
	5	-6,79	-8,78	-6,79
	10	-8	-8,63	-8

Fonte: Aatoria própria (2022)

Tabela 12 – Coordenada colorimétrica b* do compósito reforçado com tecido funcionalizado ao longo do tempo

Amostra	Tempo de análise após aplicação de calor	b* – 1 dia	b* – 15 dias	b* – 30 dias
Compósito funcionalizado	0	-12,85	-12,81	-12,2
	10	13,37	11,55	13,37
	20	12,03	9,24	12,03
	30	11,28	7,05	11,28
	40	9,46	5,13	10,5
	50	9,06	4,27	9,46
	1	7,66	3,28	7,66
	2	-1,29	0,23	6,77
	5	-3,41	-3,41	3,1
	10	-5,23	-5,23	-3,89

Fonte: Autoria própria (2022)