

**Estudo da obtenção de madeira e compósitos transparentes:
experimentos preliminares com pecíolo do Jupati (*Raphia*
Taedigera) para aplicação em design de ambientes**

Elisa Batista Conrado Martins

Belo Horizonte

2021

Elisa Batista Conrado Martins

**Estudo da obtenção de madeira e compósitos transparentes:
experimentos preliminares com pecíolo do Jupati (*Raphia
Taedigera*) para aplicação em design de ambientes**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Design pela Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Design.

Orientadora: Profa. Dra. Eliane Ayres.
Coorientadora: Profa. Dra. Mercês Coelho da Silva.

Belo Horizonte
2021

M386e

Martins, Elisa Batista Conrado.

Estudo da obtenção de madeira e compósitos transparentes : experimentos preliminares com pecíolo do Jupati (*Raphia Taedigera*) para aplicação em design de ambientes [manuscrito] / Elisa Batista Conrado Martins. -- 2021
136 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado de Minas Gerais. Programa de Pós-graduação em Design, 2021
Orientadora: Profa. Dra. Eliane Ayres.

Bibliografia: f. 122-136.

1.Design. 2. Materiais compostos. 3. Madeira – Pesquisa. 4. Decoração de interiores. I. Ayres, Eliane. II. Silva, Mercês Coelho da. III. Universidade do Estado de Minas Gerais. Programa de Pós-graduação em Design. III. Título

CDU:674.038.3

Bibliotecária responsável: Gilza Helena Teixeira CRB6/1725

ESTUDO DA OBTENÇÃO DE MADEIRA E COMPÓSITOS TRANSPARENTES: EXPERIMENTOS PRELIMINARES COM PECÍOLO DO JUPATI (RAPHIA TAEDIGERA) PARA APLICAÇÃO EM DESIGN DE AMBIENTES.

Autora: Elisa Batista Conrado Martins

Esta dissertação foi julgada e aprovada em sua forma final para a obtenção do título de Mestre em Design no Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade do Estado de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 10 de novembro de 2021.



Rita A. C. Ribeiro
Coordenadora Mestrado e Doutorado
MASP 1231056-1
ESCOLA DE DESIGN - UEMG

Profª. Rita Aparecida da Conceição Ribeiro, Dra.
Coordenadora do PPGD

BANCA EXAMINADORA



Profª. Eliane Ayres, Dra.
Orientadora
Universidade do Estado de Minas Gerais



Profª. Mercês Coelho da Silva, Dra.
Coorientadora
Universidade Federal de Itajubá



Profª. Marys Lene Braga Almeida, Dra.

Universidade Federal de Minas Gerais



Profª. Rosemary do Bom Conselho Sales, Dra.

Universidade do Estado de Minas Gerais

A todos que, de alguma forma, me reconectaram com o propósito da pesquisa e instigam minha curiosidade e engajamento pela busca por conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Aos novos ciclos e a coragem de acreditar nos sonhos que nos desenvolvem e nos fazem viver grandes experiências. Posso dizer que os aprendizados foram além das salas de aula, foram debates, trocas, artigos, livros, mas tudo com um propósito. Tudo isso está presente nessas páginas assim como as pessoas incríveis que me acompanharam até aqui.

Meu imenso obrigada a minha orientadora Eliane Ayres, por toda paciência, por me encorajar a embarcar nesse grande desafio que foi dar forma a essa pesquisa que tanto acreditamos e que apesar de todas as dificuldades nessa reta final não deixamos de lado o companheirismo e a vontade de fazer acontecer. A Mercês Coelho da Silva, por coorientar esta pesquisa, me dar todo o auxílio durante os experimentos e acreditar e confiar nas nossas ideias.

A minha família, que me deu todo o apoio na mudança para Belo Horizonte, em especial a minha madrinha Viviane por que acolher de forma tão carinhosa durante o período de adaptação. Aos meus pais, por acreditarem tanto quanto eu no meu sonho de ser pesquisadora, por sempre incentivarem a minha curiosidade e minha personalidade questionadora. Pai, obrigada por sempre estar por mim, me acolhendo e estando presente nos momentos de angústia e felicidade. Mãe, por ser meu modelo de excelência intelectual e de sensatez, sempre me colocando para frente e acreditando em mim. Aos meus irmãos por toda parceria.

A todos os meus amigos do Pará que de longe continuaram torcendo por mim e sempre se fazendo presentes durante todo esse período da forma que foi possível.

Agradeço a família que escolhi em Belo Horizonte, a república 310 que logo se tornou um lar repleto de companheirismo, cumplicidade e alegrias, mesmo nos altos e baixos a amizade de vocês foi crucial nessa etapa, serei eternamente grata.

A toda equipe do PPGD/UEMG, professores, coordenação e todos os funcionários. A professora Iara Castro por me acolher tão bem no meu estágio docência, o que salientou ainda mais o quanto o ensino dá sentido para todo esse percurso que venho percorrendo. A

professora Rosemary Sales por me auxiliar nos ensaios termográficos e sempre muito prestativa. Aos meus professores da UEPA, em especial a professora Ninon Jardim que em 2016 me apresentou o universo da pesquisa na prática com o PIBIC, me orientando e me fazendo acreditar mais ainda nesse caminho.

Meus colegas do CDE: Clara, Elena, Lauro e Carol, muito obrigada por todas as trocas e companheirismo. Aos amigos do mestrado: Anne, André, Alessandra, Gabrielle, Luísa, Mariah, Diego; agradecimento especial pelas risadas, pelos momentos que se tornaram leves com a parceria de vocês, só lembranças boas, agradeço demais o acolhimento. Arthur, pela sua amizade, parceria, crises de riso, cuidado e por sempre engajar nas minhas reflexões e discussões, amigo do mestrado para vida, inspiração como pessoa, como profissional e como pesquisador, obrigada por tudo, foste crucial em todo esse processo.

A todos que acreditam na pesquisa, aos que lutaram e lutam por ela e que abriram os caminhos para que hoje eu pudesse fazer parte disso. A todos os pesquisadores que por meio de seu trabalho tornaram possível que essa dissertação ganhasse forma.

A CAPES por conceder a bolsa que financiou esta pesquisa.

A todos que passaram na minha vida e de alguma forma influenciaram nessa trajetória até aqui, meu muito obrigada.

“All is predicted, and permission is given at any point to change anything”. [...] there is always a goal; there is always something to look forward to in life and my creative search, and that goal is there.

— Neri Oxman.

‘Tudo está previsto, e a permissão é dada a qualquer momento para mudar qualquer coisa’. [...] sempre há um objetivo; há sempre algo para olhar para a frente na vida e minha busca criativa, e esse objetivo está lá.

— Neri Oxman (tradução da autora).

RESUMO

O objetivo principal da pesquisa consistiu na realização de uma ampla revisão da literatura, no que diz respeito aos métodos de obtenção de madeira transparente. Também foi realizada a avaliação da viabilidade da utilização do pecíolo de Jupati (*Raphia Taedigera*) para obtenção deste tipo de material. Atualmente, o pecíolo proposto para realização dos estudos é descartado na produção artesanal da comunidade do município de São Sebastião da Boa Vista, no Marajó, localizado no Estado do Pará. A proposta é estimulada pelo crescente aumento da demanda do consumo de energia proveniente das mudanças climáticas que exigem dos edifícios sistemas de refrigeração, bem como melhor desempenho lumínico, aspectos que são contemplados por meio da melhor distribuição térmica e espalhamento da luz proporcionada pela propriedade anisotrópica da madeira. A madeira transparente é obtida por meio do processo de deslignificação da fibra, isto é, a remoção da lignina que é responsável por cerca de 80% da absorção da luz da madeira, e posterior impregnação de um polímero com índice de refração compatível ao da madeira deslignificada. Na presente pesquisa, a etapa de impregnação foi realizada com uma resina epóxi e uma dispersão aquosa de poliuretano, por meio da impregnação por ultrassom e da impregnação a vácuo, respectivamente. Para realização da análise comparativa entre os compósitos obtidos, o vidro e o pecíolo de Jupati in natura foram realizadas caracterizações. Os aspectos morfológicos foram observados por microscopia eletrônica de varredura, a porcentagem de transmitância foi usada para estimar o grau de transparência, e o desempenho térmico foi avaliado pela técnica de termografia de infravermelho. Os materiais propostos demonstraram ser um potencial substituto do vidro comum desde que se possa alcançar a transparência sem comprometer suas propriedades térmicas.

Palavras-chave: Pecíolo de Jupati, Madeira transparente, Compósitos, Propriedades térmicas

ABSTRACT

*The main aim of the research was to carry out a comprehensive review of the literature, with regard to methods for obtaining transparent wood. The feasibility of using the petiole of Jupati (*Raphia Taedigera*) to obtain this type of material was also evaluated. Currently, the petiole proposed for conducting out the studies is discarded from the artisanal production of the municipality's community of São Sebastião da Boa Vista, in Marajó, located in the State of Pará. The proposal is motivated by the increasing demand for energy consumption due to the climatic condition changes which demand cooling systems to the buildings, as well as better luminous performance. Such aspects are met by better thermal distribution and light scattering provided by the anisotropic property of wood. Transparent wood is obtained first by the fiber delignification process, that is, the removal of the lignin, which is responsible for about 80% of the wood's light absorption. Subsequently, the impregnation of a polymer with a refractive index compatible with that of wood delignified completes the process. In the present research, the impregnation step was attained with an epoxy resin and an aqueous polyurethane dispersion, by using ultrasound impregnation and vacuum impregnation, respectively. The ensuing composites were characterized by using common glass and petiole of Jupati in natura as control. The morphological aspects were observed by scanning electron microscopy, the percentage of transmittance was used to estimate the degree of transparency, and the thermal performance was evaluated by the infrared thermography technique. The proposed materials proved to be a potential substitute for common glass, as long as transparency can be achieved without compromising their thermal properties.*

Keywords: Jupati's Petiole, Transparent wood, Composites, Thermal properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ações e resultados relacionados com a atividade de design.....	23
Figura 2 - Pirâmide de Maslow.	24
Figura 3 - Proposta de reestruturação ilustrativa das necessidades humanas com base no pensamento sistêmico.	27
Figura 4 - Processo de percepção do conforto e seus aspectos condicionantes.	30
Figura 5 - Diálogo entre estímulo e sensação no processo de percepção do conforto.	31
Figura 6 - Possibilidade de relação entre design e conforto ambiental.	32
Figura 7 - Comportamentos de materiais transparentes em relação à radiação solar.....	35
Figura 8 - Diagrama simplificado de uma câmera infravermelha.	41
Figura 9 - Imagem de termografia de infravermelho de uma residência durante a noite.....	42
Figura 10 - Representação dos campos elétrico e magnético de uma onda eletromagnética...	43
Figura 11 - Espectro da radiação eletromagnética com a demonstração dos comprimentos de onda para as cores do espectro visível.....	44
Figura 12 - Esboço que ilustra a propagação de luz através de dois meios com índices de refração diferentes, $n_1 < n_2$	44
Figura 13 - Representação do processo de refração no vidro.....	46
Figura 14 - a) Caminhos de um feixe de luz que passa por uma série de três traqueoides preenchidos com ar ou (b) preenchidos com um meio de aproximadamente o mesmo índice de refração das paredes celulares (B).....	47
Figura 15 - A interação entre pesquisa de materiais x fornecedores x designers.....	49
Figura 16 - Insumos para o processo de design.....	49
Figura 17 - Círculo de Krebs da criatividade	52
Figura 18 - Sistema da extração do pecíolo do Jupati (<i>Raphia Taedigera</i>).....	53
Figura 19 - Estruturas das folhas pinada	54
Figura 20 - Aplicações do Jupati na produção local: (a) Matapi, (b) chapéus e (c) bolsas	55
Figura 21 - Fruto do Jupati	55
Figura 22 - Processo de beneficiamento da fibra de Jupati	56
Figura 23 - Modelo esquemático da composição estrutural básica da madeira	57
Figura 24 - a) Esquema das estruturas mesoporosas em madeira antes e depois da remoção da lignina e impregnação do polímero. b) Imagem da madeira que se tornou altamente transparente após duas etapas	60

Figura 25 - Um esboço de uma casa com telhado de madeira transparente para condições de iluminação confortáveis.....	61
Figura 26 - Esboço mostrando a preparação de madeira transparente: deslignificação seguida por infiltração de polímero. Barras de escala nas imagens de MEV são 40 μm	62
Figura 27 - Madeira transparente de 1,0 mm tratada com NaClO_2 (1 h-6 h), depois lavada com duas soluções diferentes: a) água destilada e b) H_2O_2	63
Figura 28 - A fotografia mostra a madeira transparente não acetilada (esquerda) e a madeira transparente acetilada (direita).....	64
Figura 29 - a) Estruturas comuns na lignina: coniferaldeído e cetonas aromáticas e b) reações representativas da deslignificação da madeira por duas rotas (deslignificação baseada em NaClO_2 e tratamento alcalino com H_2O_2).	66
Figura 30 - a) Seção transversal original da madeira mostrando a estrutura celular da madeira b) Madeira deslignificada que suportam a presença de uma estrutura de madeira bem preservada e a geração de vazios em microescala e em escala nanométrica na parede celular	67
Figura 31 - a) MEV de um bloco de madeira deslignificado b) MEV aproximada ressaltando as mesoestruturas da madeira onde alguns poros na direção radial são perceptíveis c) Nanofibras de celulose alinhadas, presentes na parede dos canais microssaturados. d) Compósito da madeira com enchimento de polímero.	69
Figura 32 - Esboço esquemático mostrando a propagação da luz através da madeira transparente dentro de um feixe de entrada de intensidade incidente	73
Figura 33 - a) Evidência fotográfica do efeito ofuscante problemático com o vidro em comparação com a iluminação uniforme e confortável através da madeira transparente. b) Evidência fotográfica da distribuição uniforme da luz no interior do modelo da casa ao usar a madeira transparente como telhado com luz natural em comparação com o uso de vidro	75
Figura 34 - a, b) Esquema ilustrado dos testes mecânicos para madeira no sentido radial (R) e longitudinal (L) transparente respectivamente	76
Figura 35 - Curvas de tensão-deformação para a madeira nativa e madeira transparente: a) direção longitudinal e b) na direção transversal	76
Figura 36 - a) Curvas de tensão-deformação em tensão uniaxial para madeira transparente (MT) com fração volumétrica $V_f=0,19$ (MT-19) e $V_f=0,05$ (MT-5), madeira deslignificada (DLM) e PMMA; b) Imagem de MEV da madeira transparente mostrando a natureza nanofibrosa da região da parede celular e sinais de ligação interfacial favorável com PMMA na interface PMMA-madeira	77

Figura 37 - a) O teste de impacto de uma peça de vidro padrão e um compósito de madeira transparente de espessura semelhante. O vidro quebra no impacto repentino (foto superior), enquanto a madeira transparente mostra apenas um dente na superfície (foto inferior) b) A curva de tensão-deformação da madeira transparente em comparação com o vidro.	78
Figura 38 - Uma ilustração do transporte de calor radial e axial em madeira transparente	79
Figura 39 - As condutividades térmicas medidas de vidro padrão, epóxi, direção axial e radial da madeira transparente	80
Figura 40 - Imagens térmicas para evolução térmica de MT-TES e vidro em relação ao tempo, quando colocadas desde a temperatura ambiente até uma superfície aquecida a 60 °C. a) Início do experimento, b) após 20 segundos, a amostra de vidro atingiu a temperatura da superfície aquecida e c) TW-TES a atinge após 210 segundos.....	80
Figura 41 - Etapas da pesquisa	84
Figura 42 - Resumo dos procedimentos experimentais da pesquisa	88
Figura 43 - Pecíolo do Jupati após 3 dias exposto ao sol para secagem.....	89
Figura 44 - Dimensões do corte das amostras do pecíolo de Jupati para experimentos.....	90
Figura 45 – a) Foto da amostra do pecíolo de Jupati <i>in natura</i> (b) e amostras imersas na solução de mercerização após 5 dias	95
Figura 46 - Foto das amostras durante o processo de deslignificação.....	96
Figura 47 - Variação da cor das amostras de Jupati <i>in natura</i> e após o processo de deslignificação.....	97
Figura 48 - Imagens de MEV: a) Jupati <i>in natura</i> e b) Jupati após o processo de deslignificação.....	97
Figura 49 - Espectros FTIR: (a) Jupati <i>in natura</i> e (b) Jupati deslignificado	98
Figura 50 - Curvas termogravimétricas do Jupati <i>in natura</i> (a) e deslignificado (b).....	100
Figura 51 - Processo de impregnação assistido por ultrassom	101
Figura 52 - Foto das amostras impregnadas com resina epóxi por ultrassom.....	102
Figura 53 - Imagens obtidas por MEV das amostras: (a) EPX-C e (b) EPX-F. Aumento 250 X	102
Figura 54 - Fotos para fins de ilustração da impregnação a vácuo: (a) bomba de vácuo e (b) impregnação a vácuo com PUD	104
Figura 55 - Amostras do pecíolo do Jupati impregnado com dispersão aquosa de poliuretano (PUD) utilizando bomba a vácuo sobrepondo o logotipo da Escola de Design (UEMG)	104
Figura 56 - Imagens obtidas por MEV das amostras: (a) Jupati <i>in natura</i> e (b) PMT 10. Aumento 250 X	105

Figura 57 - Evidência fotográfica do efeito ofuscante do vidro em comparação com a iluminação uniforme e difusa através das amostras de compósito PMT 10 e PMT 11 obtidas	106
Figura 58 - Amostra preliminar obtida com impregnação a vácuo de resina epóxi.....	107
Figura 59 - Imagens termográficas das amostras: (a) início do experimento, (b) 10 min, (c) 20 min e (d) 30 min.	109
Figura 60 - Dimensões do protótipo construído para experimentos de IRT.	112
Figura 61 - Imagens termográficas das amostras em estufa à 40 °C: (a) medição inicial (Jupati 28,2 e vidro 28,4 °C) e (b) medição após 15 min na estufa (Jupati 35,1 e vidro 42,5 °C). Temperatura máxima 95,4 e mínima 29,4 °C	113
Figura 62 - Posicionamento das amostras durante o experimento de termografia passiva: (a) antes do teste e (b) sob insolação	114
Figura 63 - Amostras sob incidência solar: (a) início do experimento, (b) 10 min de aquecimento, (c) 20 min de aquecimento e (d) 30 min de aquecimento	115
Figura 64 - Simulação de janela em um ambiente fictício sendo: (a) uma janela com vidro e (b) janela com a simulação de aplicação da madeira transparente	117

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Perspectiva sistêmica do projeto e o papel do designer	26
Quadro 2 - Levantamento dos reagentes utilizados no processo de deslignificação segundo a literatura.....	65
Quadro 3 - Lista de polímeros utilizados para obtenção de madeira transparente segundo a literatura com seus respectivos índices de refração.....	68
Quadro 4 - Sistematização do processo de obtenção da madeira transparente segundo a literatura.....	69
Quadro 5 - Classificação da pesquisa.....	83
Quadro 6 - Resumo bibliográfico da dissertação.....	85
Quadro 7 - Lista de reagentes utilizados na fase experimental da pesquisa.....	89
Quadro 8 - Infraestrutura usada para realização das caracterizações	94
Quadro 9 - Caracterizações realizadas nas diferentes etapas do processo	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potência (W) e tempo (min) utilizados na impregnação por ultrassom das amostras com resina epóxi	92
Tabela 2 - Valores de RGB e T% das amostras impregnadas usando ultrassom	103
Tabela 3 - Valores de RGB e T% das amostras impregnadas usando vácuo	105
Tabela 4 - Valores de temperatura (°C) medidos pela câmera termográfica	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIBN	Azobisisobutironitrila
ATR	Refletância Total Atenuada
cm	Centímetros
DLW	Madeira Deslignificada
DTPA	Ácido dietilenotriaminopentacético
EDX	Espectroscopia de raios X por dispersão em energia
FTIR	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier
g	Grama
GPa	Gigapascal
h	Horas
IRT	Termografia de infravermelho
IR	Espectro de infravermelho
K	Kelvin
kV	Quilovolt
L	Litros
LWIR	Comprimento de onda longo
m	Metros
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
min	Minutos
MMA	Metil Metacrilato
mL	Mililitros
m/V	Massa por volume
MWIR	Comprimento de onda médio
Mpa	Mega Pascal
nm	Nanômetro
Pa	Pascal
PMMA	Polimetilmetacrilato
rpm	Rotações por minuto
<i>sen</i>	Seno
TW	Madeira transparente
UV	Ultravioleta

Vis	Visível
Vf	Fração volumétrica
WDO	World Design Organization
W	Watt
°C	Graus Celsius
µm	Micrometro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo geral.....	19
1.2.2 Objetivos específicos	19
2 REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1. TRANSDISCIPLINARIDADE DO DESIGN E A COMPLEXIDADE DAS NECESSIDADES HUMANAS.....	21
2.2 CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO: ASPECTOS HUMANOS E AMBIENTAIS.....	28
2.2.1 Conforto térmico no ambiente construído.....	33
2.2.2 Trocas de calor e a resposta humana corporal a condição térmica do ambiente.....	36
2.2.3 Ensaio termográfico para avaliação do desempenho térmico do material	40
2.2.4 Conforto lumínico no ambiente construído.....	42
2.2.5 A interação luz-madeira: Noções básicas.....	43
2.3 DESIGN PARA SUSTENTABILIDADE E A ENGENHARIA COMO PROCESSO DE INOVAÇÃO EM MATERIAIS	47
2.4 PECÍOLO DO JUPATI (<i>RAPHIA TAEDIGERA</i>)	53
2.5 MADEIRA TRANSPARENTE: UMA PROPOSTA PARA APLICAÇÕES MULTIFUNCIONAIS.....	56
2.5.2 Fabricação da madeira transparente	61
2.5.3 Propriedades ópticas da madeira transparente	73
2.5.4 Propriedades mecânicas da madeira transparente	75
2.5.5 Propriedades térmicas da madeira transparente	78
3 CONSIDERAÇÕES METODOLÓGICAS.....	82
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	82
3.2 ETAPAS DA PESQUISA	83
3.3 MATERIAIS E MÉTODOS	87
3.3.1. Materiais.....	89
3.3.2 Métodos.....	90
3.4 CARACTERIZAÇÕES	92
3.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	92
3.4.2 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	93
3.4.3 Análise Termogravimétrica (TGA).....	93
3.4.4 Transmitância pela relação da escala RGB	93
3.4.5 Termografia de Infravermelho (IRT)	93

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	95
4.1 PROCESSO DE DESLIGNIFICAÇÃO	95
4.2 PROCESSO DE IMPREGNAÇÃO DO POLÍMERO	101
4.2.1 Impregnação por ultrassom	101
4.2.2 Impregnação a vácuo.....	104
4.3 TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO (IRT)	108
4.4 PROPOSTA DE APLICAÇÃO	116
5 CONCLUSÕES.....	118
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	121
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122

1 INTRODUÇÃO

A economia global e sua crescente ampliação nos últimos anos fez aumentar de forma concomitante o consumo de energia, esse crescimento nas demandas energéticas vem acontecendo mundialmente sob grande influência do desenvolvimento, qualidade de vida e saúde da sociedade (SOUZA, 2013; NETO, 2016). Quando se trata do consumo de energia do setor residencial no Brasil, a eletricidade representa cerca de 46% da energia gerada, ocupando o primeiro lugar no balanço realizado em 2019, o que significa um aumento de 3,5% quando comparado ao levantamento de 2018, sendo sua principal razão a necessidade de climatização dos ambientes (EPE BRASIL, 2020). Atualmente, o fornecimento da maior parte dessa energia é proveniente de combustíveis fósseis, dentre eles o carvão, petróleo e gás natural; sendo estes responsáveis pela grande parte da produção de gases de efeito estufa que contribuem de forma considerável para o aquecimento global (YADDANAPUDI *et al.*, 2017). A elevação da temperatura do globo terrestre, que vem ocorrendo continuamente nos últimos 100 anos, tem sido pauta de diversos relatos (VERMEER & STEFAN, 2009; HANSEN *et al.*, 2010), e servindo de motivação para estudos de modos alternativos de interação do homem com o meio ambiente, seja por meio do uso de materiais alternativos de fontes renováveis e/ou materiais multifuncionais, como respostas às demandas cada vez mais complexas que vêm surgindo devido a essas mudanças no contexto.

A temperatura do globo terrestre é o resultado do equilíbrio entre as radiações solares capturadas e as radiações infravermelhas liberadas pela Terra. Gases como o dióxido de carbono (CO_2), clorofluorocarbonetos (CFCs), metano (CH_4), os óxidos de nitrogênio (NO_x) (NO e NO_2 , monóxido e dióxido de nitrogênio), o ozônio (O_3), entre outros, bloqueiam no planeta Terra uma parcela das radiações infravermelhas advindas do sol, fenômeno chamado efeito estufa que é responsável por manter a temperatura para que seja possível haver vida na Terra (MANZINI e VEZZOLI, 2011). No entanto, há um desequilíbrio neste processo devido a determinadas ações humanas que causaram o aumento da presença dos gases envolvidos nesse processo, o que ocasionou a complicação do equilíbrio térmico do planeta, dentre eles é possível citar o nível do consumo de energia e de onde ela é proveniente.

Os efeitos ambientais decorrentes das ações humanas dentro de toda sua complexidade determinam continuamente uma situação de insustentabilidade de carga e descarga para o meio ambiente, dentre eles a extração de recursos e emissão de substâncias poluentes que levaram a impactos que não são absorvíveis pelo ecossistema, comprometendo o equilíbrio de sobrevivência da fauna, flora e da sociedade de forma geral como um todo. Tratando de forma geral, os impactos ambientais são detentores de efeitos amplos baseados na extensão

geográfica, a qual as mudanças climáticas são caracterizadas em nível global (MANZINI e VEZZOLI, 2011).

Conforto ambiental se tornou uma pauta muito presente no setor da construção civil, discussões nessa área passaram a ser demandas globais considerando aspectos como: adaptações de edifícios ao clima local, inovação tecnológica, bem como a substituição de materiais à base de petróleo pelos biomateriais; uma oportunidade interessante de atuação em resposta a essas variáveis da atualidade (LI et al., 2018a). Quando se fala em conforto nesse aspecto, este se torna propulsor para o desenvolvimento de projetos mais eficientes no que se refere a eficiência energética (MI et al., 2020; ZHU, 2016 e MÜLFARTH, 2018). Nesse contexto, além de questões provenientes da preocupação dos materiais empregados, os estudos envolvendo edifícios com baixo consumo de energia vêm crescendo onde as propriedades de transmissão de luz e isolamento térmico são fatores desejáveis, seja para economia no uso de aparelhos que proporcionam conforto térmico ou questões de iluminação dos ambientes. O vidro vem sendo amplamente utilizado para finalidade de transmissão de luz em edifícios, no entanto, segundo Li et al. (2018c) ele tem como desvantagem a fragilidade com relação a quebra o que compromete o quesito segurança.

Nesse contexto, a madeira transparente se tornou um material estrutural atraente para construções com economia de energia devido a sua alta transmitância, característica de isolamento térmico e alta tenacidade. A produção é feita a partir do processo de deslignificação da madeira, que se trata da retirada da lignina, substância responsável pela coloração da madeira, e posterior impregnação de um polímero com índice de refração compatível com o da madeira. A combinação dos desempenhos funcionais e estruturais se dá pelas propriedades anisotrópicas da madeira e propriedades ópticas e funcionais do polímero que é impregnado para obtenção da madeira ou compósito transparente (ZHU *et al.*, 2016b). As aplicações possíveis para o material multifuncional em questão conectam as áreas de arquitetura, estrutura, design de interiores e materiais.

Dentre as formas de resposta aos problemas de redução de impacto de uso, se pode citar a utilização de materiais renováveis no qual sua matéria-prima pode ser cultivada. No design de materiais a inspiração de uso pode ser proveniente a diversas fontes, dentre elas se podem considerar os estímulos intrínsecos aos próprios materiais, por meio do estudo de suas propriedades e decodificação de sua melhor aplicação para inserção nos produtos de uso (ASHBY e JOHNSON, 2011). Dessa forma, o designer trabalha como facilitador, agente ativador de inovações, de modo a promover interações entre produto-homem-meio (KRUCKEN, 2009).

A partir da observação da produção artesanal em Jupati (*Raphia Taedigera*) no município de São Sebastião da Boa Vista no Marajó localizado no Estado do Pará, percebeu-se potencial de aplicação para o pecíolo. A parte mais externa do pecíolo do Jupati é usada para fabricação do Matapi, armadilha para captura do camarão de água doce. As fibras superficiais são usadas para a produção de produtos artesanais. Desse modo, a parte central do pecíolo não é aproveitada sendo, portanto, caracterizada como descarte.

Portanto, não se trata da ressignificação de um material que vem sendo utilizado como fonte de renda de uma comunidade. Quando se propõe um novo destino a um elemento que já constitui um sistema pré-existente, é importante aliar as dimensões socioambientais e econômicas. Ainda assim, é importante ressaltar que a utilização do pecíolo de Jupati é uma atividade sustentável. O Jupati, por ser uma palmeira da família *Arecaceae* (OLIVEIRA *et al.*, 2006), possui a capacidade de se recuperar por meio da emissão de novas folhas, fazendo com que os produtos já produzidos, bem como o novo material proposto, não interfiram no crescimento natural das palmeiras extraídas.

Nesse contexto, a presente pesquisa foi baseada no que foi encontrado na literatura e propõe o estudo da utilização do pecíolo de Jupati (*Raphia Taedigera*) na obtenção de um compósito transparente em substituição às madeiras que vêm sendo utilizadas. Com isso, foi definida a hipótese da pesquisa: “É possível obter madeira transparente com o pecíolo de Jupati usando os procedimentos reportados na literatura?”.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Realizar uma revisão ampla na literatura acerca dos métodos de obtenção de madeira transparente e avaliar a viabilidade da utilização do pecíolo de Jupati (*Raphia Taedigera*) para obter este tipo de material.

2.2 Objetivos específicos

1. Avaliar o potencial do pecíolo do Jupati (*Raphia Taedigera*) como substituto das madeiras que estão sendo utilizadas segundo a literatura;
2. Efetivar a deslignificação das amostras de Jupati;
3. Realizar caracterização morfológica, química e estabilidade térmica do pecíolo do Jupati (*Raphia Taedigera*) antes e após o processo de deslignificação;

4. Testar a impregnação dos polímeros epóxi (bastante utilizado segundo a literatura) e o poliuretano (pela sua versatilidade e por ser uma dispersão aquosa) para obtenção do compósito transparente a partir de dois métodos: ultrassom e a vácuo;
5. Caracterizar as amostras após a impregnação quanto aos seus aspectos morfológico e grau de transparência;
6. Usar a termografia de infravermelho (IRT) para realizar avaliação do desempenho de condutividade térmica das amostras obtidas de Jupati impregnado com os polímeros selecionados, do vidro e do Jupati *in natura*.
7. Propor uma aplicação para os materiais obtidos que irão direcionar os estudos futuros.

3 REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo apresenta o referencial teórico com a discussão acerca dos assuntos de principal relevância para a pesquisa em questão, as abordagens permeiam pelos temas: transdisciplinaridade do design, necessidades humanas, design do conforto, conforto térmico, inovação, design de materiais, ecodesign, sustentabilidade, pecíolo do Jupati (*Raphia Taedigera*), madeira transparente e as caracterizações que serão realizadas.

3.1. TRANSDISCIPLINARIDADE DO DESIGN E A COMPLEXIDADE DAS NECESSIDADES HUMANAS

O design enquanto atividade projetual e área de conhecimento baseia toda sua atuação em ser o reflexo do contexto construído pelas relações sociais e das atividades humanas que se manifestam no meio, sejam elas desejos, necessidades ou variações de questões já estabelecidas. Sua história de surgimento é separada por Niemeyer (2007) em três fases que tomam como norteadoras: sua evolução, as práticas e a forma pela qual seus conhecimentos atuaram dentro do cenário vigente. A *atividade artística*, que seria a primeira etapa definida pela autora, consiste no foco da produção do artefato na fruição do seu uso. Já a segunda, intitulada como *invento*, trata-se do planejamento direcionado ao processo de fabricação em conjunto da atualização tecnológica. A terceira e última, denominada *coordenação*, se baseia na transversalidade por meio da integração de conhecimentos agregados de diversas especialidades, com o objetivo de trazer embasamento teórico e prático necessários às competências que o processo de design requer durante o desenvolvimento dos projetos (como especificações da matéria-prima, análise do ciclo de vida do produto e/ou projeto, questões voltadas à aplicabilidade, entre outras).

A evolução da perspectiva do design frente as mudanças da sociedade e as exigências cada vez mais complexas do contexto, é perceptível no momento que se analisa as condições de seu surgimento e seu percurso até os dias atuais, a qual envolve cada vez mais outras especialidades com o intuito de melhor responder as demandas da sociedade contemporânea. Dessa forma, nota-se, com o passar das fases trazidas por Niemeyer (2007), que há uma crescente exigência ao profissional no que se refere a sua característica de elo entre o âmbito das inovações socioculturais e as tecnológicas, questão essa também trazida pelo conceito de design apresentado na mais recente divulgação da *World Design Organization* (WDO) (2015), o qual o conceitua como um processo pensado estrategicamente de forma que impulsiona a inovação e promove maior qualidade de vida por meio dos produtos, sistemas, serviços e experiências. Ainda no conceito proposto pela WDO, a área de conhecimento é

colocada como uma atividade transdisciplinar que atua como conexão dos conhecimentos, com a intenção de trazer uma perspectiva mais criativa e otimista do olhar para o futuro conectando inovação, tecnologia, pesquisa, negócios e clientes; o que gera valor e vantagem competitiva nas esferas econômica, social e ambiental. A atuação é tratada como o cerne da “humanização inovadora das tecnologias” assim como, fator de suma importância na comutação econômica e cultural.

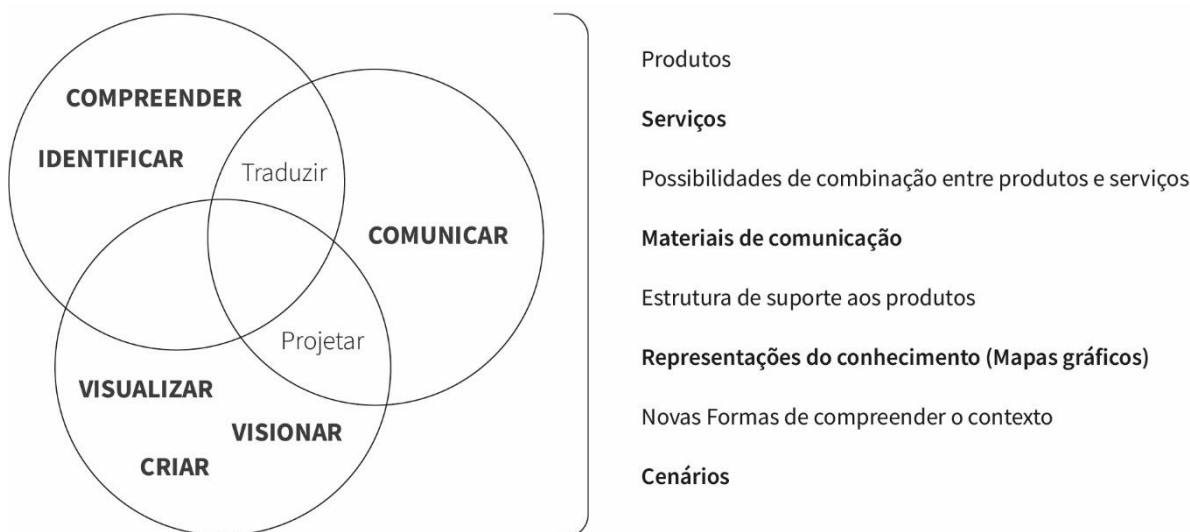
Historicamente, o design nasce com o intuito de trazer outra reação ao mundo industrial, isso se deu com o surgimento do sistema de fábricas em boa parte da Europa e Estados Unidos – entre os séculos XVIII e XIX –, o qual trouxe o aumento na oferta de bens de consumo causada principalmente pela queda do seu custo – fenômeno este que exigiu uma reorganização nos sistemas de produção, transporte e distribuição (CARDOSO, 2013). A reformulação das equipes responsáveis pelo desenvolvimento dos projetos foi motivada principalmente pela insatisfação da população quanto a qualidade e beleza dos mesmos, o que exigiu delas uma visão transdisciplinar, com o objetivo de aprimorar as diretrizes do processo de pensar os artefatos. Com isso, para Cardoso (2013), a atividade de projetar e fabricar bens, antes isolada e silenciosa, migrou para o campo político, econômico e social, visto que a participação da sociedade passou a ser o principal motor para seu desenvolvimento. Entende-se então que é a transversalidade que estabelece a ligação entre as áreas de conhecimento e favorece a integração de diferentes referenciais, com isso se torna possível a ampliação e maior integração da visão no processo de design (KRUCKEN, 2016).

Moraes (2016) traz uma discussão acerca da divisão temporal entre a “primeira modernidade” (que antecede a globalização e se caracteriza por um cenário que se acreditava ser estático e de fácil entendimento) e um segundo momento que concerne em uma era que se define por um cenário dinâmico e mutável, caracterizado pela sua fluidez e complexidade frente a expectativas e anseios da sociedade – o design como ciência de caráter transversal e holístico se estabelece como alternativa de decodificação dessa nova linguagem cada vez mais imediatista e consciente para promover a inovação com base na realidade que de forma direta exige do profissional uma visão sistêmica no momento que se propõe um projeto.

A visão transdisciplinar está diretamente aliada às exigências cada vez mais complexas da sociedade e seu entorno, o que implica diretamente no modo como entendemos o próprio termo *design industrial*, sendo uma necessidade latente de compreendê-lo na sua amplitude, não apenas como um produto palpável (material, forma e função), mas a todo o *sistema-produto* que ele pertence (MANZINI e VEZZOLI, 2011). Para Krucken (2016), seu conceito carrega um conjunto de significados devido a seu caráter holístico de compreensão

do contexto, sua visão e o usuário; colocando o design como um mediador de qualidades que trabalha como catalisador da inovação e da criação (**Figura 1**).

Figura 1 - Ações e resultados relacionados com a atividade de design.



Fonte: Adaptado de Krucken (2016).

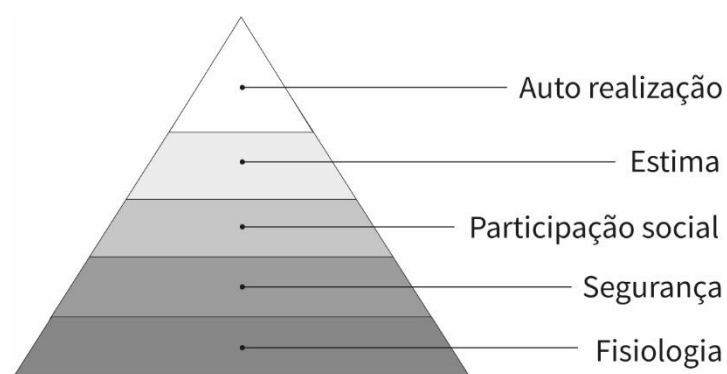
É de suma importância salientar que por mais que se acreditasse na simplificação como caminho para compreensão das demandas sociais, ou como coloca Moraes (2010) na “solidez moderna” no qual o cenário demonstrava o caminho completo a ser seguida, a complexidade frente aos anseios da sociedade sempre esteve presente; e por “complexidade” entende-se aqui como o conceito proposto por Cardoso (2013): um sistema composto por diversos elementos, camadas e estruturas, as quais suas transversalidades e relações condicionam e redefinem de forma contínua o seu funcionamento. No entanto, tal fenômeno só se tornou perceptível com a disseminação da informação, agora de forma mais fluída, completa e dinâmica, o que exigiu dos designers e produtores a capacidade de renovação no modo de gerir dados, trabalhar e perceber as informações que são obtidas (MORAES, 2010).

De fato, existiu (e ainda existe) uma tendência humana a simplificação por meio da separação das partes e tentativa de compreensão das mesmas de forma isolada, no entanto, como pontua Mauri (1996), essa tentativa evidenciada pela crença de um desenvolvimento linear caiu por terra devido a emergências que não foram previstas quando se abdicou de uma análise mais profunda e sistêmica de que essas partes compõem um todo, como por exemplo: a degradação do meio ambiente que se vê saturado, o uso desenfreado dos recursos do planeta, a subjetividade humana, as variações climáticas, o estudo do contexto que está

diretamente ligado ao comportamento e as demandas, entre outras questões que permeiam desde o nível micro ao macroambiente da sociedade; o que ressaltou o grande desafio de decodificação do cenário nesses dois níveis. Para Lana (2011), usando como base de seu raciocínio o pensamento sistêmico, a divisão do problema em partes para sua simplificação busca uma ideia de linearidade nas suas relações que não procede, visto que essa atitude extrai o objeto em questão do seu contexto e compromete o estudo da sua relação com o todo. É fragmentar o conhecimento, e como a autora pontua, o ato de classificá-lo proibindo de pertencer a diversas categorias acaba por compartimentalizar o saber limitando sua compreensão ampla por meio das inter-relações dos fenômenos que o afeta e condiciona.

No discurso formal do design, que se caracterizou de forma muito similar a visão idealista nos anos 1960 e 1970 de categorização, foi comum a separação entre necessidades primárias e secundárias, imediatas e mediatas; sendo separadas entre as essenciais relacionadas a questões fisiológicas do ser humano (alimentação, hidratação, sexo), e a segunda como não essenciais ou, como classificadas na época, apenas desejáveis (bem-estar, lazer, conforto). Essa hierarquização das necessidades é defendida pela Teoria da Hierarquia das Necessidades de Maslow, a qual propõem que o comportamento humano motivacional poderia ser compreendido por meio de determinadas necessidades separadas em níveis de prioridade para sua existência, sendo elas separadas em fatores motivacionais e desmotivacionais (**Figura 2**) (MASLOW, 1970).

Figura 2 - Pirâmide de Maslow.



Fonte: Adaptado de Moraes (2010).

Para Maslow (1970) as necessidades humanas estão dispostas em níveis que podem ser visualizadas como uma pirâmide, na qual sua base comporta as necessidades fisiológicas e o topo as voltadas a autorrealização. Em relação à concepção de produtos industriais, Moraes (2010) defende que a drástica mudança de cenário, antes estático e passou a ser imprevisível e

repleto de enigmas, contribuiu com a maior exigência dos designers em trabalhar com a diferenciação através da inovação por meio da mudança de perspectiva (a visão sistêmica da realidade). Como coloca Branzi (2006) essa realidade refletiu no crescimento notório da formação para além de meros projetistas tradicionais, mas em profissionais voltados cada vez mais para a estratégia de inovação. Moraes (2010) ainda prossegue alegando que a tudo isso se soma a ruptura da dinâmica de escala hierárquica das necessidades humanas apontada por Maslow, devido à notória mutação no processo de reconhecimento de valores onde se sobressaiu os quesitos subjetivos, anteriormente tratados como secundários no processo de projeção dos produtos industriais. Considera-se então, como necessidade básica do produto sua funcionalidade primária, e os demais aspectos como o caminho para inovação ao trabalhar a melhor maneira de atingir seu objetivo como artefato de uso.

De forma geral, entende-se que é um sistema complexo (designer) produzindo para outro sistema complexo (usuário e seu contexto) (LANA, 2011) e, assim como coloca Cardoso (2013), uma das maiores lições para o design é que: não adianta buscar receitas formais que forneçam todas as respostas para os desafios da atualidade, pois ela não existe. No momento que se rompe o processo fechado e se compreende sua real profundidade, é possível notar que o processo de projetar no design, baseado na decodificação e atendimento de necessidades, se torna uma gestão de sistemas complexos devido à sua abrangência.

Como mencionado anteriormente, a teoria da complexidade se mostrou um raciocínio contundente no caminho do entendimento da inovação e autor renovação, sendo este entendido como um processo de investigação das mudanças (LANA, 2011). É interessante ressaltar que tal fenômeno leva o design ao posto de atividade projetual plural, uma ação que deve ser realizada em equipe unindo e traduzindo conhecimentos multidisciplinares de forma a agregar o melhor que cada um tem a oferecer. A fluidez e imprevisibilidade das possíveis relações necessárias durante esse processo faz com que o projeto tenha que ser aberto a novos eventos, de forma a estar predisposto a complementar em si mudanças e incorporar o usuário como participante ativo no desenvolvimento da resolução que será proposta a partir da demanda estudada (KRUCKEN, 2009). A evolução da tecnologia reforçou a necessidade de flexibilização dessa atividade do profissional, bem como as dinâmicas da sociedade contemporânea e novo olhar para o cenário e como ela impacta os designers. Assim como defendido por Krucken (2009), essa perspectiva ampla (**Quadro 1**) resulta no desenvolvimento de competências associadas a interlocução, análise simbólica, escuta e a ação em diferentes contextos, tudo isso embasado por meio da integração de conhecimentos de diversas áreas e o incremento de relações transversais na sociedade.

Quadro 1 - Perspectiva sistêmica do projeto e o papel do designer

Perspectiva sistêmica do projeto	
Características do contexto	Complexidade e incerteza
Características do projeto	Dinâmico, aberto a novos eventos
Foco	Sistemas de produtos e serviços
Autoria do projeto	Distribuída ou coletiva
Papel do usuário	Ator que coproduz valor e faz parte da inovação
Papel do designer	Facilitar e apoiar a colaboração e o desenvolvimento de inovações coletivas e sistêmicas
Competências necessárias	Interlocução, capacidade de análise simbólica, capacidade de desenvolver relações transversais na sociedade, habilidade de escuta e de ação em diferentes contextos, capacidade de integração de conhecimentos de diversas áreas.

Fonte: KRUCKEN, 2009.

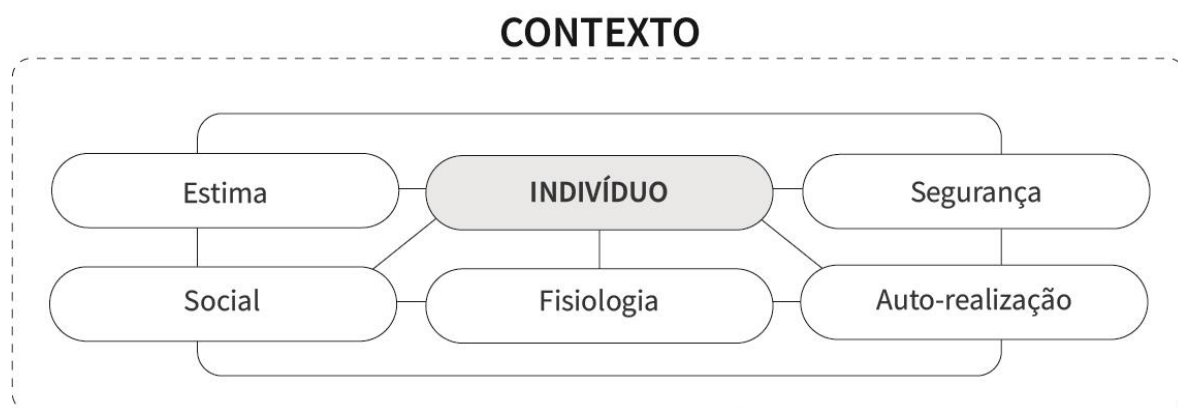
O pensamento sistêmico como alternativa para trabalhar com essa realidade conjugada e repleta de interrelações, também ressalta a importância da interação do designer com todas as fases de projeção, sendo esta além da relação usuário-produto, mas no processo contínuo de mutação que influencia a satisfação e mudança do comportamento do usuário e o meio no qual está inserido (LANA, 2011). Com isso, eleva-se a responsabilidade do profissional para a de compreensão de que todas as suas ações projetuais impactam o contexto de forma direta ou indireta, e esse fato que o caracteriza como uma disciplina de fato transversal. Ao entendê-la como disciplina “atravessável” que aceita propor interações entre áreas humanas e sociais bem como exatas, tecnológicas, econômicas entre outras; de acordo com a demanda que surge durante o processo, torna-se uma relação holística dos problemas de forma que articula aspectos criativos para lidar com as tensões de quem inova e respondê-las de forma coerente (MORAES, 2010). O designer aqui não está como detentor de todos os conhecimentos multidisciplinares, mas como um facilitador da conversão dessas informações para a aplicação humanizada das ciências na sociedade, seu instrumento para tal são projetos eficientes que atendam anseios e necessidades reais, visando a saúde dos usuários por meio do seu bem-estar e satisfação.

Propõe-se, para caráter meramente ilustrativo, uma reestruturação do que seria a dinâmica das necessidades humanas levando em consideração os conceitos do pensamento

sistêmico e da complexidade, que cerca a construção dessas necessidades do ser social, de forma que seja possível o designer trabalhar com essas interrelações para estudo da inovação e renovação dos projetos. Para tal, é importante ressaltar que cada elemento do sistema está interligado e condicionado um ao outro em diferentes níveis. Nele o usuário tem seus desejos e necessidades influenciados desde a base, não apenas pelos aspectos fisiológicos, mas também a questões culturais, psicológicas e temporais que se constroem no decorrer da sua vivência em sociedade. Dessa forma, como o conceito de sistema propõe, a objetividade de cada elemento será, portanto, uma das modalidades da subjetividade (VASSÃO, 2010).

Para sua representação gráfica (**Figura 3**) substitui-se a forma estática da pirâmide pelo grafo em rede (reticular), onde os vértices indicam o componente do sistema, e as arestas suas conexões.

Figura 3 - Proposta de reestruturação ilustrativa das necessidades humanas com base no pensamento sistêmico.



Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

O indivíduo está como elemento que recebe e responde as influências do meio constantemente, sendo os aspectos tanto intrínsecos como extrínsecos a ele. O contexto que engloba toda essa dinâmica, também está condicionado às respostas dadas pelo indivíduo durante essa troca com os elementos que compõem o sistema como um todo. Neste sentido, o contexto representa questões como: meio ambiente, cultura, sociedade, tecnologia, informação, artefatos, entre outros aspectos externos ao ser humano.

O reconhecimento da complexidade que constitui a teia das relações entre os aspectos materiais e imateriais da sociedade como um todo, é um avanço na cultura de projeto e um ideal de consciência coletiva para que se torne possível caminhar de forma conjunta a um objetivo pautado no bem-estar social, pois a complexidade dos problemas requer soluções pensadas de forma coletiva (CARDOSO, 2013). Os objetos deixam “marcas” nos usuários, e

como disserta Moraes (2010), o sentido do design transcende a questão material, mas abrange também as reações e interações que seu uso e existência provocam em aspectos que ultrapassam o artefato em si. Os resultados do projeto são também valores, dentre eles sua visibilidade social, utilidade, segurança, conforto, entre outros (ZINGALE, 2008). O designer como agente transformador e atuante direto de contextos, está para essa realidade como importante elo entre o que se anseia o que se projeta e o que isso refletirá dentro da realidade social, ambiental e econômica.

Partindo do pressuposto que a cultura projetual consiste numa visão ampla, focada tanto no produto em si quando na dinâmica que gira no seu entorno (MORAES, 2010), o estudo de como cada reação do usuário para com as qualidades do projeto de design refletem em sua atividade é de suma importância quando se entende que tais atributos justificaram sua existência, como Lobach (2001) defende ao explanar acerca desse processo consistir na adaptação dos produtos industriais às necessidades físicas e cognitivas do usuário.

Dentre os aspectos que perpassam pela questão física e cognitiva durante a relação do usuário com elementos extrínsecos e intrínsecos a ele inclui-se o conforto, o qual influencia diretamente a experiência do usuário em todo seu percurso. Segundo Osborne (1995), o conforto se refere à sensação de bem-estar que o sistema proporciona, no entanto, defini-lo de forma concreta é extremamente complexo justamente por ser um estado ou condição subjetiva. Quando se amplia a atividade do design a projeção de ambientes confortáveis e modos de medição desse desempenho na prática, a complexidade da análise é extremamente notória, principalmente porque estão envolvidos diversos fatores mutáveis (influenciados por temperatura, aspectos sensoriais, fisiológicos, culturais, entre outros) e envolver múltiplos usuários simultaneamente, além de englobar um campo abrangente e com diversas vertentes que influenciam (positivamente ou negativamente) de diferentes formas a atividade humana.

3.2 CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO: ASPECTOS HUMANOS E AMBIENTAIS

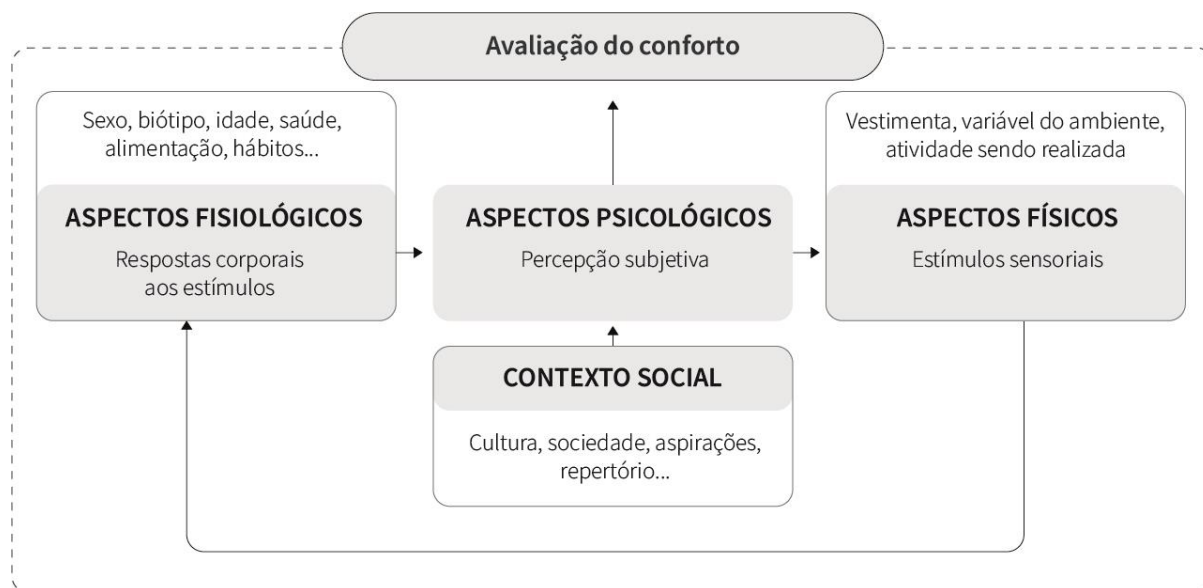
A busca por sentir-se confortável sempre foi uma característica inerente ao ser humano. A necessidade de satisfação, segurança e aconchego levaram o homem a buscar e construir ferramentas que proporcionassem esse estado de bem-estar por meio de abrigo, da vestimenta, o uso do fogo para manter-se aquecido, entre outros. Com isso, a qualidade humana de invenção e inovação desde os primórdios foi estimulada por carências fisiológicas, dessa forma, entende-se que o desejo pelo conforto é oriundo de exigências humanas que estão diretamente associadas ao melhor funcionamento do organismo, buscando sempre um

estado de equilíbrio para seu melhor desempenho (FROTA; SCHIFFER, 2007). Corroborando com essa afirmação, Broega e Silva (2010) apontam o conforto como uma necessidade fundamental para os seres vivos, principalmente considerando o fato de que todas as reações corporais são um esforço para alcançá-lo.

Segundo Slater (1986), o conforto é um estado no qual a relação *humano-ambiente* está em agradável harmonia no que concerne aos seus aspectos fisiológicos, psicológicos e físicos; sendo um estágio essencial para o homem. Por englobar uma série de condições subjetivas seu conceito é complexo e impreciso, envolve componentes térmicos e não-térmicos em situações diversas (críticas ou não) (FOURT; HOLLIES, 1970). Todas essas variáveis devem ser consideradas quando o designer for utilizar a ciência do conforto como uma ferramenta de desenvolvimento dos projetos, de forma que se entenda a essência e seja possível determinar as formas mais apropriadas de sua avaliação objetiva e subjetiva levando em consideração sua abrangência (BROEGA; SILVA, 2010). Segundo Mülfarth (2018) o ensino do Conforto Ambiental teve impulso principalmente na última década do século XXI, muito sob influência do contexto mundial global da demanda de redução dos impactos ambientais, abrindo a possibilidade de desenvolvimento de projetos mais eficientes, com ênfase no consumo energético, dando aos aspectos voltados a conforto ambiental sua devida relevância.

O processo de percepção do conforto está condicionado a diferentes aspectos (**Figura 4**), dentre eles as questões associadas às respostas fisiológicas do corpo humano, os aspectos físicos que induzem respostas sensoriais, o contexto social e físico, além dos aspectos psicológicos que recebem todas essas variáveis e oferecem como resposta a percepção do estado de conforto ou desconforto e diversos níveis (LAMBERTS *et al.*, 2016; BROEGA; SILVA, 2010). De acordo com Rheingantz (2001) o ambiente humano é constituído pelo que ele denomina de “fisiologia dos sentidos” – ambiente térmico, ambiente visual, ambiente auditivo, ambiente olfativo, ambiente tátil, ambiente higiênico e ambiente psíquico; onde os “órgãos dos sentidos” estão continuamente se adaptando as variações do meio ambiente funcionando como “transformadores” que convertem os diversos estímulos em impulsos nervosos. Apesar disso, ainda segundo o autor, a percepção que ocorre por meio dos órgãos sensoriais pode ser alterada por influências centrais (estímulos incitados pela experiência sensorial), impedindo assim a definição do *sensível* como uma resposta exata e objetiva de um estímulo exterior, ou seja, não é possível transportar a *percepção da sensação* como algo constante e estritamente quantitativo.

Figura 4 - Processo de percepção do conforto e seus aspectos condicionantes.



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

A partir do momento em que se trata de conforto e avaliação dele, existem pontos de interação essenciais para discussão quando se parte do elo entre “ambiente construído” e “contexto” por intermédio das sensações e estímulos aos quais o usuário é “atravessado”. Nesse sentido, espera-se do processo de avaliação nos diferentes tipos de condições (térmica, acústica, ergonômica e luminosa) a possibilidade do diálogo dos fatores físicos, ambientais, psicológicos e culturais (MÜLFARTH, 2018). Para ilustrar como esse diálogo entre os estímulos e as sensações acontece para que haja a percepção do conforto, propõem-se a figura 5, no qual temos os estímulos como aspectos quantitativos e as sensações como qualitativos. Segundo Karana e colaboradores (2009) as características dos produtos e/ou ambientes, tem particularidades intangíveis, que se relacionam principalmente com experiências de uso, repertório, interpretação e assimilação dos estímulos. Em contrapartida, existem as características em seu quesito objetivo, que se relacionam a atributos tangíveis do projeto, quando falamos em fatores técnico-práticas (RHEINGANTZ, 2001), como por exemplo: iluminamento, ruído, temperatura do ar, umidade relativa, ventos etc.

A sensação e a percepção, de acordo com Iida e Buarque (2016), tratam-se de etapas de um processo em comum, que englobam a captação de um estímulo ambiental e o transforma em informação, sendo esta considerada como, ainda segundo os autores: “transferência de energia que tenha algum significado em uma dada situação”. A *sensação* nesse fluxo refere-se ao processo *biológico* de captação dos *estímulos* (energia ambiental), e assim que esse estímulo é captado por receptores especializados dos órgãos sensoriais o

mesmo o codifica em impulsos eletroquímicos, e é transmitido para o sistema nervoso central, onde é processado ou não (IIDA e BUARQUE, 2016). Complementando a discussão, Broega e Silva (2010) propõem que a percepção subjetiva do conforto consiste em processos complexos que englobam a “psicologia sensorial”, a qual se condiciona a um amplo número de estímulos promovidos pelo vestuário e do ambiente externo os quais são transmitidos ao cérebro, por meio desses multicanais sensoriais, que geram as respostas das percepções subjetivas, salientando ainda mais a complexidade e característica multidimensional do conceito de conforto (**Figura 5**) (BROEGA; SILVA, 2010).

Figura 5 - Diálogo entre estímulo e sensação no processo de percepção do conforto.

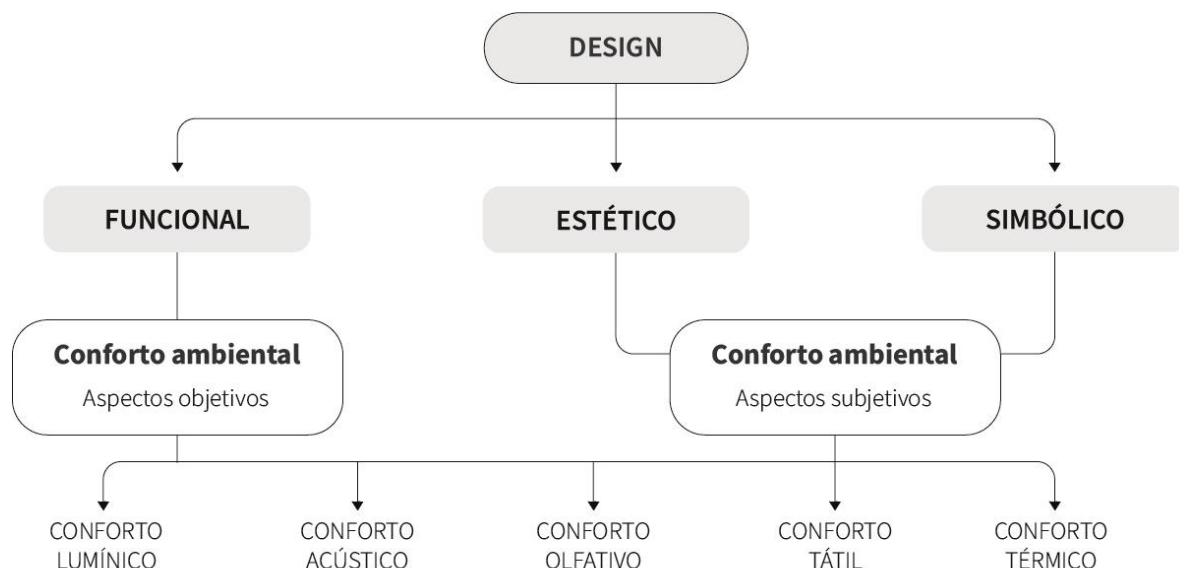


Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

Segundo Iida e Buarque (2016), para que haja a *sensação*, é preciso que a energia ambiental (estimuladora das células nervosas) se encontre dentro de determinados limites: os chamados *limiares* mínimos e máximos. Quando os estímulos se encontram abaixo dos mínimos estes não serão captados; quanto mais intensos maior a velocidade de resposta e maior facilidade de serem detectados; quando acima dos limiares máximos a sensação torna-se incômoda e por vezes dolorosas (limiar da sensação dolorosa). Ainda segundo os autores supracitados é a partir desse *processamento do estímulo sensorial* que se tem a *percepção*, oriunda das informações armazenadas na memória do indivíduo e, a partir delas, que ocorre a conversão das sensações em: significados, relações e julgamentos. Com o design, e seu já conhecido caráter transversal e a exigência do olhar sistêmico das necessidades humanas, se torna possível estabelecer um paralelo entre o design e o conforto, segundo Barbosa (2014) o

vínculo se estabelece quando se leva em consideração as questões subjetivas de conforto vinculadas aos estímulos refletidos pelos aspectos estéticos e simbólicos dos ambientes, objetos, vestuários, comunicações e serviços (**Figura 6**).

Figura 6 - Possibilidade de relação entre design e conforto ambiental.



Fonte: Adaptado de Barbosa (2014).

Segundo Pedra (2011) o termo *design do conforto* tem sua origem no conforto humano, ao qual o *design* procura satisfazer de maneira eficiente às condições da mente que expressam conforto/desconforto no espaço e/ou contexto em que o indivíduo está inserido. Dentre as áreas de conhecimento que se correlacionam com o conforto humano, de forma a melhorar o meio em que o usuário interage se pode citar a Arquitetura, Engenharia e o Design. Ainda segundo a autora, tal especialidade estaria voltada para a decodificação das demandas humanas tanto físicas como psicológicas de conforto, seus fatores influenciadores, voltados para o planejamento de soluções que satisfaçam seus anseios, proporcionando aos usuários maior qualidade de vida e bem-estar na relação homem-produto-ambiente.

Para a presente pesquisa, o conforto lumínico e térmico são visados por meio do desempenho multifuncional da janela com o compósito transparente. Quando se refere a conforto lumínico esperado para o material que será desenvolvido, buscar-se-á a melhor distribuição de luz incidente fazendo com que haja a distribuição homogênea de luz no ambiente que, segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2016) tem influência direta no conforto visual, sendo este espalhamento uniforme uma das condições do ambiente para tal. Ainda

segundo os autores, se trata de um dos requisitos necessários para a ocorrência tranquila do processo visual, contribuindo para o desenvolvimento das tarefas visuais com o máximo de acuidade, precisão, menor esforço, menor risco de prejuízo (relacionado à visão) e redução de risco de acidentes. A interação da luz com a madeira transparente será discutida de forma mais detalhada no tópico 3.2.5.

O conforto térmico, de acordo com as normas ASHRAE (1966) e ISO 7730 (1984), é definido como: “O estado mental que expressa satisfação com ambiente térmico”. Compreender o porquê de os usuários julgarem o estado de conforto ou desconforto térmico recebe também influência de diversos aspectos tangíveis e intangíveis, assim como descrever as sensações ligadas a calor, frio, prazer, satisfação térmica, entre outros; ainda é tema de estudos devido a sua complexidade e imprevisibilidade (BROEGA; SILVA, 2010). O foco dos itens a seguir, no que se refere ao conforto térmico, está em dissertar acerca das condições ambientais que proporcionam conforto térmico, e como a dinâmica de resposta corporal do usuário (fisiológica e comportamental) e ambiental (materiais empregados no ambiente construído, com ênfase nos materiais transparentes) corresponde a esses estímulos gerados pelas trocas de calor.

3.2.1 Conforto térmico no ambiente construído

A definição de conforto térmico em um determinado ambiente é dada por Ruas (1999) como sendo a sensação de bem-estar vivenciada por um indivíduo, sendo este o resultado da combinação satisfatória no ambiente, da: temperatura radiante média, umidade relativa, temperatura do ambiente e velocidade relativa do ar, juntamente com a atividade que está sendo realizada e vestimenta usada pela pessoa. Lamberts, Dutra e Pereira (2016) corroboram com essa definição ao explanarem acerca da relação das exigências humanas de conforto térmico, para com o funcionamento do organismo no que se refere ao fluxo de calor que ele absorve e perde para o ambiente por meio das trocas térmicas.

As condições térmicas do recinto geram diversos efeitos sobre o trabalho humano, dentro das possibilidades, o ideal é que este trabalho seja realizado na chamada zona de conforto térmico. No entanto, quando essa situação não for possível, medidas devem ser tomadas para que se controle ou reduza as condições desfavoráveis e, em casos extremos, proteger os trabalhadores com ações especiais (IIDA e GUIMARÃES, 2016). Pesquisas em fisiologia apontaram que a temperatura percebida (ou efetiva) é, em sua essência, a média das temperaturas do ar e superfícies adjacentes, que pode ser representada pela equação 1.

$$Temperatura\ efetiva = T_A + \frac{T_S}{2} \quad (1)$$

Na qual, T_A corresponde a temperatura média do ar e T_S a temperatura média das superfícies adjacentes; para o conforto é importante que a diferença entre T_A e T_S seja a menor possível (KROEMER e GRANDJEAN, 2005). Segundo Iida e Guimarães (2016), a primeira condição para o conforto é que exista o equilíbrio térmico, ou seja, que a soma da quantidade do calor gerado com aquele ganho pelo próprio organismo seja igual à quantidade de calor perdido para o ambiente. No entanto, ainda segundo os autores, esse equilíbrio não sana de forma completa as exigências para garantia de conforto térmico, ainda assim, o organismo humano é capaz de realizar diversas combinações quando inserido em variáveis ambientais e individuais, mas somente uma faixa estreita das variáveis pode ser considerada confortável. É considerado então, por Kroemer e Grandjean (2005), que grandes áreas frias de paredes ou janelas são particularmente desconfortáveis, pois em condições ideais a temperatura média das áreas adjacentes não deve diferir da temperatura do ar em mais de 2 a 3 °C, para mais ou para menos.

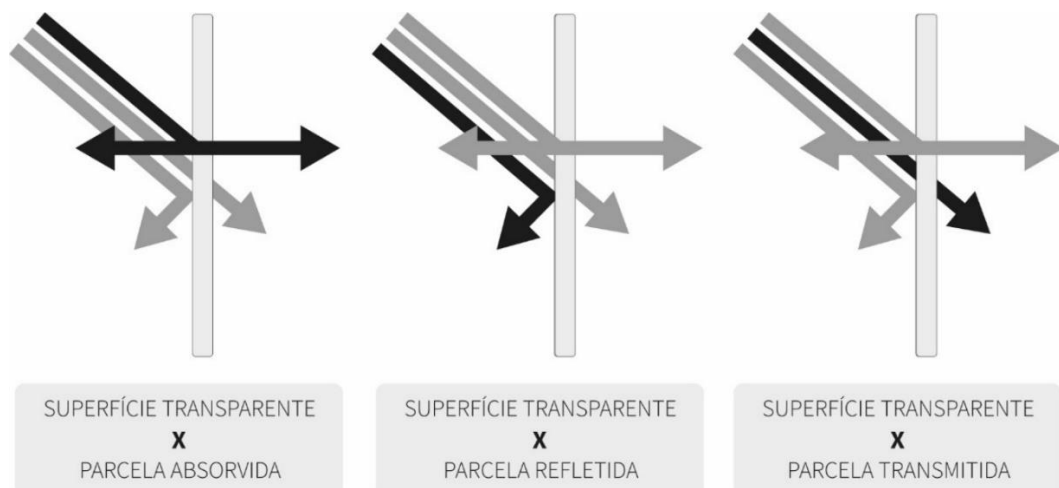
Como já mencionado, as exigências humanas para com as condições de conforto térmico, são reflexo de diversas variáveis extrínsecas a ele que correspondem a: atividade desenvolvida pelo indivíduo, sua vestimenta, questões ambientais e suas variáveis; que proporcionam as trocas de calor entre o corpo e o ambiente. No entanto, também devem ser considerados aspectos intrínsecos ao homem, como: sexo, idade, biótipo, hábitos alimentares, entre outros (FROTA; SCHIFFER, 2007) (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016) (BROEGA; SILVA, 2010). Nesse contexto, Frota e Schiffer (2007) expõem que os índices de conforto térmico têm como intuito englobar, num parâmetro, o efeito conjunto dessas variáveis e desenvolver classificações baseadas em diferentes aspectos de conforto, estabelecidos da seguinte forma:

- *Índices biofísicos*: Se baseiam nas trocas de calor entre o corpo e o ambiente, correlacionando os elementos do conforto com as trocas de calor que dão origem a esses elementos;
- *Índices fisiológicos*: Se baseiam nas reações fisiológicas originadas por condições conhecidas de temperatura seca do ar, temperatura radiante média, umidade do ar e velocidade do ar;
- *Índices subjetivos*: Se baseiam nas sensações subjetivas de conforto experimentadas em condições em que os elementos de conforto térmico variam.

Tais fatores fazem com que seja extremamente complexa a ação de projetar espaços tendo em vista essas diversas particularidades que influenciam no conforto térmico, o que torna um desafio buscar a satisfação do coletivo. Quando se desenvolve o projeto de edificações, por exemplo, se deve levar em consideração também aspectos como a determinação do grau de penetração da energia solar e suas influências na propagação do calor radiante, para isso, a seleção dos materiais empregados e suas propriedades de isolamento tem grande influência nas trocas de calor entre a edificação e o ambiente externo e consequentemente, com os ocupantes do espaço (IIDA e GUIMARÃES, 2016).

Quando o sol, importante fonte de calor, incide sobre uma superfície representa um ganho de calor, que está diretamente ligado à intensidade da radiação incidente e das propriedades térmicas do material empregado na construção de espaços (FROTA; SCHIFFER, 2007). Os elementos de construção, quando estão expostos aos raios solares, sendo eles diretos ou difusos, classificam-se como: opacos, transparentes ou translúcidos (FROTA; SCHIFFER, 2007) (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016) (BROEGA; SILVA, 2010). Uma das questões que perpassam o comportamento de um fechamento transparente é o controle das parcelas de radiação transmitida diretamente, absorvida e reemitida para o interior. O comportamento da radiação solar incidente em superfícies transparentes consiste em ser absorvida, refletida ou transmitida para o interior, como ilustrado na **Figura 7**. Na qual a parcela absorvida se converte em calor no interior do material, pode ser reemitida tanto para o interior quanto para o exterior; quanto maior o ângulo de incidência da radiação maior será a parcela refletida e; uma parte dessa radiação é transmitida para o interior devido a sua transparência (FROTA; SCHIFFER, 2007) (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016).

Figura 7 - Comportamentos de materiais transparentes em relação à radiação solar.



Fonte: Adaptado de Lamberts, Dutra e Pereira (2016).

As capacidades distintas em absorver, refletir ou transmitir radiação solar estão diretamente relacionadas com as características ópticas do material (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016). Tais classificações estão discutidas com maior profundidade no tópico 3.2.4 desta dissertação.

3.2.2 Trocas de calor e a resposta humana corporal a condição térmica do ambiente

A percepção das condições climáticas no ambiente, dificilmente é levada em questão quando se apresenta estacionada na zona de conforto, no entanto, quanto mais se desvia deste padrão maior é a atenção direcionada a ela. Segundo Kroemer e Grandjean (2005), o desconforto é um sistema biológico presente em todos os animais de sangue quente e os estimula a tomar medidas para que o equilíbrio de calor seja reestabelecido, seja por meio da busca por um local mais confortável, aumentando/reduzindo o metabolismo, alterando o nível de atividade muscular e, no caso do ser humano, tem-se a vantagem do uso de roupas, além da possibilidade de modificar o meio ambiente por meio da tecnologia e inovação.

Para Frota e Schiffer (2007), a sensação de bem-estar se faz necessária de forma que o sujeito seja capaz de desenvolver suas atividades sem acionar, de forma perceptível, os mecanismos corporais de defesa contra o calor ou frio. Com isso, é de suma importância que se compreenda os mecanismos físicos que fundamentam as dinâmicas de transferência de calor. Tal importância é salientada por Iida e Guimarães (2016) ao pontuarem que os fatores que causam desconforto aumentam o risco de acidentes, podendo provocar danos consideráveis à saúde. Dentre os efeitos colaterais do desconforto se têm a geração de alterações funcionais que podem afetar todo o corpo, desde o superaquecimento que induz ao cansaço e sonolência, redução do desempenho físico e aumento de erros; ao outro extremo, como as temperaturas muito baixas que dificultam a concentração mental visto que a sensação de desconforto provoca distrações (IIDA; GUIMARÃES, 2016; KROEMER; GRANDJEAN, 2005; BRIDGER, 2003).

O organismo humano permanece em constante manutenção da temperatura, tal resposta do corpo é feita por intermédio de seu aparelho termorregulador, que gerencia a redução dos ganhos ou aumento das perdas de calor por meio de alguns mecanismos de controle. No entanto, a termorregulação apesar de ser uma resposta natural de controle representa um esforço extra, o que resulta numa queda de potencialidade de trabalho (FROTA e SCHIFFER, 2007). Segundo Iida e Guimarães (2016), o corpo humano funciona como uma máquina térmica, gerando calor de forma contínua por meio do processo metabólico de

combustão, o calor produzido por esse processo no interior do organismo é conservado pelos tecidos isolantes do corpo, principalmente pela gordura subcutânea e o excedente é eliminado pelos mecanismos de sudorese. A sensação de conforto térmico, portanto, é quando o organismo humano perde para o ambiente sem ser necessário recorrer a nenhum mecanismo de termorregulação, assim o calor produzido pelo metabolismo corresponde ao da sua atividade (FROTA e SCHIFFER, 2007).

Nesse contexto, as trocas de calor constantes correspondem aos processos de: condução, convecção e radiação; e é por meio deles que o organismo mantém o equilíbrio térmico (IIDA e GUIMARÃES, 2016), podendo ser expresso pela equação 2.

$$S = M - E \pm R \pm C \quad (2)$$

Na qual S é o calor ganho ou perdido pelo organismo, em certo intervalo de tempo. Com o corpo em equilíbrio térmico, $S=0$;

M é o calor gerado pelos processos metabólicos (sempre aparece com sinal positivo, isto é, gera calor);

E é o calor dissipado pela evaporação do suor (sempre negativa, eliminando calor do organismo);

R é o calor radiante trocado com o ambiente (pode ser tanto negativo quanto positivo, varia de acordo com a diferença de temperatura entre o corpo e o ambiente) e;

C é o calor trocado por condução e convecção com o ambiente (pode ser tanto negativo quanto positivo, varia de acordo com a diferença de temperatura entre o corpo e o ambiente).

No que se refere as trocas de calor entre o corpo humano e as interfaces as quais o mesmo interage, seja com ambientes e/ou produtos, é possível classificá-las em três diferentes tipos: condução, convecção e radiação.

Condução (C)

A troca térmica por condução ocorre com o contato direto do organismo com objetos mais quentes ou mais frios. Contudo, geralmente o mesmo organismo fica protegido por roupas e calçados que são bons isolantes, o que reduz as trocas por esse processo (IIDA e GUIMARÃES, 2016). É possível considerar a condução como a transferência de energia de partículas com mais energia para as com menos energia devido as interações que ocorrem entre elas. As temperaturas mais altas estão relacionadas às energias moleculares mais altas, e

quando as moléculas que se encontram uma ao lado da outra se chocam essa transferência de energia (de mais energética para menos energética) ocorre. Quando há gradiente de temperatura, na condução, a mesma ocorre na direção da diminuição de temperatura (INCROPERA e DEWITT, 2014).

Dessa forma, a condução depende principalmente da condutividade dos objetos e materiais que entram em contato um com o outro ou com a pele, o que salienta a importância prática para seleção de materiais utilizados em produtos e elementos estruturais no ambiente, de maneira que seja evitada a perda acentuada de calor do corpo (KROEMER; GRANDJEAN, 2005). Segundo Incropera e Dewitt (2014), a condutividade térmica de um material está diretamente associada à sua: densidade – pois a matéria é mais condutora em comparação ao ar que preenchem seus vazios internos; sua natureza química – considerando que materiais amorfos são de forma geral menos condutores que os cristalinos; e da umidade do material – visto que a água é mais condutora que o ar.

Convecção (c)

A convecção trata-se de uma troca que ocorre devido ao movimento da camada de ar próxima à pele, que tende a retirar o ar quente (se a temperatura ambiental for abaixo de 37°C) e substituí-lo por outro mais frio (IIDA e GUIMARÃES, 2016). Diferencia-se da condução pelo fato de se tratar de trocas de calor com gás (ar) ou algum fluido, esta depende principalmente da diferença da temperatura entre a pele e o ar do ambiente, bem como da extensão do movimento do ar. Em circunstâncias normais a convecção é responsável por aproximadamente 30% do total de troca de calor do corpo (KROEMER e GRANDJEAN, 2005).

Incropera e Dewitt (2014) propõem que a transferência de calor por convecção engloba dois mecanismos: além do *movimento molecular aleatório* (difusão) também pode ocorrer por meio *macroscópico do fluido*. Esse movimento está associado ao fato de as moléculas podem estar a qualquer instante se movendo coletivamente ou como agregado, e tal movimento quando tem a presença de um gradiente de temperatura corrobora para a transferência de calor. Ainda segundo os autores, como essas moléculas nos agregados permanecem em movimentos aleatórios, a transferência completa de calor é, desta forma, justificada pela superposição do transporte de energia nesse movimento das moléculas com o transporte pelo movimento global do fluido.

Radiação (R)

A troca de calor contínua entre o corpo humano e o ambiente é feito por radiação. O calor recebido é proveniente dos objetos mais quentes que irradiam para aqueles mais frios que seu corpo (IIDA; GUIMARÃES, 2016). Corpos quentes irradiam ondas eletromagnéticas de comprimento de onda relativamente longas, de modo que são absorvidas por outros corpos (que podem ser objetos e superfícies) e assim convertidas em calor e, ao contrário da troca de calor por condução ou convecção, ele não depende de nenhum meio material para ser transmitido. A troca por radiação ocorre entre o corpo e o meio (materiais estruturais, do ambiente, objetos e outras pessoas) em ambas as direções o tempo todo (KROEMER; GRANDJEAN, 2005). Incropera e Dewitt (2014), associam a radiação térmica a taxa a qual há a emissão da energia pela matéria como resultado da sua temperatura não nula, sendo o mecanismo de emissão relacionado à energia que é liberada de acordo com o resultado das oscilações ou transições dos elétrons que compõem a matéria, sendo assim, associa-se a esta emissão de radiação térmica às condições excitadas termicamente no interior da matéria.

Segundo Iida e Guimarães (2016), o calor radiante, quando muito intenso, pode transferir algumas centenas de calorias por hora para o corpo, capaz de chegar ao extremo de 1.000 cal h^{-1} , produzindo uma sobrecarga térmica que faz com que o corpo necessite eliminá-la pelo suor, exigindo esforço adicional do coração. Ainda segundo os autores, se o ritmo de ganho de calor corporal ultrapassar a sua capacidade de eliminá-lo, tal condição reduzirá a capacidade de trabalho e outros distúrbios indicadores desse desequilíbrio térmico, como sensações desagradáveis. Para Kroemer e Grandjean (2005), diferentemente da condução e convecção, a radiação do calor dificilmente sofre influência direta da temperatura, umidade ou movimento do ar; mas está diretamente dependente da diferença de temperatura entre a pele e as superfícies adjacentes. Combater o calor radiante por meio do aumento da ventilação não é uma alternativa muito viável, visto que assim só ocorre o favorecimento da evaporação do suor, no entanto não se evita que o corpo receba radiação (IIDA e GUIMARÃES, 2016).

Neste sentido, materiais de construção que proporcionem melhor isolamento térmico são desejáveis. Quando o isolamento é executado de forma eficaz, retarda o fluxo de calor através da estrutura da construção e fornece uma barreira entre o recinto e o ambiente externo. Os materiais mais empregados na construção civil de edifícios residenciais e comerciais para a finalidade de isolamento nas paredes são a madeira e espuma composta (AL-HOMOU, 2005). Contudo, materiais de construção que são transparentes como o vidro, por exemplo, possuem uma condutividade térmica muito mais alta, resultando num fluxo de calor maior que os materiais circundantes e uma redução considerável no isolamento térmico, sendo ele uma

característica apreciável para janelas (PADADOPOULOS, 2005), tendo em vista que a ponte térmica entre janelas e telhados feitos de vidro pode requerer maior consumo de energia para equilíbrio térmico interno dos ambientes. Atualmente, algumas estratégias são adotadas para essas problemáticas, como envidraçamentos de múltiplas camadas, no entanto são frequentemente dispendiosas e podem agregar maior peso aos elementos estruturais (LI et al., 2016a). Por outro lado, a madeira, por ser um isolante natural devido a sua característica anisotrópica pela presença de bolsas de ar na estrutura da célula (YU et al., 2011) (KAWASAKI; KAWAI, 2006), seria um potencial substituto do vidro a partir do momento que se alcançar a transparência sem comprometer suas propriedades térmicas.

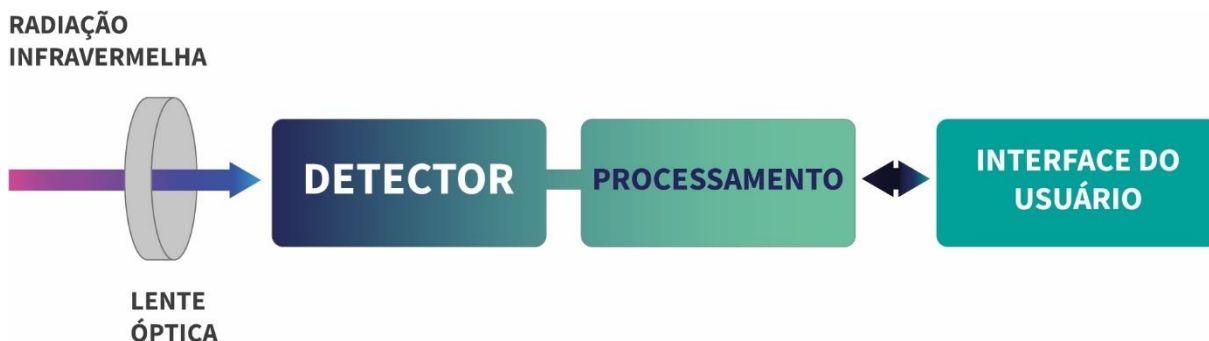
Com o intuito de avaliar o desempenho térmico do compósito transparente que a presente pesquisa propõem, será realizado um ensaio termográfico por meio da termografia infravermelha que tem como objetivo obter imagens com termocâmera do material sob influência de variações térmicas e posterior análise das imagens para estudo de seu comportamento térmico ao que se refere a condutividade do calor.

3.2.3 Ensaio termográfico para avaliação do desempenho térmico do material

A termografia infravermelha consiste em uma técnica que, por meio da captura sem contato físico da radiação térmica infravermelha emitida pela superfície dos corpos, com o uso de um equipamento converte a energia térmica em pulsos elétricos e após tratados fornecem em forma de imagem digital o perfil de temperatura de determinada região do espaço (CALADO, 2013). Tal técnica é utilizada em algumas áreas de conhecimento visando tanto aplicações práticas corriqueiras, como em pesquisas científicas que investigam potencialidade de seu uso (BARBOSA, 2014).

A composição dos equipamentos de termografia (termocâmeras de infravermelho) consiste basicamente em: uma lente e sensores/detectores de radiação que captam a energia radiante na faixa infravermelho e direcionam o sinal a um amplificador o qual é processado e convertido por um *software* para imagens térmicas (termogramas) (BARBOSA, 2014), como está ilustrado na **Figura 8**.

Figura 8 - Diagrama simplificado de uma câmera infravermelha.



Fonte: Adaptado de Flir (2012).

As imagens térmicas que são geradas pelos sistemas infravermelhos são digitais e permitem a reprodução em sistemas televisores ou computadores para análise posterior e processamento das informações. O sinal decodificado apresenta-se nos termogramas segundo os limites da escala de temperatura em uso, variando em uma graduação entre tons escuros e claros (FLIR, 2012; MALDAGUE, 2002; SALES, 2008).

As câmeras de infravermelho são configuradas e calibradas em uma faixa específica do espectro infravermelho, nesse contexto, o material da lente necessita ser selecionado de acordo com a faixa espectral almejada. Ainda segundo o autor, dentre as opções de materiais para as lentes é comum utilizar-se o silício (Si) para comprimento de onda médio (MWIR - $3\mu\text{m}$ a $6\mu\text{m}$); germânio (Ge) para comprimento de onda longo (LWIR - $6\mu\text{m}$ a $15\mu\text{m}$). A configuração apropriada possibilita que a lente da câmera de infravermelho transmita aproximadamente 100% da radiação incidente, e proporciona uma precisão da medição da temperatura, geralmente, com margem de erro menor do que 1°C (FLIR, 2012).

Bagavathiappan et al. (2013) citam exemplo de aplicação de termografia de infravermelho em construção civil para monitoramento do nível de isolamento térmico de construções antigas e para detecção do escoamento de calor, bem como para determinação do coeficiente de transferência do calor durante períodos mais quentes e frios. Como demonstrado na **Figura 9**, que retrata uma imagem de termografia infravermelha em uma residência durante a noite, nela as cores vermelhas denotam as regiões com temperaturas mais elevadas, enquanto que as azuis correspondem as regiões mais frias. Ainda segundo os autores, por meio da avaliação da imagem obtida, conclui-se que a maior perda de calor ocorre pelas portas e janelas.

Figura 9 - Imagem de termografia de infravermelho de uma residência durante a noite.



Fonte: BAGAVATHIAPPAN et al., 2013.

3.2.4 Conforto lumínico no ambiente construído

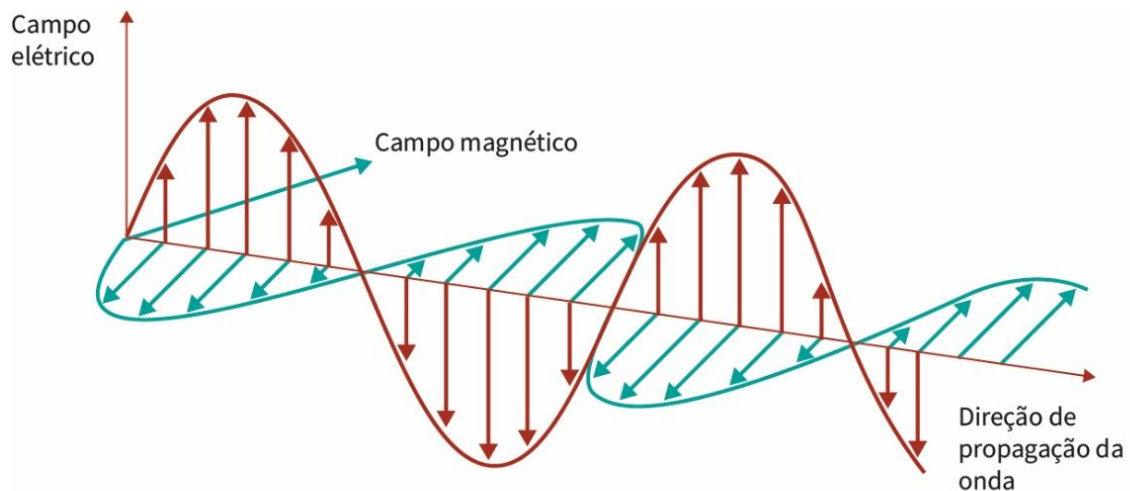
A iluminação é um fator crucial no trabalho humano, e isso se dá pelo fato de que uma parte grande das informações do ambiente são captadas pela visão. O planejamento coerente de iluminação contribui consideravelmente na prevenção de erros de leitura de instrumentos visuais, aumento da satisfação na atividade exercida bem como reduzir erros, fadiga e acidentes (IIDA e BUARQUE, 2016). O conceito de conforto lumínico perpassa por diversos aspectos que constituem sua abrangência, como: a qualidade da luz, sua intensidade, capacidade de discernimento entre figura fundo, o quanto ela promove a redução de esforço visual para execução de determinadas tarefas, reprodução da cor, ausência de ofuscamento, prevenção de fadiga visual, o campo visual devidamente iluminado por uma luz difusa (indireta) e em tarefas visuais de manejo fino com luz direta focalizada, entre outros (IIDA e BUARQUE, 2016; RHEINGANTZ, 2017).

A proposição de maior conforto lumínico por meio da substituição do vidro pela madeira transparente em janelas, se dá pelos fenômenos ópticos que ocorrem com a incidência da luz na superfície do material, este promove um espalhamento da luminosidade devido a aspectos morfológicos da fibra da madeira que se mantêm mesmo após o processo de obtenção do compósito transparente, questões que serão detalhadas com maior profundidade no tópico 2.5.3. Devido a estes fenômenos, com o maior aproveitamento da luz natural com o gerenciamento desse espalhamento, pretende-se promover a redução do ofuscamento direto nos ambientes, sendo este caracterizado pela presença da fonte de brilho no campo visual, podendo ser promovido pelo sol e janelas (IIDA e BUARQUE, 2016).

3.2.5 A interação luz-madeira: Noções básicas

A luz é uma oscilação de campos elétricos e magnéticos que se regeneram um ao outro, formando desta maneira uma onda eletromagnética que emana das cargas vibrantes (HEWITT, 2015). A radiação eletromagnética é ondulatória, seus campos são perpendiculares um ao outro assim como à sua direção de propagação (**Figura 10**) (CALLISTER, 2018).

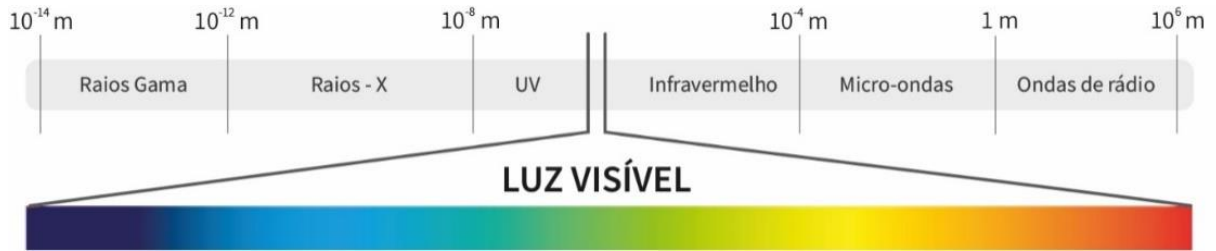
Figura 10 - Representação dos campos elétrico e magnético de uma onda eletromagnética.



Fonte: Adaptado de HEWITT, 2015.

As ondas eletromagnéticas se propagam com a mesma rapidez no vácuo se diferenciando por sua frequência, tal fator constitui sua classificação representada pelo espectro eletromagnético (HEWITT, 2015). Os raios X, ultravioleta, luz visível, infravermelho e as ondas de rádio são radiações eletromagnéticas, sendo a luz a única radiação à qual a vista humana é sensível (ou seja, é visível a olho nu) e compõe uma região muito estreita desse espectro (**Figura 11**), numa faixa de comprimento de onda que varia entre aproximadamente $0,4 \mu\text{m}$ ($4,0 \times 10^{-7} \text{ m}$) e $7,0 \mu\text{m}$ (CALLISTER, 2018) (HEWITT, 2015).

Figura 11 - Espectro da radiação eletromagnética com a demonstração dos comprimentos de onda para as cores do espectro visível.



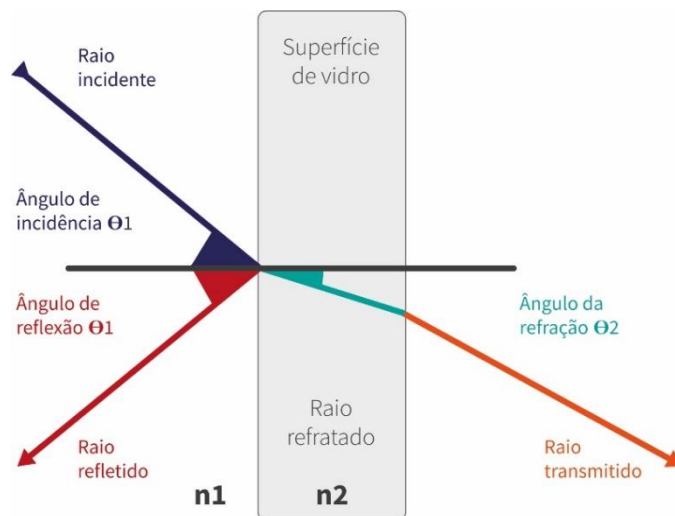
Fonte: Adaptado de Callister (2018).

Quando a luz segue através do ar e interage com um objeto sólido, sua propagação pode passar por alguns fenômenos: continuar na direção para refração e/ou absorção, ou ser refletida de volta na interface ar/sólido (LI et al., 2018b). A intensidade do feixe que incide sobre o material sólido (I_0) deve ser igual à soma das intensidades dos feixes transmitido (I_T), absorvido (I_A) e refletido (I_R) (CALLISTER, 2018), o que pode ser traduzido pela equação 3.

$$I_0 = I_T + I_A + I_R \quad (3)$$

A propagação de luz através de um objeto sólido também pode ser ilustrada conforme a **Figura 12**.

Figura 12 - Esboço que ilustra a propagação de luz através de dois meios com índices de refração diferentes, $n_1 < n_2$.



Fonte: Adaptado de Li et al. (2018b).

O desvio do feixe se dá de acordo com a Lei de Snell, que relaciona o ângulo de incidência e o de refração, com os índices de refração dos dois meios, conforme representada na equação 4.

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (4)$$

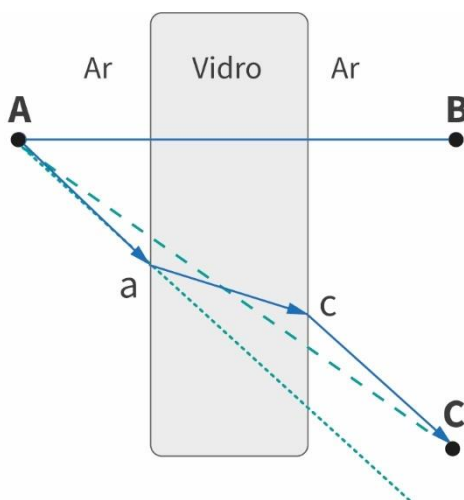
A forma como um material receptor responde à incidência de luz depende da frequência da própria luz e da frequência natural dos elétrons no material (HEWITT, 2015). Os materiais que são capazes de transmitir a luz por meio de absorção e reflexão consideravelmente reduzidas são chamados de transparentes. Quando a luz é transmitida de uma forma difusa (ou seja, dispersa no interior do material em um nível que os objetos não são de fácil distinção quando observados através de uma amostra desse material) classifica-se como translúcido. Por fim, os materiais que absorvem a luz incidente por completo tornando-se impenetráveis à transmissão da luz visível, são denominados opacos (CALLISTER, 2018).

Quando a luz incide sobre a superfície de um material transparente, sofre refração. Isso resulta na mudança de seu comprimento de onda e da sua velocidade. Essa mudança depende de uma característica do material, chamado “índice de refração” (n) que é determinado pela razão entre a velocidade da luz no vácuo (c) e a velocidade da luz no meio (v) (CALLISTER, 2018), sendo representado pela equação 5.

$$n = \frac{c}{v} \quad (5)$$

Suponha-se que um raio de luz saindo do ponto A (**Figura 13**), chegue ao ponto C. Na ausência da placa de vidro, o feixe seguiria a linha tracejada, porém ele deve passar pelo vidro, o que causará refração. Esse desvio, no entanto, continua sendo a trajetória de menor tempo entre A e C, que devido à refração no vidro, segue o percurso A-a-c-C.

Figura 13 - Representação do processo de refração no vidro.

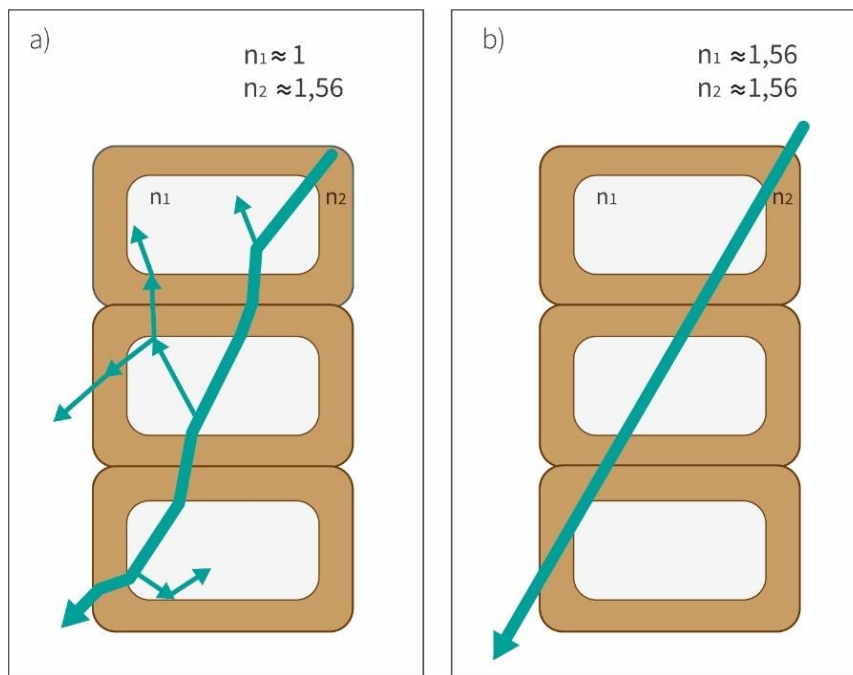


Fonte: HEWITT, 2015.

Neste sentido, a luz desacelera quando imerge em um meio transparente mais refringente, sendo para o vácuo $n = 1$, e quanto maior o valor de n , maior o desvio da luz (HEWITT, 2015). A madeira é um material não transparente, propriedade que está diretamente associada à sua natureza óptica heterogênea, bem como à sua estrutura porosa em microescala, diferentes componentes químicos na parede celular com diferentes índices de refração, além da presença de entidades químicas fortemente absorvedoras de luz (FINK, 1992). Com isso, quando a luz interage com a madeira ocorre uma série de fenômenos ópticos simultaneamente: de reflexão, refração, absorção e transmissão (LI et al., 2018b). O espalhamento da luz ocorre em todas as interfaces que se encontram entre a parede celular ($n = 1,56$) e o ar ($n = 1,0$), com isso, dentro da parede celular a incompatibilidade do índice de refração dos principais componentes químicos da celulose ($n=1,53$), hemicelulose ($n=1,53$) e lignina ($n=1,61$) leva ao espalhamento da luz (FINK, 1992) (LI et al., 2018a).

Especialmente nos espaços intercelulares que estão recheados de minúsculos espaços de ar, traqueides e vasos presentes na madeira seca; podem levar a uma série de reflexões internas, como está apresentado na **Figura 14a**, a qual ilustra a luz passando através de três células cheias de ar e apenas uma parcela da luz transmitida deixa a célula na direção original. Fink (1992) propõe, por outro lado, que caso os componentes do tecido forem circundados por um meio que possua índice de refração semelhante, a luz será capaz de passar através do objeto com alteração reduzida de direção tornando-o mais transparente (**Figura 14b**). Desta forma, com o processo de impregnação da madeira com um meio de índice de refração apropriado, será possível que ocorra o aumento da transparência da madeira.

Figura 14 - a) Caminhos de um feixe de luz que passa por uma série de três traqueoides preenchidos com ar ou (b) preenchidos com um meio de aproximadamente o mesmo índice de refração das paredes celulares (B)



Fonte: Adaptado de Fink (1992).

Questões específicas dessa interação também dependem do comprimento de onda da luz e da natureza da madeira, e abrangem: densidade, composição química, direções da fibra da madeira, entre outros. Com isso, para que o processo de tornar a madeira transparente seja possível, tanto a absorção de luz como as entidades químicas precisam ser reduzidas ou eliminadas, bem como o espalhamento da luz nas interfaces ar/parede celular e no interior da parede celular dever ser minimizado (LI et al., 2018b). Processo que está dissertado com maior detalhamento no tópico 3.5.1 desta dissertação.

3.3 DESIGN PARA SUSTENTABILIDADE E A ENGENHARIA COMO PROCESSO DE INOVAÇÃO EM MATERIAIS

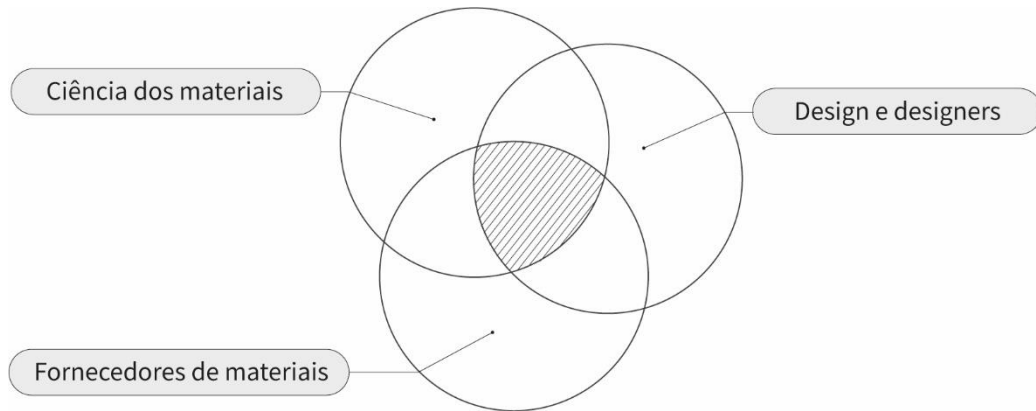
O mundo que nos rodeia é um conjunto de imagens e percepções, ao qual a esfera tangível é constituída de materiais (SALES *et al.*, 2010). O processo de design é repleto de decisões que moldam os processos por trás dos produtos que são lançados no mercado, aspectos como: os materiais e energia necessária para produzi-los, como será a interação deles com os usuários e o que acontecerá com eles após o fim de sua via útil; que refletem hoje decisões tomadas no passado e refletirá amanhã as decisões de hoje (THACKARA, 2008). Neste sentido, Ashby e Johnson (2011) ressaltam a importância de o processo de design desenvolver soluções que sejam significativas para os usuários, que proporcionem

experiências novas e gerem impactos positivos na sociedade e seu cotidiano, dessa forma, entende-se que os materiais transcendem de números em uma planilha de dados e o design de um mero exercício de estética desprovido de sentido tão pouco uma exploração unilateral da tecnologia.

Os amplos estudos desenvolvidos pelas ciências e engenharia dos materiais (no que se refere a informações sobre sua origem, propriedades, processos de seleção dos materiais, entre outros) dispõem aos designers dados de extrema utilidade no momento do desenvolvimento de um produto, haja vista que para tomar decisões responsáveis a respeito do uso eficiente dos materiais, faz-se necessário embasamento teórico sólido acerca de aspectos técnicos sobre eles, proporcionando maiores possibilidades criativas e inovadoras (SALES *et al.*, 2010) (ASHBY; JOHNSON, 2011). Os primeiros estudos para o desenvolvimento de novos materiais têm sua origem nos laboratórios de universidades, governos e de indústrias; no qual as tecnologias desenvolvidas por eles são apresentadas de forma fragmentada. O processo, geralmente, parte de um princípio mais reduzido e progressivamente o material alcança uma espécie de “maturidade”, que é quando ganha maior familiaridade por parte da sociedade e dos profissionais, acompanhado do avanço tecnológico, e expande desta forma seu espaço no mercado e possibilidades de recombinações e reinterpretções de suas funcionalidades (ASHBY e JOHNSON, 2011).

O processo de inovação dentro da área de design de materiais (e do campo de conhecimento de forma geral) perpassa pelo conceito de “perspectiva” como diretriz de enriquecimento da visão de um mesmo fim, pois consiste no processo de compreensão da importância que as partes têm no momento que fazem possível o funcionamento de um sistema no qual os seus elementos se integram, e como propõem Bistagnino (2009): “A inovação não significa uma contínua atualização tecnológica, mas uma angulação com a qual se observa um ponto de vista”, partindo desde princípio, o design como área transdisciplinar se comunica com diversas esferas do conhecimento não como centro da discussão, mas como parte integrante dessa rede de projeto. Segundo Ashby e Johnson (2011), e conforme ilustrado na **Figura 15**, a maior parte dos novos materiais para design são oriundos da comercialização das pesquisas, ou seja, do desenvolvimento impulsionado pela ciência. Ainda segundo os autores, essa comunicação, quando feita de forma eficiente, estimula os designers a trabalhar os materiais de forma criativa; ampliando a visão das exigências projetuais provenientes da expertise do próprio design como área de conhecimento que busca a humanização do processo de inovação (WDO, 2015).

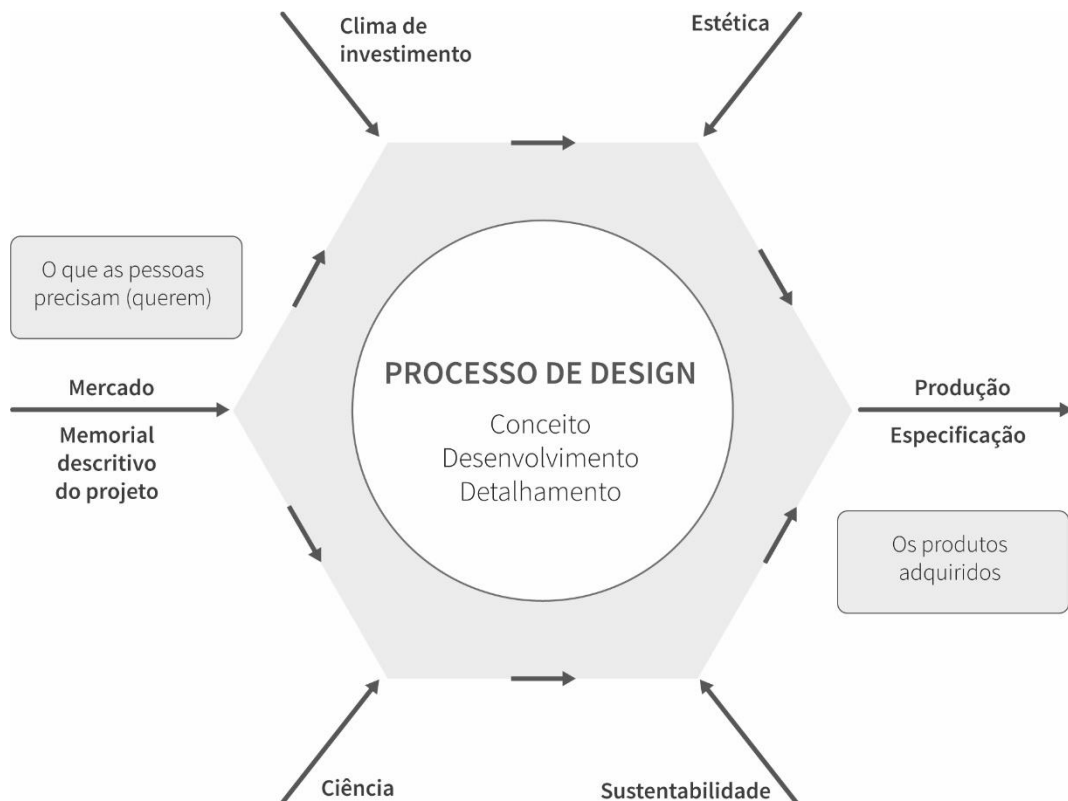
Figura 15 - A interação entre pesquisa de materiais x fornecedores x designers



Fonte: Adaptado de Ashby e Johnson (2011)

O processo de design sofre influência de diversos fatores externos, desde o ambiente, permeia por diversas variáveis, até chegar ao usuário. Torna-se um sistema complexo e condicionado a diferentes elementos que convergem para melhor atender as demandas da sociedade e o contexto o qual ela está inserida (**Figura 16**).

Figura 16 - Insumos para o processo de design



Fonte: Adaptado de Ashby e Johnson (2011)

O mercado, a tecnologia, o clima de investimento, o meio ambiente e o design industrial; são alguns dos aspectos que circundam e influenciam o projeto de design de materiais, o profissional em questão deve então estar sempre atento tanto a esses fatores como ao desenvolvimento da tecnologia proveniente a pesquisa científica adjacente (ASHBY; JOHNSON, 2011). Com isso, o designer deve ter a capacidade de contextualizar, globalizar e relacionar essas diferentes referências, tornando-se também uma alternativa de favorecer recursos e ressaltar potencialidades, atendendo necessidades de usuários em contextos diversos (KRUCKEN, 2009).

No entanto, como pontua Mourão (2013), a ideia atrelada da sociedade de um conforto máximo em todos os aspectos, acabou por refletir em um comportamento humano que levou a abusos sociais. Manzini (2008) ainda questiona se há consistência ao considerarmos sustentável uma sociedade na qual suas necessidades, ainda que básicas e populares, são atendidas por meio de um dispendioso sistema de produtos e serviços, e como salienta Capra (2005), a transição deve ser feita do pensamento atual de “o que se pode ser extraído da natureza”, para “o que ela pode nos ensinar”. E para isso, é preciso uma mudança de atitude para como entendemos a prática do planejamento industrial (MOURÃO, 2008).

O caminho para que a sustentabilidade se estabeleça é reconhecer que todos os fatores que envolvem o ciclo de vida do produto são importantes, desde sua extração, o processo e descarte. Para Bistagnino (2009), o grande desafio é a mudança de comportamento na vida cotidiana e aprendizagem social, principalmente no que se refere ao estilo de vida e como interagimos com o nosso meio. Essa outra perspectiva torna-se uma fonte rica de possibilidades de pensar o projeto.

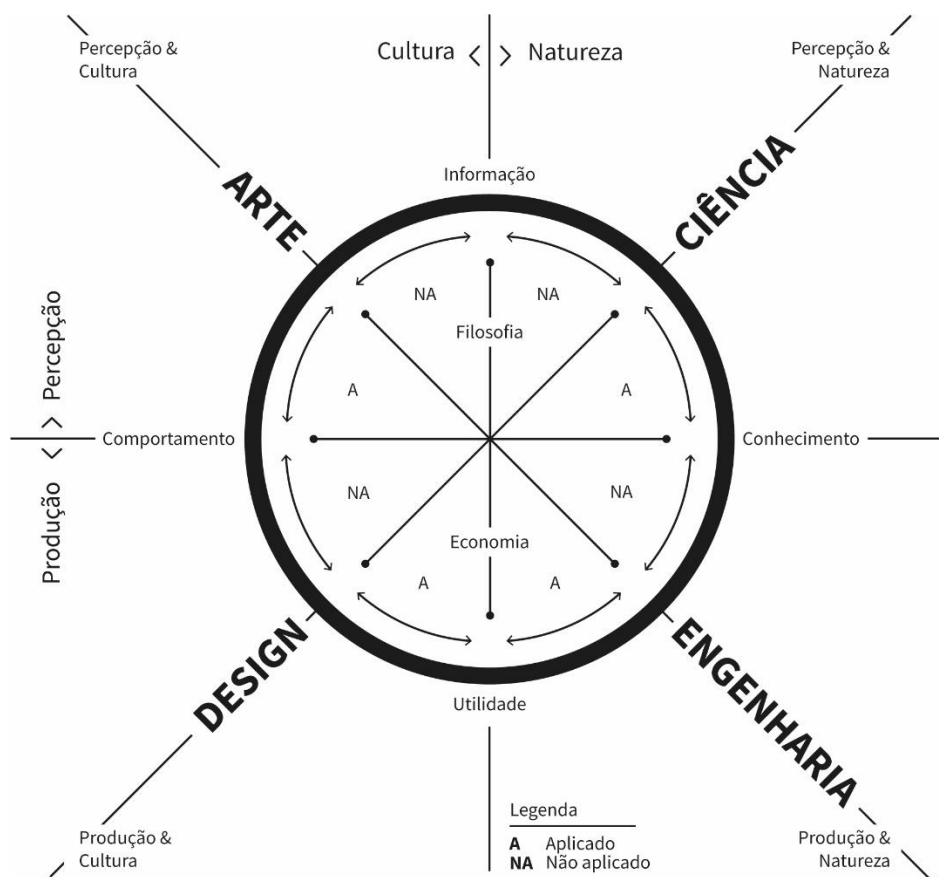
É possível embasarmos, desta forma, o processo de concepção de produtos a partir da Teoria Geral dos Sistemas proposta por Von Bertalanffy (1973), partindo da ideia de que a melhor criação é fruto da relação dos agentes dos sistemas com um objetivo comum, o qual a criação do artefato deve adequar-se ao próprio sistema. Coelho (2008) propõem que, em design, o sistema diz respeito a amalgama que envolve toda a cadeia produtiva, desde quem cria até o usuário final, buscando compreender o cliente e os agentes que influenciam e são influenciados pelo processo de produção do produto.

Nesse contexto, visão sistêmica dentro de um contexto projetual do design, compactua com o que se desenvolve no conceito da sustentabilidade e a sua necessidade de harmonizar os objetivos econômicos, sociais e ambientais (KRUCKEN, 2009). Assim como descreve Sachs (2004) os três critérios principais que devem ser observados no desenvolvimento sustentável consistem em: ser inclusivo do ponto de vista social; sustentável no ponto de vista

ecológico e; ser viável do ponto de vista econômico. Bistagnino (2009) enriquece a discussão ao pontuar que essa tríade também possibilita o estabelecimento de uma relação em que o descarte (*output*) de um sistema pode vir a se tornar matéria-prima de outro sistema (*input*), com isso, os resíduos vegetais de uma região podem gerar soluções e contribuir para o caminho em busca da sustentabilidade. Para isto, delineia-se uma estratégia de enfrentamento do desafio da inovação: ver o mundo a partir do ponto de vista sistêmico, onde se distancia do foco exclusivo do produto, estendendo a atenção à cadeia produtiva considerando também a questão do descarte no trabalho e a própria escassez da matéria-prima.

A perspectiva do design contribui justamente na complexa tarefa de mediar produção e consumo, tradição e inovação, qualidades locais e relações globais (KRUCKEN, 2009). A realização de um projeto deve considerar que existe uma correlação de interdependência que forma um sistema, cada ator está ligado a outro e é preciso que haja essa sinergia compartilhando responsabilidades (BISTAGNINO, 2009). Este diálogo transdisciplinar também é proposto por Oxman (2016) ao traçar interseções entre arte (expressão), ciência (exploração), engenharia (invenções) e design (comunicação). A pesquisadora propõe um o “Círculo de Krebs da criatividade” (**Figura 17**) que possui quatro pontos que se movem de um domínio para o outro, onde a entrada de um é a saída do outro; no qual se pensa na *ciência* como conversor de informações em conhecimento, a *engenharia* converte o conhecimento em utilidade, o *design* converte a utilidade em comportamento cultural e contexto e a *arte* faz uso deste comportamento cultural e questiona a percepção de mundo. O círculo mostra que há um fluxo de informações e de criatividade entre as disciplinas mencionadas, o que demonstra como este processo de inovação perpassa a ideia total de sistema-produto discutida.

Figura 17 - Círculo de Krebs da criatividade

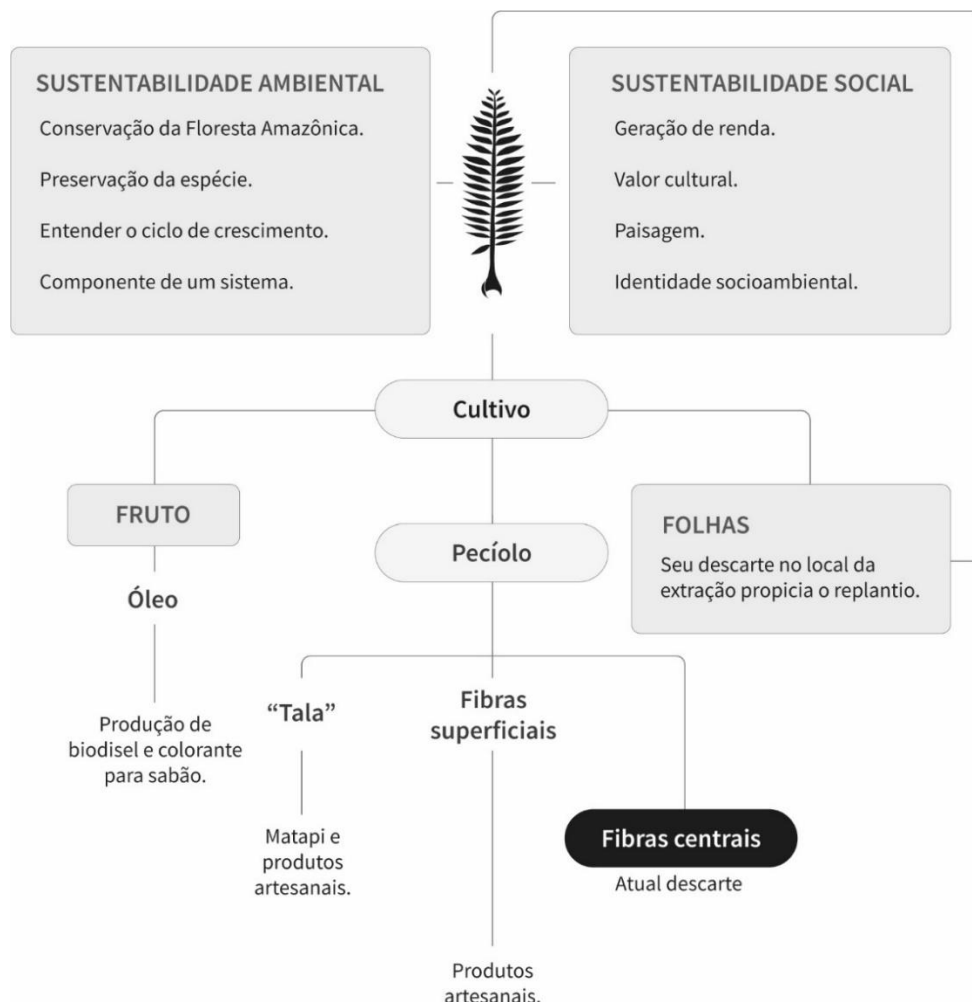


Fonte: Adaptado de Oxman (2016).

O Brasil detém de um significativo potencial de consumo de produtos advindos de recursos da biodiversidade, e é de suma importância o investimento na cultura do meio empresarial e industrial relacionado à inovação em design, de forma que fomenta o desenvolvimento nacional desses produtos que são fruto de recursos biológicos locais (KRUCKEN, 2009). O estudo da utilização do pecíolo da palmeira de Jupati (*Raphia Taedigera*) na obtenção do compósito transparente surgiu da observação do processo de produção artesanal em Jupati na região de São Sebastião da Boa Vista no Marajó, que fica localizado no Estado do Pará. A dinâmica parte da extração da palmeira (**Figura 18**), produção dos produtos artesanais e outros produtos funcionais para a comunidade e descarte da parte central da palmeira (pecíolo), que em análises mais detalhadas mostrou-se um material com potencial de aproveitamento para a obtenção do material visado para presente pesquisa. Com isso, e como propõem Krucken (2009), ao considerarmos as atividades econômicas advindas do uso de recursos locais, buscar-se-á respeitar e proteger o sistema que envolve pessoas, tais recursos e o próprio conhecimento de forma conjunta, é importante

adotar uma atitude ecológica quando se trata de recursos da biodiversidade. Por “ecológica”, é considerado o conceito proposto pelo dicionário Houaiss de língua portuguesa (2001) ao qual consiste: “estudo das relações recíprocas entre homem e o meio moral, social e econômico”.

Figura 18 - Sistema da extração do pecíolo do Jupati (*Raphia Taedigera*)



Fonte: Desenvolvido pela autora (2020).

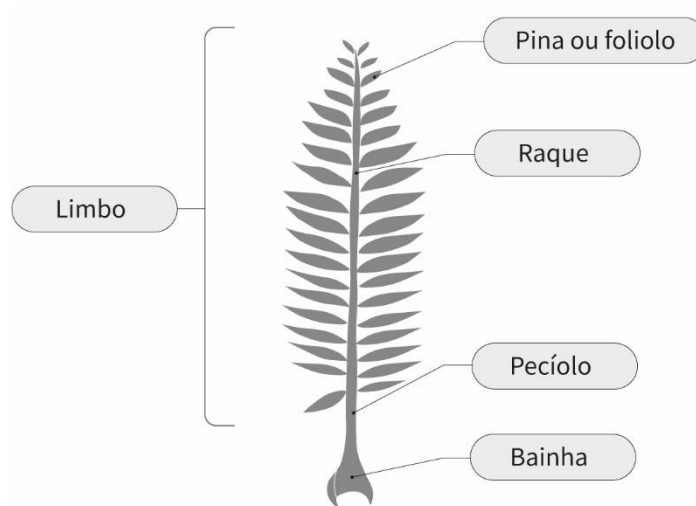
O detalhamento das características, bem como o cenário no qual o Jupati está inserido e suas aplicações serão elucidadas no item a seguir.

3.4 PECÍOLO DO JUPATI (*RAPHIA TAEDIGERA*)

O Jupati (*Raphia Taedigera*) é uma palmeira da família *Arecaceae* do tipo touceira com 5-6 indivíduos, o diâmetro do seu caule varia entre 20-40 cm e não possui espinhos. As folhas são do tipo pinadas variando de 5-15 com até 10 m de comprimento possuindo de 136-205 pares de pinas que se encontram irregularmente arranjadas, em diferentes planos da folha (**Figura 19**) (PESCE, 2009). Habita em locais encharcados como várzeas e igapós, possível

de ser encontrada na América Latina, América Central e algumas regiões da África (OLIVEIRA *et al.*, 2006) (OLIVEIRA *et al.*, 2011). As folhas das palmeiras apresentam características particulares, variando de tamanhos, formas e texturas, no caso da folha do tipo pinada, é constituída por bainha, pecíolo, raque e limbo. Onde a raque é a prolongação do pecíolo, o limbo constitui a região expandida da folha propriamente dita (SODRÉ, 2005).

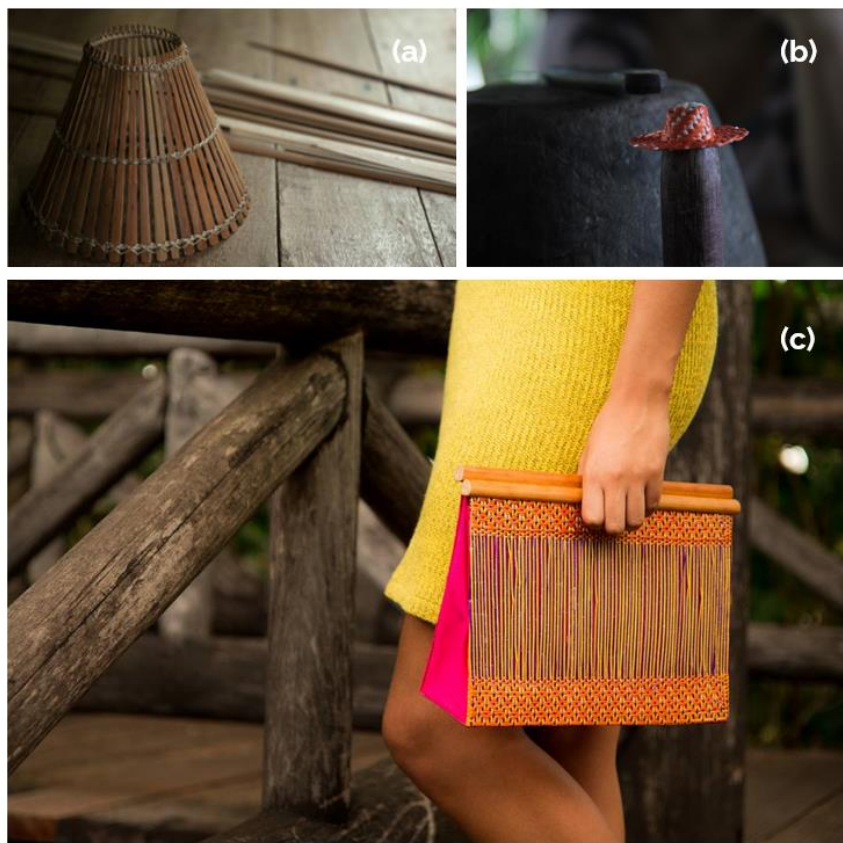
Figura 19 - Estruturas das folhas pinada



Fonte: Adaptado de Sodré (2005)

O município de São Sebastião da Boa Vista, pertencente a microrregião dos furos de Breves da mesorregião do Marajó no Estado do Pará, se destaca pela confecção artesanal em Jupati sendo sua matéria prima a região do pecíolo, onde se encontra a tala e as fibrilas (JARDIM, 2013). A “tala” consiste no revestimento externo do pecíolo que é formado por fibras duras, comumente utilizado na fabricação do Matapi (instrumento de captura de camarão) (**Figura 20a**), cestas, balaies armações de pipa, entre outros; enquanto as fibrilas (originadas da medula, ou seja, a parte interna do pecíolo) apresentam-se de forma cilíndrica, macias e são utilizadas para a confecção dos produtos artesanais, como por exemplo, chapéus (20b), bolsas (20c), acessórios, etc. (OLIVEIRA *et al.*, 2011) (JARDIM, 2013).

Figura 20 - Aplicações do Jupati na produção local: (a) Matapi, (b) chapéus e (c) bolsas



Fonte: Associação Arte em Jupati, Acesso em 20 de jun 2019.

A extração do óleo do seu fruto (**Figura 21**) também é fonte de estudos, pois oferece uma opção na produção de biodiesel (CONCEIÇÃO *et al.*, 2015). Além disso, segundo Pesce (2009), seu óleo também é procurado por algumas fábricas de sabão em Belém no Estado do Pará para aproveitamento da sua tonalidade nos sabões produzidos a partir da mistura com o óleo de palma.

Figura 21 - Fruto do Jupati



Fonte: PESCE, 2009.

A região do Jupati que a presente pesquisa visa utilizar para análise da sua potencialidade na obtenção do compósito transparente consiste na região central do pecíolo. Durante o processo de beneficiamento da fibra (**Figura 22**), retira-se a tala e as fibras superficiais para a produção dos produtos já mencionados, desta forma, será utilizado o resíduo da produção artesanal. No caso das palmeiras da família *Arecaceae*, sua capacidade de recuperação por meio da emissão de novas folhas faz com que artefatos que são provenientes da folha, da haste caulinar, caule e do estipe não constituam ameaça a espécie (OLIVEIRA *et al.*, 2006).

Figura 22 - Processo de beneficiamento da fibra de Jupati



Fonte: SIMÕES, 2013.

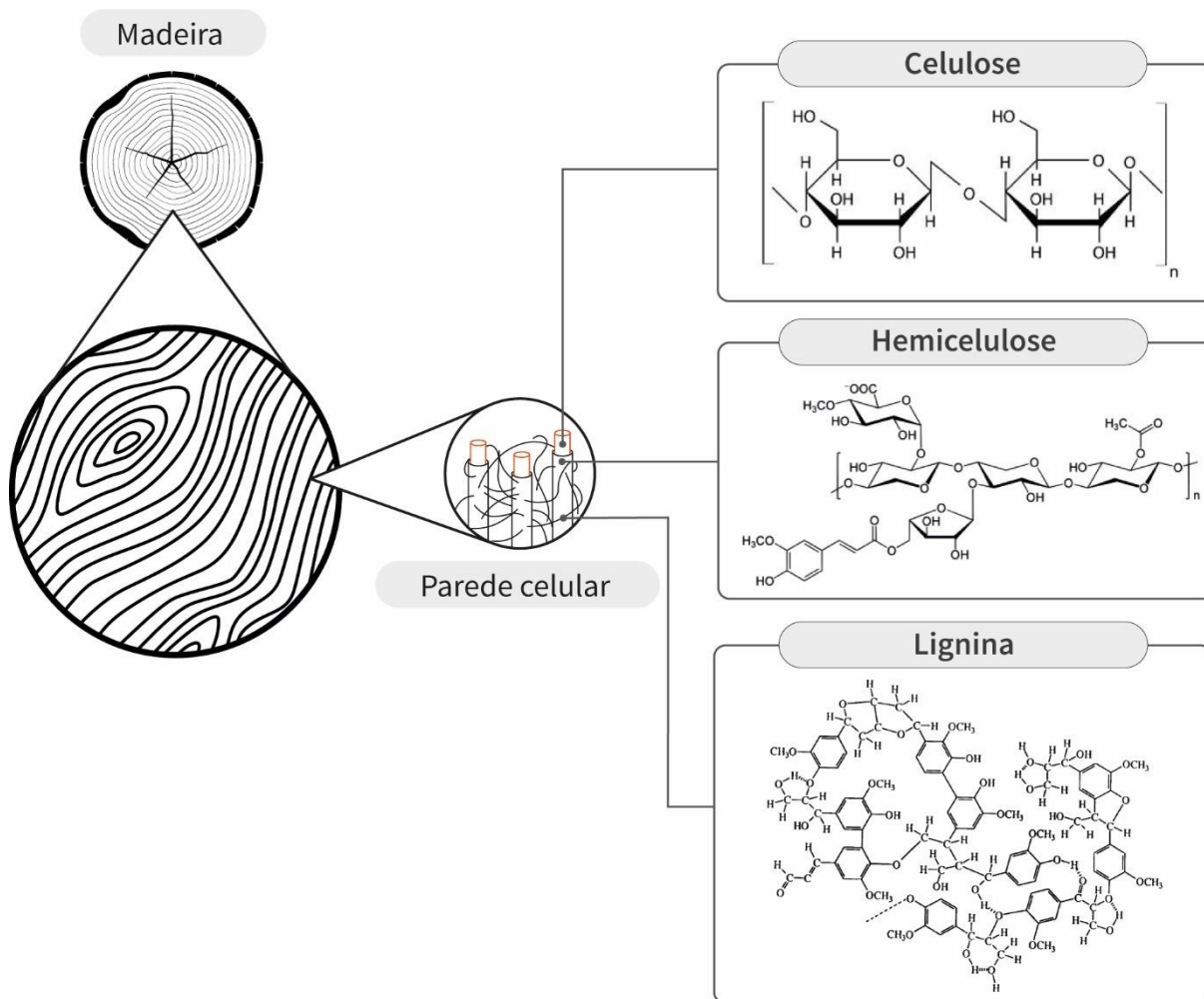
Por tratar-se de uma fibra vegetal, o Jupati apresenta características consideravelmente complexas. Existe uma variedade de compostos orgânicos que as constituem, como: ceras, ácidos graxos, gorduras, pectinas entre outros; no entanto, a celulose, hemicelulose e lignina são os três principais elementos que constituem as fibras vegetais, devido a isso, também podem ser chamadas de fibras celulósicas ou lignocelulósicas (PEREIRA *et al.*, 2015). Tais elementos serão discutidos no tópico 3.5 ao abordar a constituição da madeira.

3.5 MADEIRA TRANSPARENTE: UMA PROPOSTA PARA APLICAÇÕES MULTIFUNCIONAIS

A madeira é um dos materiais que desempenha papel importante na construção civil, devido a estrutura única e processo de crescimento natural que comporta (ZHU *et al.*, 2016b). Sua principal particularidade é a chamada anisotropia estrutural – uma propriedade única

caracterizada pelo alinhamento dos canais verticais através das células presentes na madeira, que possibilita o bombeamento dos íons e água para realização da fotossíntese e conferem ao material sua propriedade de baixa densidade, que está diretamente relacionada à sua origem polimérica (YADDANAPUDI *et al.*, 2017) (LI *et al.*, 2018a). Tais células são compostas principalmente de celulose – uma cadeia longa de moléculas de polissacarídeos com pelo menos 40-50% de glicose, que está presente na forma de fibrilas de alto módulo e resistência axiais –, envolta em uma matriz hidratada de hemicelulose e lignina (**Figura 23**) (LI *et al.* 2018a; YADDANAPUDI *et al.*, 2017). A composição química com as nanofibrilas de celulose confere alta resistência e estrutura hierárquica que corroboram para as propriedades da madeira como compósito natural com potencial de multifuncionalização (LI *et al.*, 2018a).

Figura 23 - Modelo esquemático da composição estrutural básica da madeira



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

As cadeias de celulose são montadas em fibrilas de 3 a 4 nm de diâmetro e tendem a formar agregados de maior escala na parede celular, sendo organizadas como fibras ocas com a espessura de alguns micrômetros orientadas na direção longitudinal, paralelas a haste da árvore (LI *et al.*, 2018a) (MOON *et al.*, 2011). A matriz da parede celular nativa é composta por uma mistura de hemicelulose e lignina, na qual a forte interação entre esses três componentes leva as propriedades mecânicas da madeira (ZHU *et al.*, 2016a) (LI *et al.*, 2018a). A hemicelulose é um heteropolissacarídeo amorfo responsável por aproximadamente 20 a 40% do peso da madeira, encontra-se associada à celulose e previne a sua aglomeração, além de conectar fisicamente suas fibrilas (LI *et al.*, 2018a). A lignina é um componente aromático rico em fenóis e proporciona rigidez às paredes celulares, distribuída principalmente na parede celular secundária, presente também em alta concentração na lamela média e nos cantos da parede celular além disso, é responsável por cerca de 25% da estrutura da madeira, atuando como uma espécie de “cola” unindo todas as suas células (JEREMIC *et al.*, 2014; AGARWALL, 2006; YADDANAPUDI *et al.*, 2017).

Desta forma, a estrutura porosa da madeira é extremamente complexa combinando micro, meso e macro poros, a qual sua organização em nanoescala da parede celular para um compósito de fibra de celulose nanoporosa, proporciona a oportunidade de desenvolvimento de projeto sob medida de materiais multifuncionais avançados à base de madeira tendo seu desempenho estrutural preservado (LV *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2016).

Construções ecologicamente corretas, voltadas a economia de energia, tornaram-se um grande atrativo sob o ponto de vista da sustentabilidade frente a crise energética e ambiental global. Com isso, a madeira transparente vem sendo foco regular de estudos devido ao seu potencial em diversas aplicações focadas nas suas propriedades ópticas que favorecem a economia de energia (LI *et al.*, 2016a; ZHU *et al.*, 2016a). Além de questões voltadas crise energética a transmissão de luz, o material também demonstra vantagens associadas ao fato de sua origem ser renovável, possuir baixa densidade ($1,2 \text{ g cm}^{-3}$), alta transmitância (acima de 80%), baixa condutividade térmica (inferior a $0,32 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), desempenho mecânico favorável com boa resistência ao impacto, além de grande potencial para multifuncionalização (LI *et al.* 2016a; ZHU *et al.*, 2016b; FINK, 1992).

Sabe-se que a madeira natural não é um material transparente na faixa espectral visível decorrente da sua forte absorção e dispersão da luz, o que proporciona um desafio para a ciência dos materiais. O nível de absorção de luz está diretamente associado à composição química da mesma, sendo necessário, para torná-la transparente, a eliminação tanto da absorção quanto do espalhamento (LI *et al.*, 2018b). Esses comportamentos ocorrem

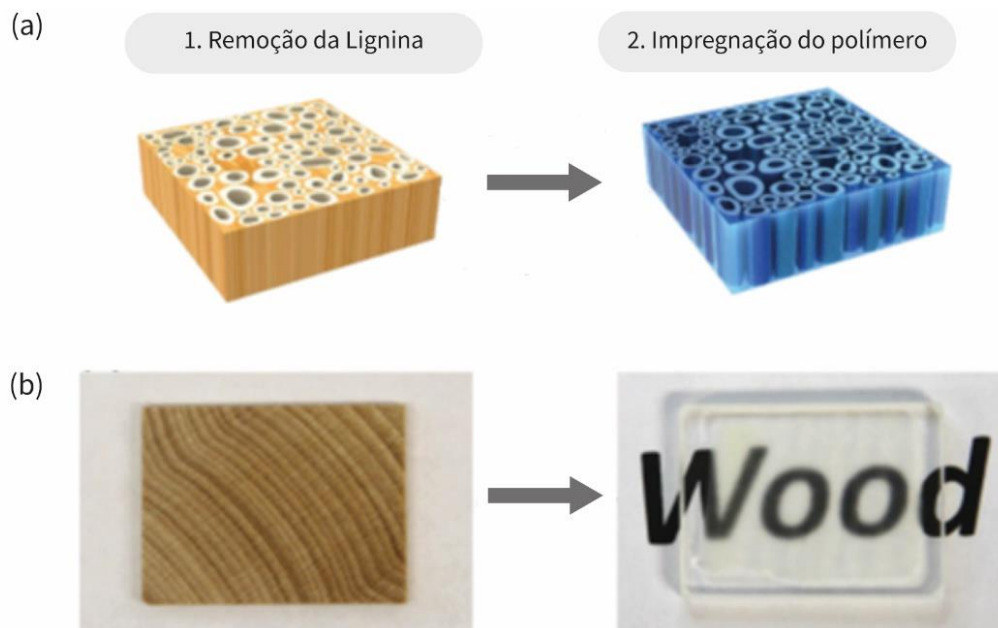
principalmente devido ao espaço de luz porosa no centro das células fibrosas que compõem a madeira, e pela lignina, taninos e outros compostos resinosos que absorvem a luz através de grupos cromóforos, sendo a lignina o principal componente que contribui para a coloração da madeira, responsável por cerca de 80-90% da absorção de luz na madeira (MULLER *et al.*, 2003).

Diferentemente da lignina, a celulose e a hemicelulose são incolores tornando a lignina o principal componente responsável pela característica não transparente da madeira (YADDANAPUDI *et al.*, 2017). Desta forma, uma alternativa para que a absorção de luz seja drasticamente reduzida é por meio de tratamento químico que remova o conteúdo de lignina, processo chamado de deslignificação (LI *et al.*, 2016a; FINK, 1992; ZHU *et al.*, 2016a; LI *et al.*, 2016b; YADDANAPUDI *et al.* 2017).

Fink (1992) realizou um tratamento com uma solução aquosa de hipoclorito de sódio a 5% no período de um a dois dias com o intuito de remover as substâncias coloridas da madeira, incluindo a lignina. Li *et al.* (2016b) realizaram a deslignificação utilizando clorito de sódio abaixo de 80°C por 6 horas, no qual o teor de lignina diminuiu de 25% em massa para menos de 3%. Zhu *et al.* (2016b) removeram a lignina tratando a madeira em solução fervente com hidróxido de sódio (NaOH) e sulfito de sódio (Na₂SO₃), em seguida realizaram um tratamento com peróxido de hidrogênio (H₂O₂) obtendo a redução no teor de lignina em massa para também menos de 3%.

Após o processo de remoção da lignina a amostra da madeira torna-se branca devido à dispersão da luz e à falta de absorção de luz da mesma (ZHU *et al.*, 2016b). Como a madeira consiste em fibras ocas com espaço celular na forma de “lúmen” formando estruturas mesoporosas, essa forte dispersão da luz ocorre nos limites entre os canais vazios celulares cheios de ar e a matéria nanocomposta sólida que compõem a parede celular (celulose, lignina residual e hemicelulose), causado pelo desajuste do índice de refração entre eles (LI *et al.*, 2018a). Com isso, vazios em microescala e nanoescala nas paredes celulares surgem devido a remoção da lignina, e para diminuir essa dispersão a partir da estrutura da madeira é possível impregnar polímeros com índice de refração correspondente ao da amostra da madeira (**Figura 24a**), dando origem a um compósito altamente transparente de madeira como mostrado na **Figura 24b** (LI *et al.*, 2018a; ZHU *et al.*, 2016b).

Figura 24 - a) Esquema das estruturas mesoporosas em madeira antes e depois da remoção da lignina e impregnação do polímero. b) Imagem da madeira que se tornou altamente transparente após duas etapas



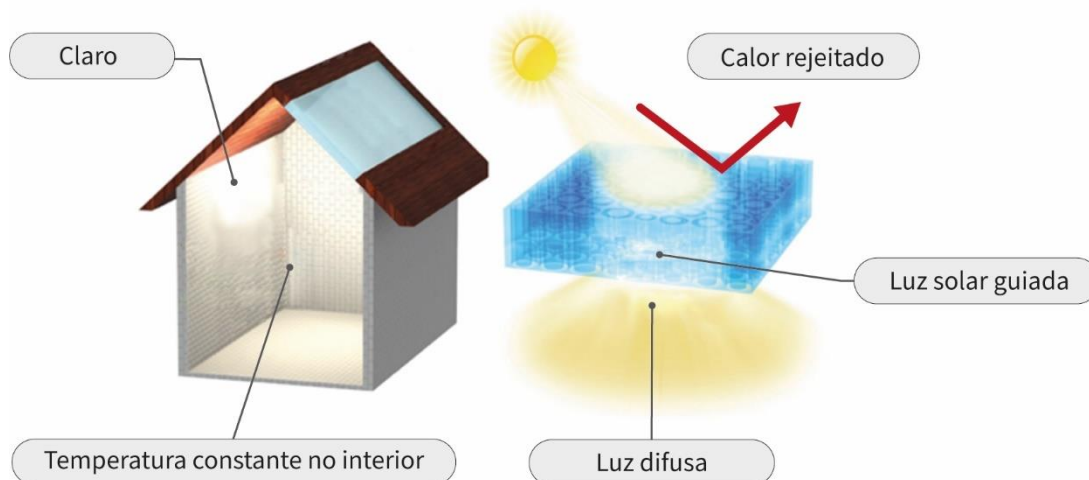
Fonte: Adaptado de ZHU *et al.*, 2016b.

Em resumo, a madeira transparente é obtida com a impregnação de um polímero em uma madeira deslignificada, onde ambos possuem índices de refração compatíveis, fornecendo desempenho óptico e melhoria de suas propriedades mecânicas (QIN *et al.*, 2018). Tais características são apreciáveis para diferentes áreas de aplicação, dentre elas incluem edifícios inteligentes, no qual a transmissão de luz pode ser projetada de forma que a luz artificial possa ser parcialmente substituída pela luz solar (LI *et al.*, 2018b).

Nesse contexto, Li *et al* (2016a) sugeriram que um telhado de madeira transparente pode fornecer uma iluminação mais uniforme e consistente durante o dia, além de proporcionar vantagens quando comparado ao vidro, pois painéis de construção do material proposto tem menos condutividade térmica, melhor resistência ao impacto e menor densidade.

Li *et al.* (2017) pontuam que o consumo de energia do sistema de iluminação pode ser parcialmente substituído pela luz solar, seja na aplicação em telhado ou janela constituído de madeira transparente. Uma residência, por exemplo, com telhado de madeira transparente pode alcançar uma condição de iluminação confortável e proporcionar uma temperatura ambiente mais constante, pois ela de forma eficiente colhe e guia a luz solar ao longo da direção de crescimento das células da madeira fazendo com que a luz transmitida seja largamente espalhada na direção frontal uniformizando também essa iluminação como ilustrado na **Figura 25** (LI *et al.*, 2016a).

Figura 25 - Um esboço de uma casa com telhado de madeira transparente para condições de iluminação confortáveis



Fonte: Adaptado de LI *et al.*, 2016a.

Segundo Fang *et al.* (2014), a alta névoa (do inglês *haze*) com amplos ângulos de dispersão é uma característica desejável para células solares, o que se justifica pelo fato da luz percorrer percursos mais longos na célula solar em razão ao fenômeno de dispersão de luz resultando no melhoramento da interação entre a onda de luz e o meio ativo, de modo que a melhor eficiência da célula solar se torne possível. A eficiência é melhorada em 18,02% no desempenho da célula solar quando a madeira transparente é posicionada no topo das células solares (ZHU *et al.* 2016a).

Além disso, quando a característica de alta névoa também é explorada, questões como privacidade do ambiente é preservada (YADDANAPUDI *et al.*, 2017). A baixa condutividade auxilia na diminuição das trocas de calor entre o ambiente externo e interno, reduzindo o consumo de energia no que se refere a sistemas de ar-condicionado e prolonga o conforto térmico do ambiente, fato salientado durante a troca de estações (LI *et al.*, 2017). A aplicação em projetos de design de móveis também se mostra interessante, no qual aspectos estéticos e funcionais são exigências da sociedade contemporânea, nesse sentido o material também apresenta grande potencial de atuação.

3.5.1 Fabricação da madeira transparente

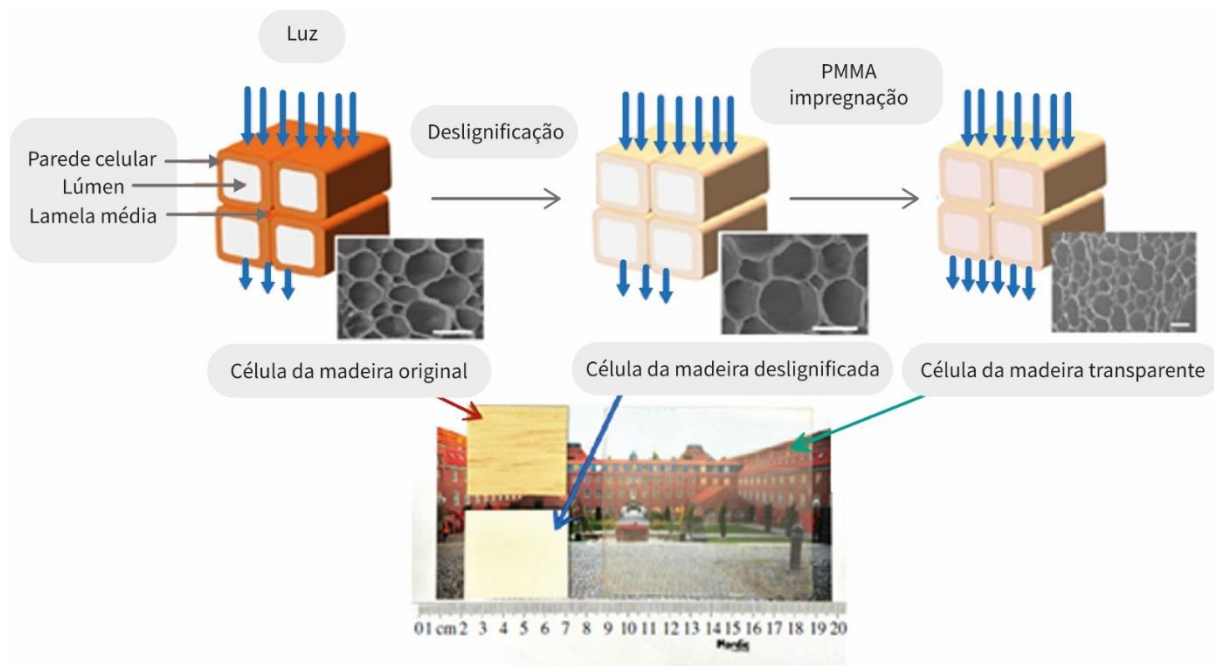
A madeira transparente é um exemplo de compósito de madeira multifuncional (LI *et al.*, 2018b). Segundo a literatura, o primeiro estudo acerca desse material foi realizado por Fink (1992) que primeiramente a preparou mantendo sua estrutura com o fim de realizar estudos relacionados à morfologia da madeira. Em seguida, sua utilização em engenharia de

materiais com aplicação da madeira transparente foi proposta por meio da combinação de seu desempenho mecânico e estudos de transmitância óptica (LI *et al.*, 2016a; ZHU *et al.*, 2016b). Com isso, diversos estudos subsequentes acerca de aplicações potenciais em edifícios inteligentes, ótica estrutural, entre outras foram apresentadas.

Para compreensão de como tais propriedades são preservadas e combinadas para fabricação desse material, uma revisão das fases experimentais para obtenção da madeira transparente foi apresentada no tópico a seguir com o intuito de sistematizar os avanços, desafios e métodos até então empregados.

As abordagens para preparação da madeira transparente estão baseadas primordialmente em duas etapas: 1) limpeza química por meio do processo de deslignificação da fibra e; 2) impregnação de um polímero com índice de refração correspondente ao substrato da madeira deslignificada, como ilustrado na **Figura 26** (FINK, 1992; LI *et al.*, 2016a; ZHU *et al.*, 2016b).

Figura 26 - Esboço mostrando a preparação de madeira transparente: deslignificação seguida por infiltração de polímero. Barras de escala nas imagens de MEV são 40 μ m

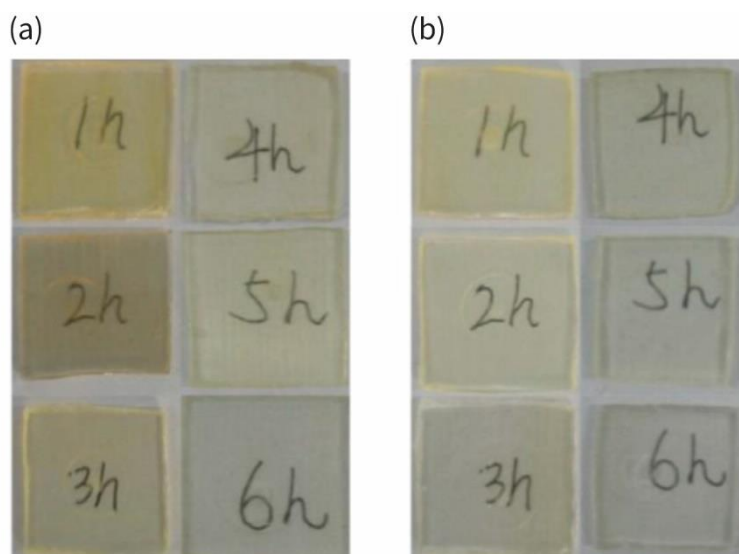


Fonte: Adaptado de LI *et al.*, 2018a.

Embora a produção de madeira transparente venha apresentando sucesso e notória evolução no seu processo de obtenção, ainda perduram desafios para melhoramento de suas propriedades ópticas e mecânicas e otimização dos métodos de produção (LI *et al.*, 2018b).

Qin *et al.* (2018) problematizam o processo de deslignificação ao que se refere a consumo de energia e a poluição do gás liberado, propondo a redução de tempo por meio do estudo de condições ótimas para o processo de deslignificação em dois estágios com posterior tratamento com H_2O_2 (**Figura 27**). Para o aumento da espessura é discutido também a madeira multicamada laminada com direção transversal (apresentou maior resistência mecânica) e direção axial (desempenho óptico melhorado quando comparado ao transversal).

Figura 27 - Madeira transparente de 1,0 mm tratada com $NaClO_2$ (1 h-6 h), depois lavada com duas soluções diferentes: a) água destilada e b) H_2O_2



Fonte: QIN *et al.*, 2018.

Li *et al.* (2018c) salientam o desafio para obtenção de madeira transparente espessa altamente transparente e justificam que a dificuldade se deve a presença de fissuras na interface causadas pelo descolamento entre o polímero utilizado na pesquisa analisada (PMMA) e a parede celular da madeira, bem como a incompatibilidade em índice de refração entre eles (1,49 para PMMA e 1,53 para holocelulose). Esse fenômeno de descolamento de interface se dá principalmente devido à baixa compatibilidade entre a parede celular da madeira, que é mais hidrofílica por natureza, e os polímeros impregnados que são de natureza hidrofóbica (GINDL-ALTMUTTER *et al.*, 2014; QUIN *et al.*, 2015). Além disso, outro fator é a contração de volume do polímero que ocorre durante o processo de polimerização, causando mais vazios na interface (BHAT *et al.*, 2019).

Uma estratégia comum para sanar problemas de compatibilidade é a manipulação da superfície (SAMSONINKOVA *et al.*, 2017; MISSOUM; BELGACEM; BRAS, 2013). A acetilação é um dos métodos que age de forma eficiente na hidrofobização da madeira ou

celulose de materiais lignocelulósicos. Sua ação consiste na redução da sensibilidade da madeira à umidade e aumento da compatibilidade com polímeros (HABIBI, 2014; SHEN; XIE; WANG, 2017). Para obtenção da madeira transparente, Li *et al.* (2018c) aplicaram o tratamento de acetilação na superfície de amostras de madeira deslignificadas previamente ao processo de impregnação do PMMA, o que levou à diminuição da descolagem da interface e à melhoria da transmitância óptica (**Figura 28**).

Figura 28 - A fotografia mostra a madeira transparente não acetilada (esquerda) e a madeira transparente acetilada (direita)



Fonte: LI *et al.*, 2018c.

Nesse contexto, estratégias para aperfeiçoamento entre as etapas básicas foram apresentadas para melhor interação durante todo o procedimento. Tais etapas primordiais consistem no processo químico (deslignificação) e físico (impregnação do polímero) que estão detalhadas a seguir.

[1] Deslignificação da fibra

O processo de deslignificação reduz a absorção de luz na madeira (visto que a lignina é responsável por 80% a 95% da absorção de luz), bem como a incompatibilidade do índice de refração na parede celular (LI *et al.*, 2018a). Fink (1992) realizou o tratamento da madeira com uma solução aquosa de NaClO_2 com 5% de concentração por 1-2 dias para remoção dos elementos coloridos, incluindo a lignina. Para a deslignificação proposta por Li *et al.* (2018c), NaClO_2 foi utilizado em solução tampão de CH_3COOH (pH4,6) a 80 °C e posterior lavagem com água deionizada. Qin *et al.* (2018), além desse processo, realizaram uma lavagem com H_2O_2 (5 mol L^{-1}) a 90°C com intuito de reduzir o amarelado presente nas amostras.

Zhu *et al.* (2016b) e Li *et al.* (2016a) prepararam a solução de remoção de lignina dissolvendo NaOH (2,5 mol L⁻¹) e Na₂SO₃ (0,4 mol L⁻¹) em água deionizada. Yaddanapudi *et al.* (2017) transferiram as amostras para a solução tampão de acetato as quais foram deixadas em repouso a 95°C durante 12 h. Wu *et al.* (2019) prepararam a solução por meio da mistura de 2% em massa de NaClO₂, 0,1% em massa de CH₃COOH e 97,9% em massa de água deionizada. Após os procedimentos de deslignificação, as amostras foram mantidas em meio aquoso de forma a manter os vazios preenchidos. Os reagentes utilizados nas abordagens discutidas foram sistematizados no **Quadro 2** separados pela sua função.

Quadro 2 - Levantamento dos reagentes utilizados no processo de deslignificação segundo a literatura

Reagentes utilizados	Objetivo
Hipoclorito de sódio - NaClO ₂	Solução para processo de branqueamento
Sulfito de sódio - Na ₂ SO ₃	Solução de remoção seletiva de lignina
Hidróxido de sódio - NaOH	Banho para remoção parcial da lignina da madeira e para solução tampão para processo de branqueamento
Peróxido de hidrogênio - H ₂ O ₂	Diminuição do tom amarelado das amostras
Ácido acético glacial - CH ₃ COOH	Solução tampão do branqueamento
Acetona	Usada no processo de acetilação/conservação das amostras em meio aquoso
Etanol	Usado no processo de acetilação/conservação das amostras em meio aquoso

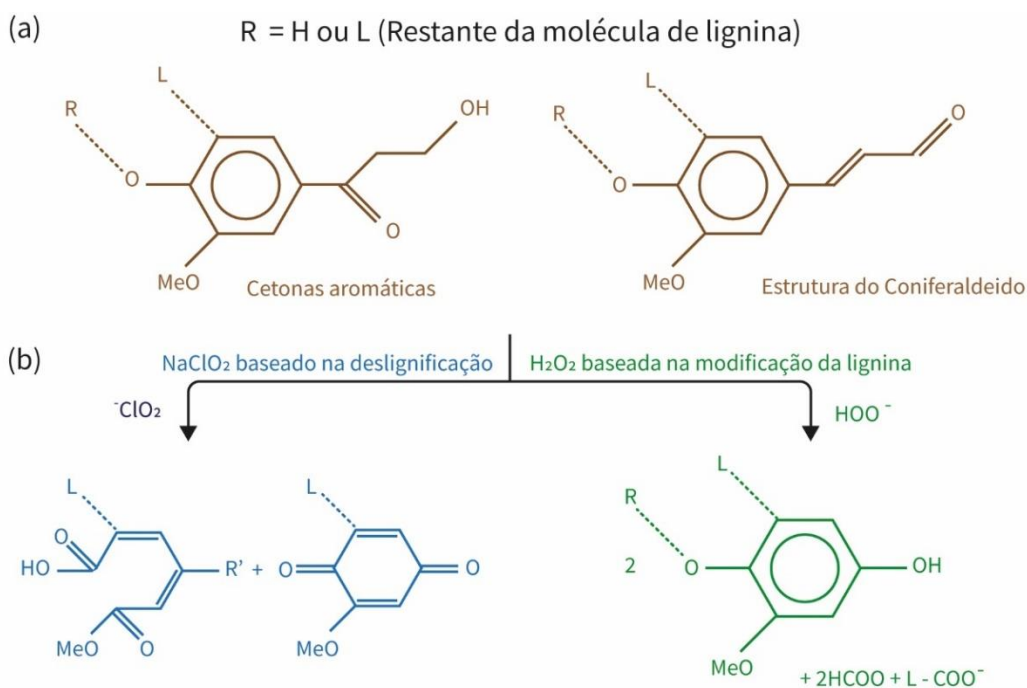
Fonte: Adaptado de Fink (1992); Li *et al.* (2018c); Yaddanapudi *et al.* (2017); Qin *et al.* (2018); Zhu *et al.* (2016); Li *et al.* (2016); Li *et al.* (2017) e Wu *et al.* (2019).

Contudo, é necessário salientar que a lignina é responsável por aproximadamente 30% da madeira, bem como ligações cruzadas com diferentes polissacarídeos que a compõem, conferindo a ela o suporte estrutural (SJOSTROM, 2013). Dessa forma, sua remoção danifica e enfraquece a estrutura da madeira, dificultando o seu manuseio e fabricação de grandes substratos.

A **Figura 29a** mostra duas estruturas comuns na lignina, coniferaldeído e cetonas aromáticas, contribuintes cruciais para a cor da madeira (CARTER, 1996). Em processos de deslignificação à base de NaClO₂, a estrutura aromática sofre reações de abertura do anel oxidativo para formar grupos ácidos, tornando assim a lignina mais solúvel em água (BAJPAI, 2012). Em contrapartida, Li e colaboradores (2017) relatam o tratamento alcalino

com H_2O_2 que remove ou reage seletivamente com as estruturas dos cromóforos, enquanto a lignina em massa é preservada. Tal método mostra-se atraente pelo seu caráter mais ambientalmente responsável, escalável industrialmente e detentor de resultados que preservam fortes efeitos de estabilidade de brilho na polpa da madeira (RAMOS; CALATRAVA; JIMÉNEZ, 2008). Ambas as reações estão mostradas na **Figura 29b**.

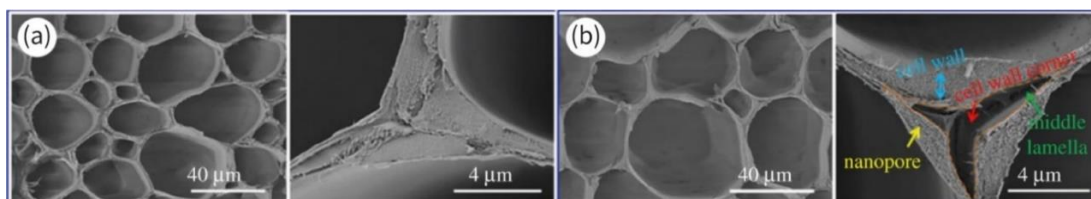
Figura 29 - a) Estruturas comuns na lignina: coniferaldeído e cetonas aromáticas e b) reações representativas da deslignificação da madeira por duas rotas (deslignificação baseada em NaClO_2 e tratamento alcalino com H_2O_2).



Fonte: Adaptado de Li et al. (2017).

A **Figura 30**, mostra imagens do microscópio eletrônico de varredura (MEV) da estrutura da parede celular antes e após a deslignificação, respectivamente, na seção transversal. O aumento da dispersão da luz dentro da parede é devido aos poros gerados com o processo de deslignificação, e é possível notar que ainda assim a estrutura da madeira permanece bem preservada após o procedimento. O MEV é uma das técnicas de microscopia eletrônica que, por meio de um feixe de elétrons de 3-50 kV, varre a superfície da amostra e é capaz de gerar imagem ampliada e tridimensional dessa superfície, contanto que esta não seja transparente aos elétrons, utiliza-se da maioria dos sinais gerados pela interação entre o feixe e o material analisado (GONÇALVES, 2007).

Figura 30 - a) Seção transversal original da madeira mostrando a estrutura celular da madeira b) Madeira deslignificada que suportam a presença de uma estrutura de madeira bem preservada e a geração de vazios em microescala e em escala nanométrica na parede celular



Fonte: LI *et al.*, 2018b.

Posteriormente Ao processo de deslignificação, a madeira deve ser mantida em meio aquoso para preservação até a etapa de impregnação do polímero (LI *et al.*, 2017). Yaddanapudi *et al.* (2017) lavaram as amostras com água deionizada e em seguida com etanol, uma solução de etanol e acetona, e acetona novamente para remoção de qualquer água restante, para em seguida armazená-las em etanol até o uso posterior. Li *et al.* (2018c) adotaram o processo de desidratação com etanol e em seguida aplicaram o processo de acetilação utilizando anidrido acético, piridina como catalisador e N-metil-2-pirrolidona como solvente. A madeira acetilada foi ainda tratada com NaClO. A preservação em etanol também foi adotada por Zhu *et al.* (2016b).

[2] Preparação da madeira transparente (impregnação do polímero)

O processo tem como propósito reduzir o contraste do índice de refração e obtenção de alta transmitância óptica. Para tal é necessário realizar a seleção adequada de polímeros transparentes com o índice de refração correspondente ao da parede celular (LI *et al.*, 2018a). Essa condição de compatibilidade também é influenciada pela espécie da madeira e eficiência no processo de deslignificação (FINK, 1992). Os polímeros aplicados em pesquisas encontradas na literatura estão listados no **Quadro 3** com seus respectivos índices de refração.

Quadro 3 - Lista de polímeros utilizados para obtenção de madeira transparente segundo a literatura com seus respectivos índices de refração

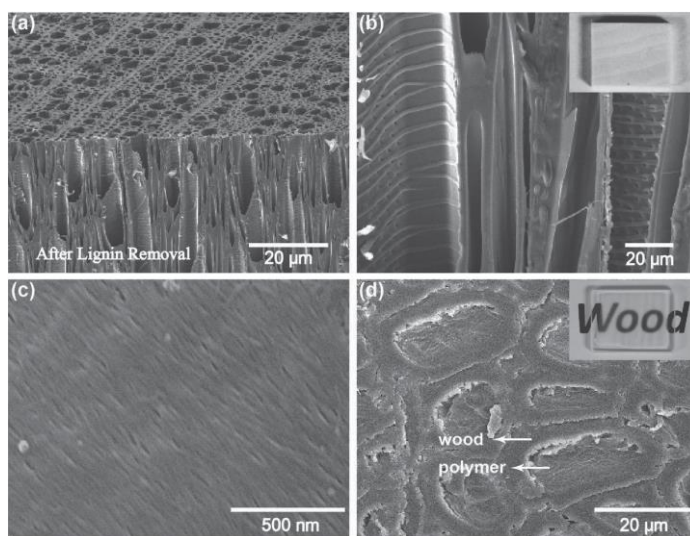
Polímero	Índice de refração
Poli(metacrilato de metila) (PMMA)	Aprox. 1,49
Resina epóxi	Aprox. 1,5
Polivinilpirrolidona (PVP)	Aprox. 1,53
Poli(n-metacrilato de butila) (BMA)	1,50
Poliestireno (PS)	1,59
Poli(metacrilato de isobornilo) (IBOMA)	1,48-1,50

Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2018a).

Dentre as características dos polímeros que influenciam a preparação e as propriedades da madeira transparente, além do índice de refração, pode-se citar sua viscosidade, compatibilidade com a parede celular, contração durante o processo de polimerização, entre outros, fazendo com que sua seleção seja de vital importância (Li *et al.*, 2018a).

Li *et al.* (2017) realizaram a impregnação na madeira deslignificada por meio do processo de impregnação à vácuo em solução de PMMA pré-polimerizado, posteriormente a madeira impregnada foi ensanduichada entre duas lâminas de vidro, embaladas em papel alumínio e a polimerização foi realizada em uma estufa a 75°C por 4 horas. Wu *et al.* (2019) submeteu a madeira deslignificada a uma solução mista de MMA pré-polimerizado resfriada a vácuo por 30 min, em seguida desligou a bomba de vácuo para o processo de impregnação seguir ainda por 60 min, em seguida, assim como Li *et al.* (2017), a amostra impregnada foi comprimida entre placas de vidro e envolvida com o papel alumínio e aquecida. Yaddanapudi *et al.* (2017) finalizaram seu processo de impregnação seguindo o mesmo método de tratamento com as placas de vidro e o papel alumínio, no entanto no processo de impregnação à vácuo o fez durante uma hora com três repetições. Segundo Zhu *et al.* (2016b), e como demonstrado na imagem de MEV correspondente a **Figura 31**, o polímero pode de fato preencher completamente os poros da madeira por meio do processo de impregnação a vácuo discutido.

Figura 31 - a) MEV de um bloco de madeira deslignificado b) MEV aproximada ressaltando as mesoestruturas da madeira onde alguns poros na direção radial são perceptíveis c) Nanofibras de celulose alinhadas, presentes na parede dos canais microssaturados. d) Compósito da madeira com enchimento de polímero.



Fonte: ZHU *et al.*, 2016b.

No seu sentido amplo, o processo de fabricação da madeira transparente segue uma metodologia base com variações que permeiam o tipo de madeira e a aplicação pretendida para o material, o que influencia diretamente as propriedades esperadas para tal. Um levantamento bibliográfico com intuito de sistematizar o processo completo de obtenção da madeira transparente de forma mais detalhada, no que concerne a: etapas, materiais e métodos; segundo a literatura esta apresentado no **Quadro 4**.

Quadro 4 - Sistematização do processo de obtenção da madeira transparente segundo a literatura

Título: Em direção à madeira transparente com centímetro de espessura por meio da manipulação de interface.	
Autor	Li <i>et al.</i> , 2018c.
Etapas	1. Deslignificação de Clorito de Sódio; 2. Acetilação da madeira; 3. Preparação da madeira transparente.
Métodos	1. Clorito de sódio (NaClO_2) em solução tampão de ácido acético (pH 4,6) a 80°C, seguida de lavagem com água deionizada; 2. Desidratação com etanol e acetona sequencialmente, seguida do processo de acetilação utilizando anidrido acético com piridina como catalisador e N-metil-2-pirrolidona como o solvente. A madeira acetilada ainda passou por tratamento com hipoclorito de sódio (NaClO); 3. A madeira foi desidratada com etanol e acetona sequencialmente, posteriormente o monômero MMA foi pré-polimerizado a 75 °C durante 15 min com 0,3% em massa de 2,20'-azobis (2-metilpropionitrilo) (AIBN) como iniciador seguido da impregnação. A amostra impregnada com MMA pré-polimerizado foi comprimida entre duas lâminas de vidro, acondicionada em papel alumínio, e curada em estufa a 70 °C por 4 h (para madeira mais

	espessa e transparente, a cura foi realizada a 50°C por 24 h).
Título: Fabricação e caracterização de madeira transparente para aplicações na próxima geração de construções inteligentes.	
Autor	Yaddanapudi <i>et al.</i> , 2017.
Etapas	1. Branqueamento da fibra; 2. Lavagem com acetona e etanol; 3. Impregnação com por infiltração à vácuo.
Métodos	1. As amostras de madeira foram enxaguadas com água e transferidas para um forno de caixa para desidratação a 120°C por 24 h. Já desidratadas as amostras foram transferidas para uma solução tampão de acetado e deixadas em repouso a 95°C durante 12 horas; 2. As amostras foram lavadas com água deionizada e posteriormente lavadas com etanol, uma solução de etanol e acetona, e acetona mais uma vez para remover qualquer água restante. As amostras foram armazenadas em etanol até uso posterior; 3. As amostras de madeira deslignificada foram impregnadas com poli (metacrilado de metila) (PMMA) por infiltração à vácuo durante uma hora com três repetições. A madeira impregnada foi colocada entre lâminas de vidro envoltas em alumínio para tratamento térmico (forno a 85°C por 12 h).
Título: Otimização do processo de deslignificação para preparação eficiente de madeiras transparentes de alta resistência e alta transmitância.	
Autor	Qin <i>et al.</i> , 2018.
Etapas	1. Determinação de lignina e estrato; 2. Deslignificação; 3. Fabricação de madeira transparente de camada única; 4. Fabricação de madeira transparente multicamada.
Métodos	1. As frações de massa de lignina foram determinadas por meio de métodos de técnicas microanalíticas; 2. Clorito de sódio a 80 °C (NaClO₂, 1% em massa) em uma solução tampão de acetato (pH 4,6) foi usado durante o processo de deslignificação, uma fatia foi removida a cada hora. Após a deslignificação, as madeiras foram cuidadosamente lavadas com água deionizada ou peróxido de hidrogênio (H₂O₂, 5 mol L⁻¹) a 90 °C. O teor de lignina foi medido para avaliar o efeito que a lignina teve na transmitância; 3. De forma a melhorar a permeabilidade da madeira deslignificada foi usado etanol para substituir a água presente nas amostras. A proporção de massa de resina epóxi para acetona para agente de cura foi de 3:3:1. Após as amostras estarem completamente dissolvidas, as madeiras deslignificadas (vários tempos de tratamento de NaClO₂, variando entre 1 h - 6 h) foi colocado no fundo do recipiente, imersos em uma solução de resina epóxi, e incubados em um dessecador a vácuo com uma pressão de 1000 Pa por 2 h para garantir impregnação total. A madeira foi enrolada com papel de silicone e colocada em uma placa de Petri e depois seca naturalmente à pressão atmosférica por 12h. 4. Os folheados deslignificados multicamadas impregnados foram colocados na mesma direção e direção transversal para preparar a madeira transparente multicamadas sob vácuo. A madeira transparente multicamadas foi ensanduichada entre duas lâminas de vidro e seca naturalmente. A estrutura porosa e a espessura da madeira foram retidas por impregnação a vácuo.
Título: Compósito de madeira altamente anisotrópicos e altamente transparentes.	

Autor	Zhu <i>et al.</i> , 2016b.
Etapas	1. Remoção de lignina; 2. Infiltração polimérica.
Métodos	1. A solução de remoção de lignina foi preparada dissolvendo-se NaOH (2,5 mol L⁻¹) e Na₂SO₃ (0,4 mol L⁻¹) em água deionizada. As fatias de madeira foram imersas na solução de remoção de lignina e mantidas em ebulição por 12 h. Seguido de enxágue em água destilada quente três vezes para remover a maioria dos produtos químicos. Os blocos de madeira foram então colocados na solução de branqueamento (H₂O₂, 2,5 mol L⁻¹ em água deionizada) e mantidos e ferver sem agitação. Quando a cor amarela da amostra desapareceu, as amostras foram removidas e enxaguadas com água fria. As amostras deslignificadas foram preservadas em etanol. 2. A resina epóxi foi preparada misturando os dois componentes líquidos (resina e endurecedor cicloalifático não abrasivo) numa proporção de 2:1. Então a madeira deslignificada foi colocada no fundo de uma placa e imersa na resina líquida. A solução foi então desgaseificada sob 200 Pa para remover o solvente de gás e etanol em madeira. Aproximadamente 5 min depois, o vácuo foi liberado para permitir que a estrutura de madeira se impregnasse com a resina por pressão atmosférica (processo repetido três vezes). Todos os processos citados nessa etapa foram concluídos dentro de 30 min para evitar a solidificação do polímero. Por fim, o prato contendo a amostra de madeira e resina foi mantido estático a 30 °C por 12 h. A amostra de madeira impregnada com a resina foi removida do prato depois da resina estar completamente solidificada.
Título: Madeira opticamente transparente de um molde celulósico nanoporoso: combinando desempenho funcional e estrutural.	
Autor	Li <i>et al.</i> , 2016b.
Etapas	1. Lignina da madeira seletivamente removida; 2. Imersão em H₂O₂ para remoção do amarelado; 3. Imersão em resina epóxi líquida.
Métodos	1. A lignina da madeira foi seletivamente removida por imersão da madeira em uma solução de NaOH em ebulição diluída (2,5 mol L⁻¹, em água deionizada) e Na₂SO₃ (0,4 mol L⁻¹, em água deionizada) por 3 h. 2. Em seguida a amostra foi imersa em H₂O₂ em ebulição (2,5 mol L⁻¹, em água deionizada) solução por 2 a 3 h até que a cor amarela da madeira tenha desaparecido completamente. 3. A madeira branca resultante foi subsequentemente imersa na resina epóxi líquida preparada como para infiltração completa. O compósito de madeira transparente foi obtido após uma solidificação completa de epóxi.
Título: Madeira Transparente que retém lignina.	
Autor	Li <i>et al.</i> , 2017.
Etapas	1. Modificação da lignina; 2. Deslignificação com Clorito de Sódio; 3. Preparação da madeira transparente.
Métodos	1. A solução de modificação de lignina foi preparada misturando produtos químicos na seguinte ordem: água deionizada, silicato de sódio (3% em peso), solução de hidróxido de sódio (3% em peso), sulfato de magnésio (0,1% em peso), DTPA (0,1% em peso), e depois H₂O₂ (4% em peso). Os substratos de madeira foram submersos na solução de modificação de lignina a 70 °C

	até a madeira se tornar branca. As amostras foram então cuidadosamente lavadas com água deionizada e mantidas em água até à utilização. 2. A deslignificação foi realizada de acordo com nosso trabalho anterior. A madeira foi deslignificada usando 1% em peso de clorito de sódio (NaClO_2) em solução tampão de acetato (pH 4,6) a 80 ° C. A reação continuou até que a madeira ficasse totalmente branca. As amostras deslignificadas foram cuidadosamente lavadas com água deionizada e mantidas em água até uso posterior. 3. As amostras de madeira foram desidratadas com etanol e acetona sequencialmente. Cada passo de troca de solvente foi repetido três vezes. O MMA foi pré-polimerizado antes da infiltração para remover o oxigênio dissolvido. A pré-polimerização foi realizada a 75 ° C durante 15 min com 0,3% em massa de 2,2'-azobis (2- metilpropionitrila) (AIBN) como iniciador e a solução foi então resfriada até à temperatura ambiente. Subsequentemente, a amostra de madeira deslignificada ou branqueada foi totalmente impregnada a vácuo com a solução de PMMA pré-polimerizado. Finalmente, a madeira impregnada foi comprimida entre duas lâminas de vidro, embaladas em papel alumínio, e a polimerização foi realizada em estufa a 75 ° C por 4 horas. A madeira transparente luminescente foi preparada de acordo com a literatura. Resumidamente, primeiramente os pontos quânticos foram misturados com PMMA pré-polimerizado, então a amostra de madeira sem lignina foi totalmente impregnada a vácuo com a solução pré-polimerizada de PMMA em um dessecador sob vácuo. Finalmente, a madeira impregnada foi comprimida entre duas lâminas de vidro, envolta com papel alumínio, e aquecida a 70 ° C por 4 h para completar a polimerização.
Título: Impacto da deslignificação nas propriedades morfológicas, ópticas e mecânicas da madeira transparente.	
Autor	Wu <i>et al.</i> , 2019.
Etapas	1. Desidratação; 2. Deslignificação; 3. Impregnação do polímero.
Métodos	1. A madeira natural foi desidratada a 103°C por 24 h antes da extração química. 2. A solução de deslignificação foi preparada através da mistura de 2% em massa de NaClO_2, 0,1% em massa de ácido acético glacial e 97,9% em massa de água ultrapura. As amostras nanométricas secas foram submersas na solução de deslignificação em um oscilador de banho-maria a 80°C com frequência de oscilação de 40 rpm. Os cinco níveis de madeira deslignificada foram obtidos através do ajuste do tempo de tratamento. As amostras de NW e DW foram cuidadosamente lavadas com água ultrapura e depois mantidas em etanol. 3. O MMA foi lavado com solução de NaOH a 5% em massa, seguido de lavagem repetida com água ultrapura até ficar incolor. A solução do monômero MMA juntamente com o iniciador AIBN foi pré-polimerizado em monômero de MMA puro com sonicação, em seguida aquecendo a solução mista de AIBN e MMA a 75°C durante 15 min, finalmente resfriando a solução misturada a temperatura ambiente utilizando um banho de gelo. O teor de iniciador foi de 0,5% em massa sobre a massa de MMA puro. As amostras de NW e DW foram então submetidas à solução mista de MMA pré-polimerizada resfriada em ambiente de vácuo por 30 min, seguido por desligamento da bomba de vácuo para continuar o processo de impregnação por 60 min. Uma amostra de madeira impregnada foi comprimida entre dois pedaços de vidro e envolvida com folha de alumínio, depois aquecida a 70°C por 5 h.

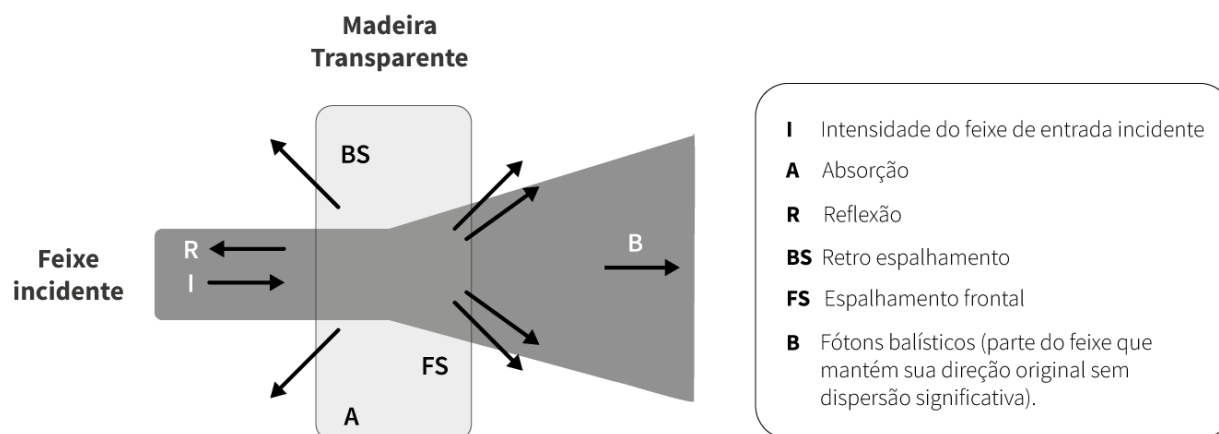
Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2018c); Yaddanapudi *et al.* (2017); Qin *et al.* (2018); Zhu *et al.* (2016b); Li *et al.* (2016b); Li *et al.* (2017) e Wu *et al.* (2019).

As propriedades apreciáveis do compósito transparente para a aplicação em design de ambientes dependem de técnicas de medição específicas que as contemplem, para tal, tais propriedades e suas respectivas técnicas de medição estão discutidas nos tópicos a seguir.

3.5.2 Propriedades ópticas da madeira transparente

Os processos que ocorrem no momento da interação da luz com a madeira transparente estão esquematicamente ilustrados na **Figura 32**. O feixe ótico ao percorrê-la, perde parte de sua energia e altera sua estrutura em razão de fatores como: 1) Reflexão posterior nos planos frontal e posterior (R); 2) Espalhamento dentro do material (espalhamento para frente e para trás, EF e RE, respectivamente, representada na **Figura 32** e; 3) Absorção (A) no interior do material. Tais processos estão diretamente associados aos parâmetros físicos do material, sendo eles: qualidade da interface entre os materiais, incompatibilidade do índice de refração entre madeira e polímero infiltrado, presença de vazios e a estrutura anisotrópica; no que se refere a elementos que contribuem para dispersão da luz, pode-se citar os absorvedores residuais da madeira original e do polímero impregnado (LI et al., 2018a).

Figura 32 - Esboço esquemático mostrando a propagação da luz através da madeira transparente dentro de um feixe de entrada de intensidade incidente



Fonte: Adaptado de LI et al., 2018a.

Com relação à **Figura 32**, o meio circundante é o ar, e todos os valores são dados em porcentagem, enquanto a intensidade do incidente é tomada como 100% (LI et al., 2018a). Dos aspectos que são de especial relevância na caracterização das propriedades ópticas da madeira transparente, se pode citar: transmitância e a névoa (*haze*).

A transmitância (T) envolve a medida das perdas de transporte de energia, que incluem absorção e dispersão. Fisicamente, se refere à quantidade total de energia luminosa transportada através da amostra e dela para frente, tanto a luz difusa como parte do feixe sem perturbação perceptível, ou seja, se trata da energia do feixe de entrada subtraída pela reflexão, absorção e dispersão (LI et al., 2018a). A relação entre essas grandezas é estabelecida pela equação 6.

$$T = B + FS = I - A - R - BS \quad (6)$$

A opacidade (*haze*) corresponde a perda de conteúdo de informação/imagem. Segundo Li et al. (2018a), a opacidade é descrita pela quantidade relativa de luz dispersa ou difundida para frente (subtraída pela parte do feixe que permanece na sua direção original, representado por B na figura 32) que resulta na diminuição do contraste da imagem vista através do material. Seu valor pode ser definido por:

$$H (Haze) \approx \frac{FS}{T}$$

Resultados experimentais de medida de transmitância e de opacidade

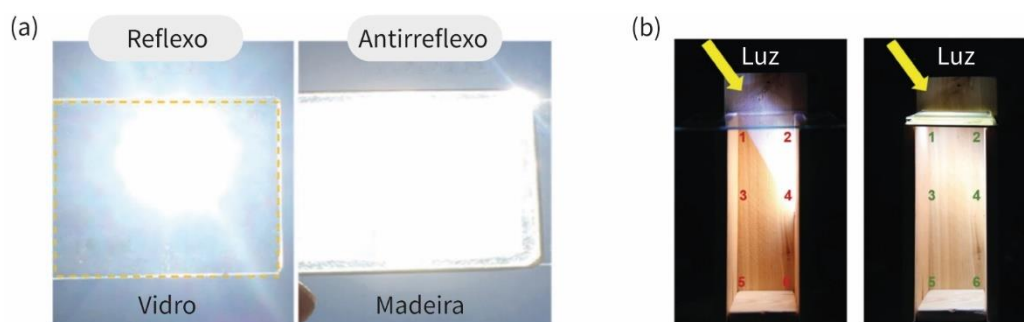
No contexto dos resultados experimentais, de forma geral, a transmitância da madeira transparente é elevada nas regiões de luz visível e próxima do infravermelho, esse fato se dá pela absorção muito limitada de radiação pelos componentes residuais absorvedores de luz na estrutura (LI et al., 2018a). Assim como a quantidade de lignina residual influencia na absorção, a transmitância também depende de aspectos diversos, como o tipo de madeira, fração de volume de celulose, orientação de fibras de celulose e espessura da amostra (ZHU et al., 2016b; LI et al., 2017; LI et al., 2016b).

A alta opacidade que a madeira transparente exhibe é devido a dispersão da luz interna devido ao desajuste do índice de refração entre a matriz da madeira e o polímero impregnado, bem como à interface madeira/polímero descolar as lacunas dentro do material (LI et al., 2018a). Geralmente, o espalhamento mais acentuado implica uma transmissão mais baixa, no entanto, há casos de madeira transparente em que uma combinação única de alta transmitância (até 90%) bem como alta opacidade (até 90%) é realizada (LI et al., 2016a; ZHU et al., 2016a; ZHU et al., 2016b; LI et al., 2017). Tal combinação faz com que a madeira transparente se torne uma candidata com grande potencial como camada estrutural “difusa de

luz” para células solares, sistemas de iluminação e edificação (com função equivalente ao vidro fosco) (LI *et al.*, 2018a).

Ao que se refere a aplicações diárias, a madeira transparente fornece um efeito antirreflexo de forma eficaz. Quando se olha através do compósito transparente, o brilho é removido e obtém-se um brilho mais uniforme, como apresenta Li *et al.* (2016a) na **Figura 33a**. O desempenho lumínico também foi comparado pelos autores com o vidro de cal sodada e a madeira transparente (respectivamente na **Figura 33b**), foi utilizado um telhado para captação da luz em um modelo de casa propositalmente alta para melhor visualização do comportamento da luz em ambos os materiais, por meio da imagem é possível observar a iluminação interna uniforme quando utilizada o compósito transparente.

Figura 33 - a) Evidência fotográfica do efeito ofuscante problemático com o vidro em comparação com a iluminação uniforme e confortável através da madeira transparente. b) Evidência fotográfica da distribuição uniforme da luz no interior do modelo da casa ao usar a madeira transparente como telhado com luz natural em comparação com o uso de vidro



Fonte: Adaptado de LI *et al.*, 2016a.

Quando comparado ao telhado de vidro, a alta névoa (*haze*) e transparência da madeira beneficiada resultaram na captação da luz maximizada do que seria um edifício e em uma maior distribuição da luz, que mantêm-se consideravelmente consistente ao longo do dia (LI *et al.*, 2016a).

Para caráter de caracterização, ao que se refere a propriedades ópticas voltadas a grau de transparência do compósito, esta foi obtida por meio da escala RGB captada com o uso do colorímetro nas amostras e calculada a partir da relação entre cor, a transmitância e a refletância do material analisado. A metodologia aplicada está detalhada no tópico 4.4.4.

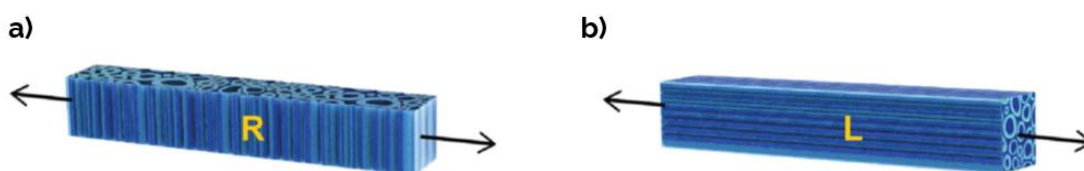
3.5.3 Propriedades mecânicas da madeira transparente

A expectativa de melhoramento das propriedades mecânicas da madeira transparente em comparação ao polímero infiltrado puro, está diretamente associado ao fato de que tais propriedades são determinadas pelas contribuições combinadas do molde da madeira, a fase

do polímero impregnado, bem como as propriedades de ligação interfacial entre o molde das duas fases do compósito (LI *et al.*, 2018a).

Conforme discutido, as propriedades mecânicas da madeira são dominadas em função do conteúdo de celulose, e a orientação geométrica intrínseca da estrutura celular da fibra da madeira (EICHHORN *et al.*, 2010; ZHU *et al.*, 2016b). As nanofibras de celulose são preferencialmente orientadas na direção longitudinal as células tubulares da madeira, condição essa que favorece a característica de anisotropia mecânica visada (**Figura 34**) (LI *et al.*, 2018a).

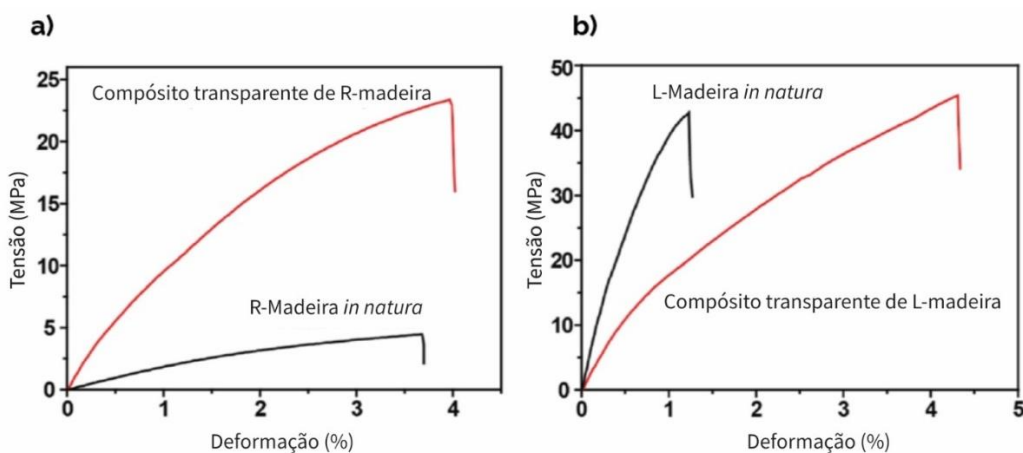
Figura 34 - a, b) Esquema ilustrado dos testes mecânicos para madeira no sentido radial (R) e longitudinal (L) transparente respectivamente



Fonte: ZHU *et al.*, 2016b.

Zhu *et al.* (2016b) dissertaram acerca da análise da influência do sentido da fibra nos resultados dos testes mecânicos, concluíram desta forma que as propriedades mecânicas da madeira transparente na direção longitudinal ($E = 2,37$ GPa e $\sigma = 45,38$ MPa) são cerca de duas vezes mais altas que aquelas perpendiculares à direção longitudinal ($E = 1,22$ GPa e $\sigma = 23,38$ MPa) (**Figura 35**).

Figura 35 - Curvas de tensão-deformação para a madeira nativa e madeira transparente: a) direção longitudinal e b) na direção transversal

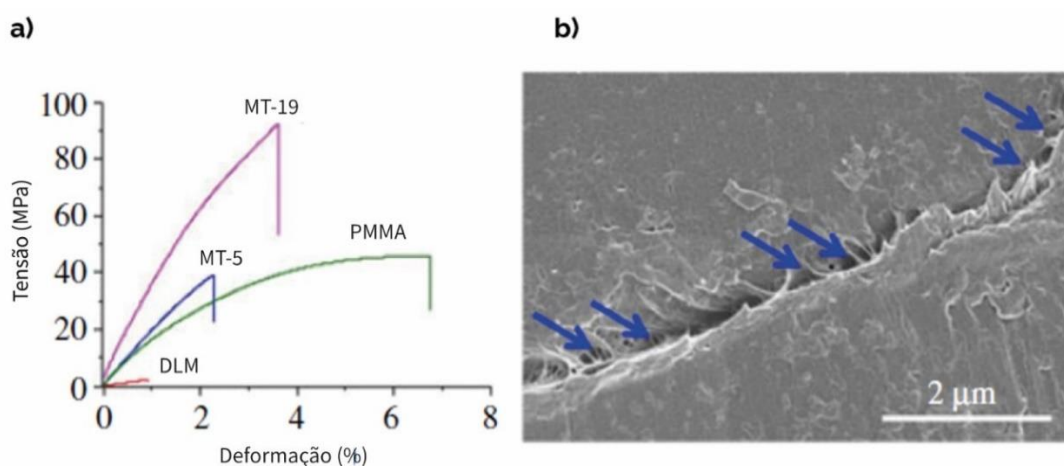


Fonte: ZHU *et al.*, 2016b.

A partir dos gráficos representados pela figura 35, é possível ressaltar que a relação de anisotropia das propriedades longitudinais para radiais é reduzida para madeira transparente, com isso, conclui-se que as propriedades fracas na direção transversal da madeira estão em função dos efeitos de flexão da parede celular, questão que pode ser suprimida pela presença do polímero no espaço do lúmen (LI *et al.*, 2018a).

O principal componente que confere suporte de carga na madeira são as nanofibras de celulose, quando a interação é favorável entre ela e o polímero infiltrado, tais propriedades são favorecidas (LI *et al.*, 2016b) (**Figuras 36a e 36b**).

Figura 36 - a) Curvas de tensão-deformação em tensão uniaxial para madeira transparente (MT) com fração volumétrica $V_f=0,19$ (MT-19) e $V_f=0,05$ (MT-5), madeira deslignificada (DLM) e PMMA; b) Imagem de MEV da madeira transparente mostrando a natureza nanofibrosa da região da parede celular e sinais de ligação interfacial favorável com PMMA na interface PMMA-madeira



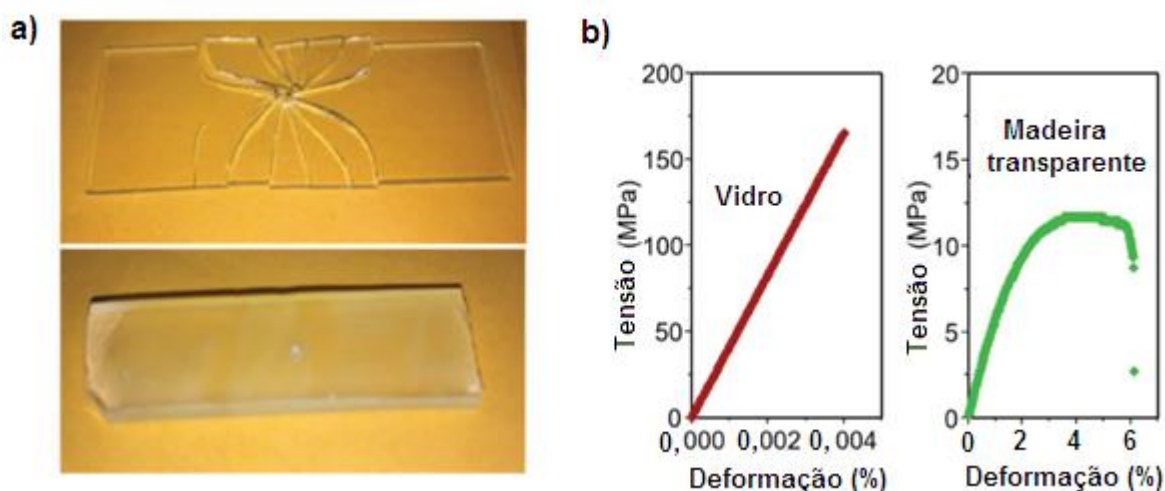
Fonte: LI *et al.*, 2016b.

É notório que a madeira nativa não é referência completa para a madeira transparente no que concerne às propriedades mecânicas, pelo fato de que há uma etapa de pré tratamento químico (deslignificação), com isso, a madeira em seu estado natural apresenta uma estrutura de parede celular mais favorável para tais desempenhos (LI *et al.*, 2018b).

Dentre as vantagens conferidas à madeira transparente em aplicações estruturais inclui-se sua tenacidade a fratura, que é maior do que para materiais frágeis como o vidro, propriedade esta que proporciona a ela a característica de não se romper de maneira desfavorável a segurança (LI *et al.*, 2017). O alto trabalho de fratura é resposta principalmente devido às propriedades intrínsecas do polímero infiltrado, a complexa estrutura hierárquica da madeira, bem como os efeitos do compósito na forma de novos atributos agregados com a interação (LI *et al.*, 2018a). Li *et al.* (2016a) ao realizarem testes de impacto na madeira

transparente obtiveram como resultado a tenacidade favorável quando comparado ao vidro (**Figura 37a**). A **Figura 37b** apresenta os gráficos comparativos entre a madeira transparente e o vidro no que se refere à tensão dos materiais, o vidro mostrou-se altamente frágil, enquanto que o compósito de madeira transparente se mostrou dúctil atingindo um nível de tensão duas ordens maior do que o vidro antes de quebrar.

Figura 37 - a) O teste de impacto de uma peça de vidro padrão e um compósito de madeira transparente de espessura semelhante. O vidro quebra no impacto repentino (foto superior), enquanto a madeira transparente mostra apenas um dente na superfície (foto inferior) b) A curva de tensão-deformação da madeira transparente em comparação com o vidro.



Fonte: LI *et al.* (2016a).

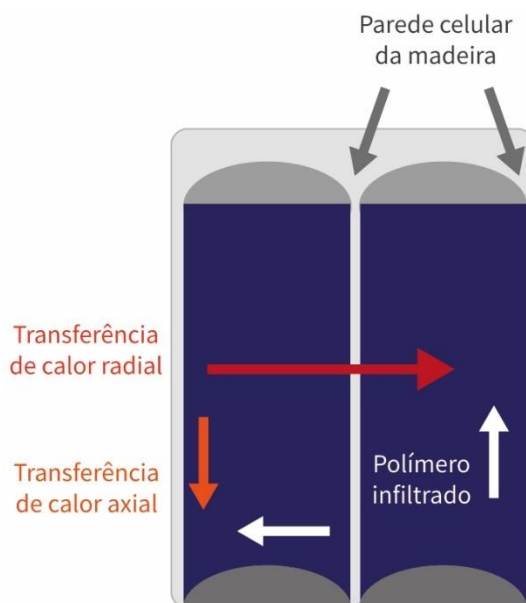
Tais desempenhos indicam o potencial da madeira transparente em aplicações onde essas propriedades são importantes. Espera-se como resultado, devido à forte ligação de hidrogênio que é formada entre o polímero e os grupos hidroxila na celulose por meio das paredes celulares, que tal fator melhore significativamente tanto a dureza quanto a sua tenacidade (YADDANAPUDI *et al.*, 2017).

3.5.4 Propriedades térmicas da madeira transparente

A característica térmica anisotrópica da madeira transparente está associada ao alinhamento das células da madeira, que permanecem bem preservadas após a remoção da lignina e a impregnação do polímero. Li *et al.* (2016a), apresentaram uma madeira transparente com excelente isolamento térmico cujo valor da condutividade térmica ficou em torno de $0,32 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ao longo da direção de crescimento da madeira e $0,15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ no plano transversal. Tais valores, em comparação ao vidro ($\approx 1,0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), mostraram-se consideravelmente menores. Ainda segundo os autores, como ilustrado na **Figura 38**, o

compósito apresenta uma elevada resistência ao fônon ao percorrer a microestrutura da fibra da madeira, o caminho de deslocamento de calor radial gera um efeito de espalhamento de fônon maior quando comparado à direção axial. As múltiplas interfaces entre celulose e polímero impregnado levam à alta resistência aos fônons.

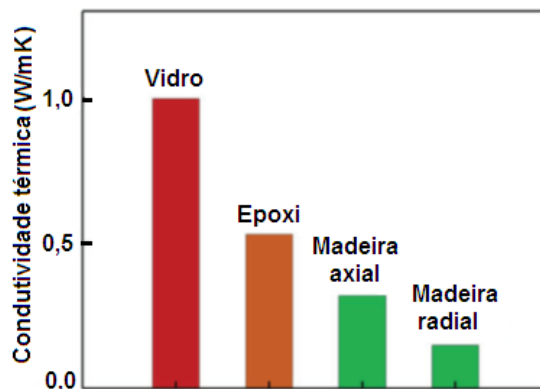
Figura 38 - Uma ilustração do transporte de calor radial e axial em madeira transparente



Fonte: Adaptado de LI *et al.*, 2016a.

Como mostrado no gráfico da **Figura 39**, o polímero puro demonstrou maior condutividade térmica, com cerca de $0,53 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, em relação ao compósito transparente (impregnado com o mesmo polímero). Li *et al.* (2016a) justificam tal resultado pela alta resistência das paredes das células da madeira (especialmente celulose e hemicelulose) aos fônons e ao efeito de espalhamento de fônons com múltiplas interfaces. Em contrapartida, ainda segundo os autores, o vidro tem uma condutividade térmica consideravelmente mais alta, o que justifica o fato da madeira transparente apresentar uma redução do fluxo do calor condutivo mais eficaz quando comparado a ele.

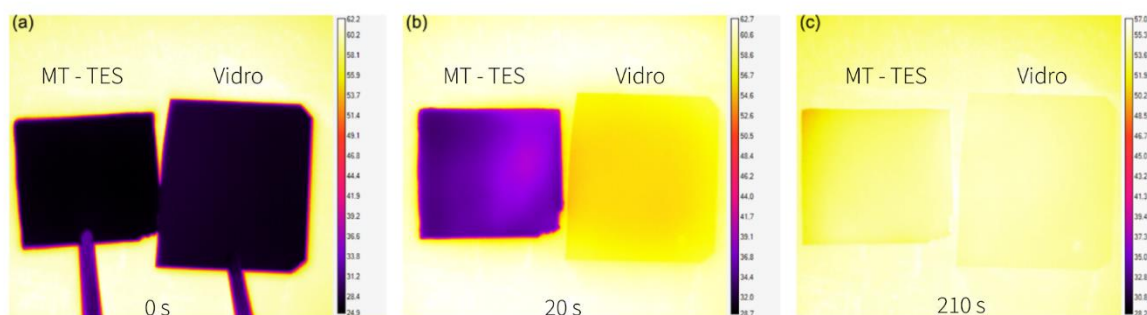
Figura 39 - As condutividades térmicas medidas de vidro padrão, epóxi, direção axial e radial da madeira transparente



Fonte: LI *et al.*, 2016a.

Montanari *et al.* (2019) realizaram o ensaio termográfico para análise da madeira transparente (MT-TES) com intuito de mensurar a capacidade do material em armazenar e liberar energia térmica para deslocar as cargas de aquecimento e resfriamento ao longo do tempo e, desta forma, reduzir a perda de energia térmica por meio do armazenamento do calor latente e sua baixa condutividade térmica em comparação com o vidro (**Figura 40**).

Figura 40 - Imagens térmicas para evolução térmica de MT-TES e vidro em relação ao tempo, quando colocadas desde a temperatura ambiente até uma superfície aquecida a 60 °C. a) Início do experimento, b) após 20 segundos, a amostra de vidro atingiu a temperatura da superfície aquecida e c) TW-TES a atinge após 210 segundos.



Fonte: Adaptado de MONTANARI *et al.*, 2019.

A imagem demonstra o comportamento térmico da madeira transparente proposta pelos autores *versus* o vidro, quando colocados em contato com uma superfície aquecida a 60 °C. Para realizar a caracterização as amostras foram transferidas simultaneamente da temperatura ambiente para a superfície sob aquecimento. Após 20 segundos a amostra de vidro atingiu a temperatura da superfície, o que indica o equilíbrio da temperatura mais rápido

em comparação a madeira transparente, que exigiu 210 segundos de aquecimento para atingir a temperatura de equilíbrio. O experimento, desta forma, comprovou a capacidade de armazenamento de calor e a propriedade de regulação da energia térmica do material proposto. Montanari *et al.* (2019), afirmam que essas diferenças entre o vidro e a madeira transparente são atribuídas à menor condutividade térmica do material proposto e a sua capacidade de absorver e armazenar energia térmica. Desta forma, este se mostra como um candidato de material de armazenamento de calor para aplicações em edifícios que economizam energia.

A capacidade de condutividade térmica e a potencial característica de isolamento térmico da madeira transparente produzida na presente pesquisa foram avaliadas por meio da termografia de infravermelho (IRT).

4 CONSIDERAÇÕES METODOLÓGICAS

O presente capítulo trata dos procedimentos metodológicos aplicados a pesquisa. A partir do levantamento bibliográfico discutido anteriormente, elaborou-se a hipótese principal que foi investigada nessa pesquisa: “É possível obter madeira transparente com o pecíolo de Jupati usando os procedimentos reportados na literatura?”.

4.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa caracteriza-se por ser de natureza aplicada, pelo fato de, por meio de aplicação prática, objetivar a geração de conhecimento visando minimizar problemas específicos. Sua abordagem é quantitativa e com relação aos objetivos do tipo exploratória, de forma que seus procedimentos técnicos partem de uma pesquisa bibliográfica, acerca de estudos já contemplados na literatura, para a etapa experimental baseada no tema em análise (obtenção de compósito transparente a partir do pecíolo de Jupati). Os estudos quantitativos circundarão o comportamento do material no momento da experimentação em laboratório e análise dos dados obtidos (SILVA e MENEZES 2005; GIL, 2002). As classificações da pesquisa estão ilustradas e descritas segundo a literatura no **Quadro 5**.

Quadro 5 - Classificação da pesquisa

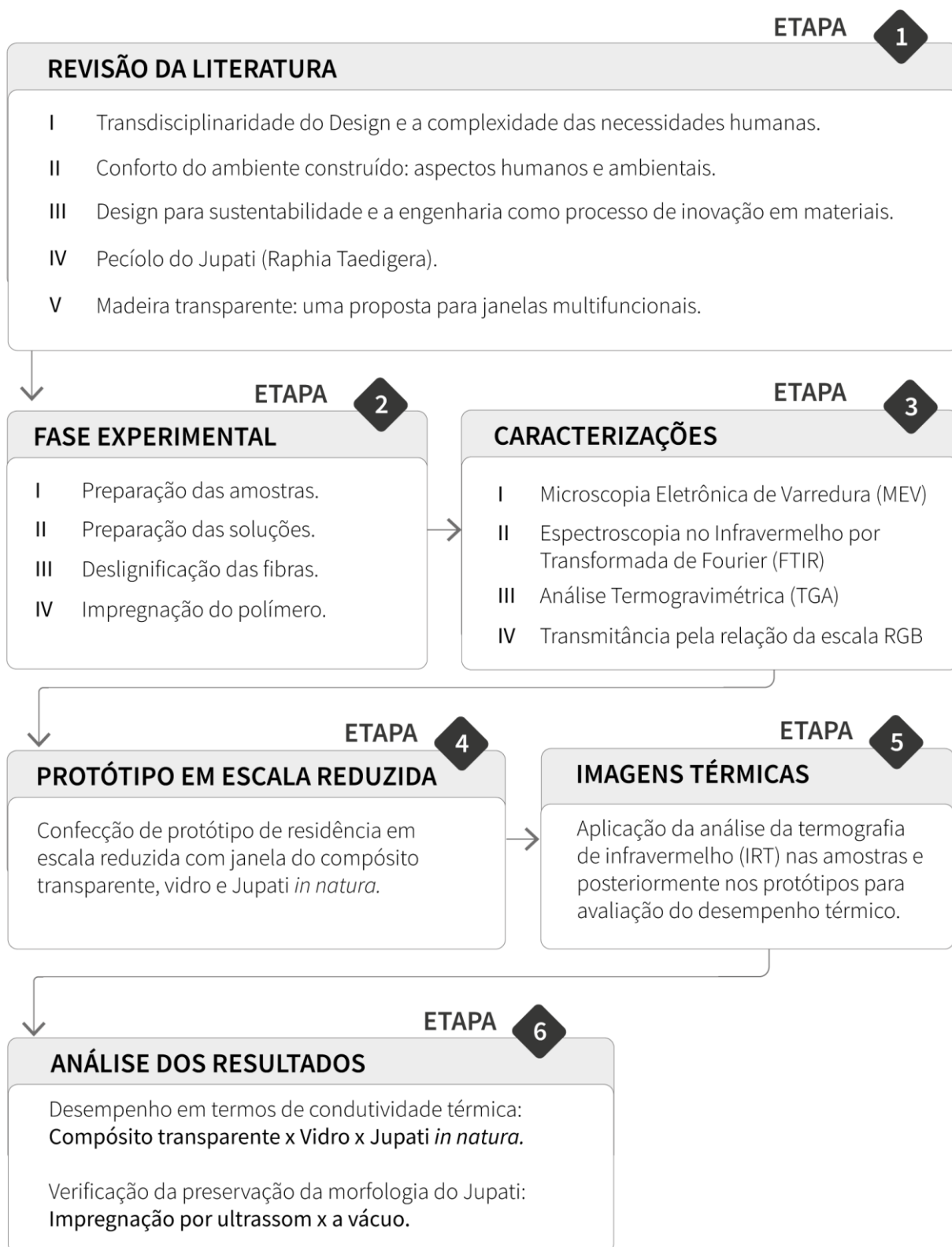
NATUREZA	
Aplicada	“Objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos. Envolve verdades e interesses locais” (SILVA e MENEZES, 2005, pág.20).
ABORDAGEM DO PROBLEMA	
Quantitativa	“Considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Requer o uso de recursos e de técnicas estatísticas (percentagens, média, moda, mediana, desvio padrão, coeficiente de correlação, análise de regressão etc.)” (SILVA e MENEZES, 2005, pág. 20).
OBJETIVOS	
Exploratório	“[...] têm como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-la mais explícito ou a constituir hipóteses. Pode-se dizer que as pesquisas têm como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições” (GIL, 2002, pág. 44).
PROCEDIMENTOS TÉCNICOS	
Bibliográfico	“[...] desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos” (GIL, 2002, pág. 41).
Experimental	“[...] consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-los, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto” (GIL, 2002, pág. 47).

Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

4.2 ETAPAS DA PESQUISA

Os procedimentos gerais da pesquisa estão apresentados em forma de fluxograma na **Figura 41**. As etapas consistem em: revisão da literatura, fase experimental, caracterizações, produção do protótipo, análise de desempenho térmico por meio da termografia infravermelho e discussão dos resultados obtidos.

Figura 41 - Etapas da pesquisa



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

Etapa 1: Revisão da literatura

Construída a partir de um levantamento bibliográfico realizado por meio de livros, artigos científicos e documentários. Os autores recorridos para a pesquisa bibliográfica foram sistematizados no **Quadro 6**. Para a presente pesquisa se propõem a utilização do método fenomenológico que, segundo Gil (2002), consiste no estudo direto da experiência de fato, bem como os resultados obtidos em pesquisas já realizadas acerca da temática visada, de forma a possibilitar a confirmação da sua efetividade em aplicação prática direcionada ao estudo em questão.

Quadro 6 - Resumo bibliográfico da dissertação

Tema	Autores em ordem cronológica
Transdisciplinaridade do design e necessidades humanas	MASLOW (1970); OBORNE (1995); MAURI (1996); LOBACH (2001); VEZZOLI (2002); BRANZI (2006); NIEMEYER (2007); ZINGALE (2008); MORAES (2010); VASSÃO (2010); LANA (2011); CARDOSO (2013); WDO (2015); KRUCKEN (2016); MORAES (2016).
Conforto no ambiente construído	ASHRAE (1966); FOURT e HOLLIERS (1970); ISO 7730 (1984); SLATER (1984); FINK (1992); RUAS (1999); RHEINGANTZ (2001); MALDAGUE (2002); AL-HOMOUD (2005); KROEMER e GRANDJEAN (2005); PADADOPOULOS (2005); KAWASAKI e KAWAI (2006); FROTA e SCHIFFER (2007); SALES (2008); KARANA <i>et al.</i> (2009); BROEGA e SILVA (2010); PEDRA (2011); YU <i>et al.</i> (2011); FLIR (2012); BAGAVATHIAPPAN <i>et al.</i> (2013); CALADO (2013); BARBOSA (2014); INCROPERA e DEWITT (2014); HEWITT (2015); LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA (2016); IIDA e BUARQUE (2016); LI <i>et al.</i> (2016b); RHEINGANTZ (2017); CALLISTER (2018); LI <i>et al.</i> , (2018a); LI <i>et al.</i> , (2018b); MULFARTH (2018).
Design de materiais e sustentabilidade	VON (1973); CAPRA (2005); COELHO (2008); MANZINI (2008); THACKARA (2008); BISTAGNINO (2009); KRUCKEN (2009); SALES <i>et al.</i> (2010); ASHBY e JONHSON (2011); MOURÃO (2013); WDO (2015); OXMAN (2016).
Pecíolo de Jupati (<i>Raphia Taedigera</i>)	SODRÉ (2005); OLIVEIRA <i>et al.</i> (2006); PESCE (2009); OLIVEIRA <i>et al.</i> (2011); SIMÕES (2013); JARDIM (2013); CONCEIÇÃO <i>et al.</i> (2015); PEREIRA <i>et al.</i> (2015).
Madeira transparente	FINK (1992); CARTER (1996); MULLER (2003); AGARWAL (2006); RAMOS, CALATRAVA (2008); EICHHORN <i>et al.</i> (2010); MOON <i>et al.</i> (2011); BAJPAI (2012); SJOSTROM (2013); JEREMIC <i>et al.</i> (2014); FANG <i>et al.</i> (2014); GINDL-ALTMUTTER <i>et al.</i> (2014); LV <i>et al.</i> (2015); QUIN <i>et al.</i> (2015); ZHU <i>et al.</i> (2016a,b); WANG, LU, ZHANG (2016); LI <i>et al.</i> (2016); YADDANAPUDI <i>et al.</i> (2017); LI <i>et al.</i> (2017); QUI <i>et al.</i> (2018); LI <i>et al.</i> (2018a,b,c); BHAT <i>et al.</i> (2019); WU <i>et al.</i> (2019).
Caracterizações	MALDAGUE (2002); MALISKA (2004); BALL (2006); GOLÇALVES (2007); JÚNIOR (2007); KAWANO (2007); SALES (2008); SKOOG, HOLLER, NIEMAN (2009); FLIR (2012); MICHEL e BILLINGTON (2012); CALADO (2013); YOUSIF e HADDAD (2013); YOUSIF e HASAN, 2015.
Termografia	MADRUGA <i>et al.</i> (2010); BARREIRA. ALMEIDA; DELGADO (2016); LEICHT (2018); HART (1991); LAHIRI <i>et</i>

	<i>al.</i> (2012); PADADOPOULOS (2005); MONTANARI <i>et al.</i> (2019); TAKAGI <i>et al.</i> (2007); MOHAPATRA <i>et al.</i> (2014); SONDEREGGER e NIEMZ (2009); KHOUKHI (2018); LUCCHI (2018); YU <i>et al.</i> (2011); KAWASAKI e KAWAI (2016).
--	---

Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

Etapa 2: Obtenção do material

Foram desenvolvidos os experimentos para a obtenção do material proposto, baseados nas metodologias e rotas obtidas a partir do levantamento bibliográfico realizado previamente, de forma a embasar e justificar os procedimentos. Sua execução é constituída pela: 1) Preparação das amostras de pecíolo de Jupati; 2) Preparação das soluções para deslignificação da fibra; 3) Execução do procedimento de remoção da lignina propriamente dito e; 4) Impregnação do polímero nas fibras deslignificadas para obtenção do compósito transparente, este foi realizado de duas formas diferentes: em ultrassom e posteriormente utilizando bomba à vácuo, ambos foram comparados para avaliação do processo mais satisfatório dentro dos objetivos almejados para a presente pesquisa.

Etapa 3: Caracterização do material

Contemplou a realização das caracterizações para análise dos aspectos: morfológico, químico e óptico do material em diferentes etapas do processo de obtenção do compósito transparente. As caracterizações realizadas consistiram em: 1) Microscopia Eletrônica de varredura (MEV); 2) Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR); 3) Análise Termogravimétrica (TGA); 4) Análise de transmitância a partir da escala RGB.

Etapa 4: Protótipo em escala reduzida

Para realizar o experimento de termografia de infravermelho (IRT), foram confeccionados protótipos de casas em escala reduzida feitos de papelão modulado e revestimento interno de poliestireno expandido (EPS), e assim realizar as imagens térmicas.

Etapa 5: Imagens térmicas

As imagens térmicas foram obtidas por termografia no infravermelho (IRT) em duas etapas: primeiramente utilizando os protótipos confeccionados e posteriormente com a amostra selecionada a partir dos resultados de transmitância, dentre aquelas impregnadas usando ultrassom.

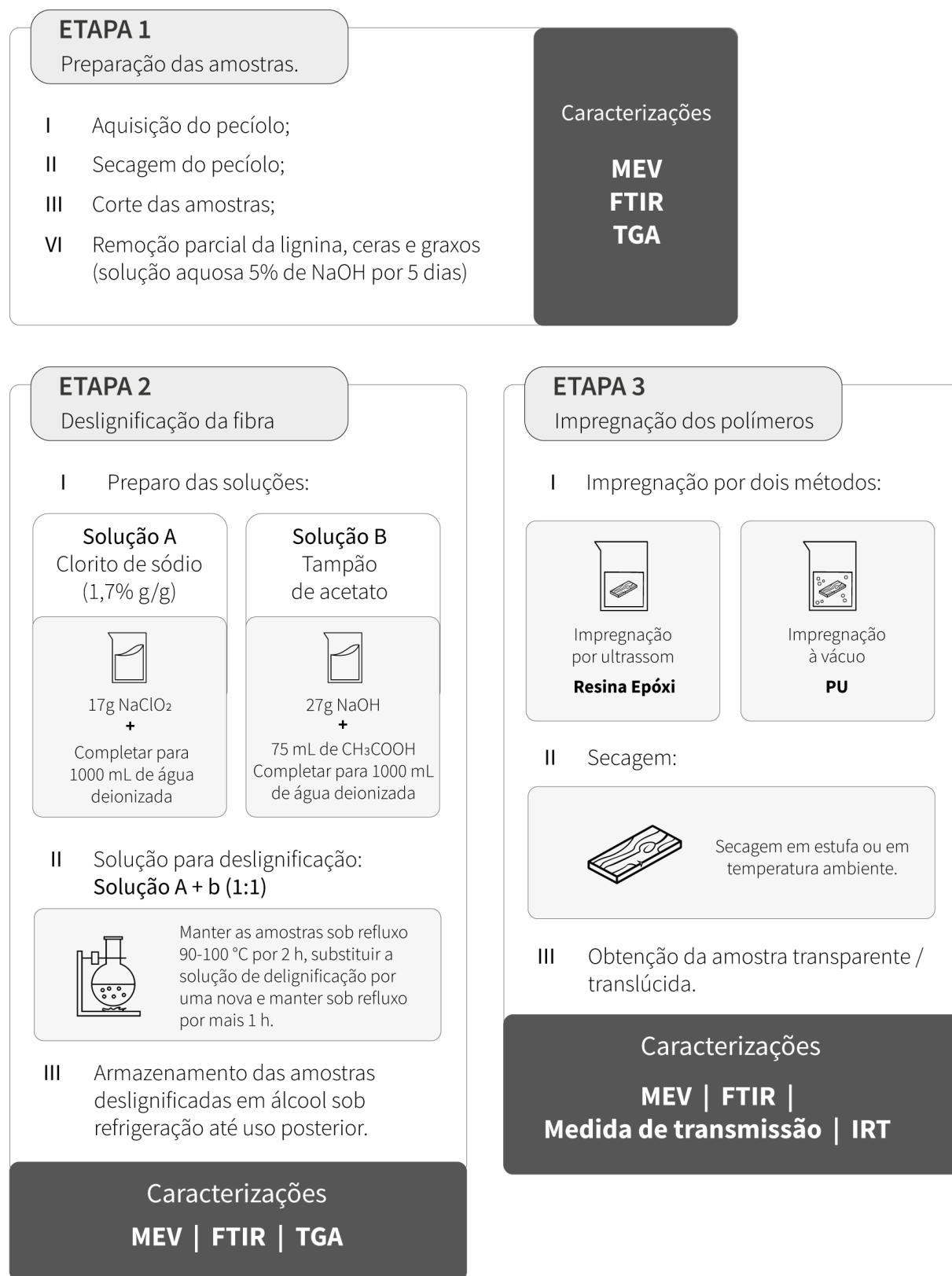
Etapa 6: Análise dos resultados

Para a análise global dos resultados, primeiramente os resultados dos experimentos de IRT foram analisados em termos de comparação da condutividade térmica entre o Vidro x Jupati *in natura* x Jupati impregnado com polímero. Essa análise teve como objetivo verificar as possíveis vantagens da substituição do vidro pelo material proposto nesta pesquisa. Em um segundo momento levou-se em conta as imagens de MEV das amostras após impregnação do polímero, para se chegar à conclusão sobre o melhor método de impregnação em termos de preservar o aspecto morfológico do Jupati.

4.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos experimentais, realizados com o intuito de comprovar a que foram realizados na presente pesquisa estão ilustrados na **Figura 42**.

Figura 42 - Resumo dos procedimentos experimentais da pesquisa



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

4.3.1. Materiais

Pecíolo do Jupati (*Raphia Taedigera*)

Os pecíolos de Jupati foram adquiridos no Mercado do Ver-o-Peso localizado no município de Belém do Estado do Pará. O pecíolo é comercializado *in natura*, desta forma, para a preparação da amostra o material foi exposto ao sol por 3 dias para secagem (**Figura 43**) e posterior retirada do revestimento (tala).

Figura 43 - Pecíolo do Jupati após 3 dias exposto ao sol para secagem



Fonte: Acervo pessoal (2019).

Reagentes

Os reagentes utilizados nos procedimentos químicos estão listados no **Quadro 7**.

Quadro 7 - Lista de reagentes utilizados na fase experimental da pesquisa

Procedimento	Reagente	Fornecedor	CAS
Mercerização	I. Hidróxido de sódio	I. Neon	I. 1310-73-2
Deslignificação	I. Clorito de sódio	I. Petra Química	I. 7758-19-2
	II. Hidróxido de sódio	II. Neon	II. 1310-73-2
	III. Ácido acético glacial	III. Lab Synth	III. 64-19-7

Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

Polímeros

Para impregnação nas amostras deslignificadas, foram selecionados dois tipos de polímeros para posterior avaliação da melhor compatibilidade destes com a parede celular da fibra do Jupati. Foram eles a Resina Epóxi Baixa Viscosidade OHR-22 e Endurecedor Clear OHE-63, na proporção 1:1, fornecidos pela Ohana Químicos. Também foram usadas duas dispersões aquosas de poliuretano, denominadas PQU 2110 e PQU 2111 (Poliquímica Ind. e Com. Produtos Químicos Ltda - Duque de Caxias, RJ).

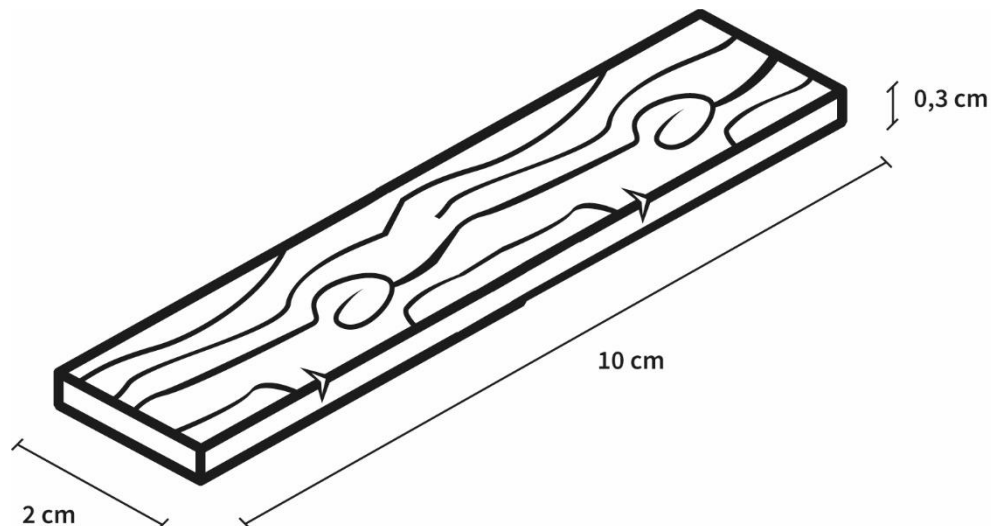
4.3.2 Métodos

Composto por quatro etapas, o processo para obtenção do compósito transparente envolveu: (I) Pré-tratamento das amostras de Jupati; (II) Remoção parcial da lignina (mercerização); (III) Deslignificação da fibra de Jupati; (IV) Impregnação dos polímeros.

(I) Preparação das amostras de Jupati

Para início dos procedimentos, a tala do pecíolo foi retirada e amostras com dimensões 10 cm x 0,3 cm x 2 cm foram cortadas, conforme especificado na **Figura 44**.

Figura 44 - Dimensões do corte das amostras do pecíolo de Jupati para experimentos



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

(II) Remoção parcial da lignina (mercerização)

Como propõem Siakeng *et al.* (2020), para início do procedimento de limpeza das fibras foi realizado o processo de mercerização. Primeiramente uma solução de 5% (m/v) de hidróxido de sódio (NaOH) foi preparada. As amostras foram imersas na solução e deixadas em repouso por pelo menos 5 dias em um dessecador modelo Vacuubrand ME 1, após retirada do ar.

(III) Deslignificação da fibra de Jupati

Para o procedimento de deslignificação inicialmente foram preparadas duas soluções denominadas solução 1 e solução 2.

Solução A

Preparou-se uma solução de clorito de sódio (NaClO_2) em balão volumétrico de 1000 mL. Para isso, foram adicionadas 17 g de NaClO_2 e o volume foi completado para 1000 mL com água deionizada.

Solução B (solução tampão)

Para solução tampão (controle de pH), primeiramente 27 g de hidróxido de sódio (NaOH) foram dissolvidas em água deionizada em balão volumétrico de 1000 mL. Em seguida foram adicionados 75 mL de ácido acético (CH_3COOH), e o volume foi completado para 1000 mL com água deionizada.

Para remoção da lignina, as amostras foram transferidas para um reator contendo 300 mL da solução 1 (1,7g/g) e solução 2 (tampão) em proporção 1:1. O sistema foi mantido sob refluxo por 2 h e após esse período a solução foi substituída por uma nova solução mantendo-se o refluxo por mais 1 h. Posteriormente as amostras foram retiradas e lavadas com água deionizada, com cuidado para evitar o rompimento das mesmas, transferidas para um recipiente com etanol e mantidas sob refrigeração até a etapa de impregnação. O solvente foi trocado a cada dois dias.

(IV) Impregnação com polímero

A impregnação com polímeros nas amostras deslignificadas de Jupati foi realizada utilizando dois métodos: impregnação por ultrassom e impregnação sob vácuo.

Impregnação por ultrassom

A impregnação por esse método foi realizada em diferentes tempos com um equipamento do tipo *mini ultrasonic cleaner*, que possui duas variações de potência: 30 W e 50 W. O recipiente foi completado com volume suficiente da resina epóxi para cobrir as amostras, e após o período de sonicação as amostras foram retiradas do ultrassom e permaneceram por 10 min imersas na solução de catalizador em recipiente separado. Ao final as amostras foram secas em estufa a 50 °C por 48 h e foram nomeadas como: EPX-A, EPX-B, EPX-C, EPX-D, EPX-E e EPX-F; sendo elas diferenciadas pela potência do ultrassom e impregnação no ultrassom, conforme apresentadas na **Tabela 1**.

Tabela 1 - Potência (W) e tempo (min) utilizados na impregnação por ultrassom das amostras com resina epóxi

	EPX-A	EPX-B	EPX-C	EPX-D	EPX-E	EPX-F
Potência (W)	30	30	30	50	50	50
Tempo (min)	20	40	60	20	40	60

Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

Impregnação sob vácuo

Neste método as amostras do pecíolo do Jupati foram imersas separadamente em 30 mL nas dispersões aquosas de poliuretano (PQU 2110 e PQU 2111). Em seguida foram transferidas para um dessecador, e então foram feitos 5 ciclos de vácuo de 10 minutos ativos e 5 minutos de descanso. As amostras secaram sem estímulo térmico, levando 25 dias para secagem completa. A partir da impregnação sob vácuo foram obtidas as amostras PMT10 e PMT11.

4.4 CARACTERIZAÇÕES

4.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise da morfológica da superfície das amostras foi feita a partir da investigação por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As imagens microscópicas foram realizadas com auxílio do equipamento modelo Hitachi TW 4000 Plus com a operação do feixe de elétron a 15 kV. O material foi fixado em porta amostra com o uso da fita condutora de carbono e feita a captação das imagens usando o detector de elétrons retro espalhados (BSE) com ampliação de 200µm, e aumento da imagem em 250 x. Para obtenção da imagem da fibra

deslignificada, uma pequena amostra foi retirada do meio aquoso e passou pelo processo de secagem na estufa à 60 °C para retirada de qualquer umidade da amostra.

4.4.2 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de FTIR foram obtidos em um equipamento FT-IR Espectrometer Frontier marca PerkinElmer, com o módulo de reflexão total atenuada (ATR). Empregou-se 32 varreduras entre 4000 a 615 cm⁻¹ e resolução de 4 cm⁻¹.

4.4.3 Termogravimetria (TG)

Os experimentos de TG foram realizados em um equipamento DTG- 60, marca Shimadzu, usando um cadinho de alumina. As amostras foram aquecidas em atmosfera de ar sintético, a uma vazão de gás de 50 mL min⁻¹ e razão de aquecimento de 10 °C min⁻¹ a partir da temperatura ambiente até 750°C.

4.4.4 Transmitância pela relação da escala RGB

Os valores dos parâmetros RGB de cada amostra foram obtidos com um analisador de cor modelo ACR-1023 da marca Instrutherm. A escala espectral do dispositivo abrange a faixa de comprimento de ondas de 400 a 700 nm, sendo a precisão de ± 5%. Os valores de R (*red-vermelho*), G (*green-verde*) e B (*blue-azul*) são obtidos entre 0 e 1023, sendo posteriormente convertidos para a faixa de 0-255. Foram feitas medições em três regiões diferentes de cada amostra e os valores usados foram a média dos três valores.

O cálculo de transmitância das amostras com a aplicação do Elum Tools, *software* desenvolvido pela *Lighting Analysts Inc* (Littleton, CO, USA). Segundo a empresa responsável, para a efetivação do cálculo é feita a relação entre cor, a transmitância e a reflectância do material analisado. A transmitância (T) é definida pela relação que tem como base a premissa de que a luz que não é refletida ou absorvida pode ser transmitida. Então, se aplica a equação à luz restante, não refletida (disponível):

$$Transmitância = (0,2125)(R_{disp}) + (0,7154)(G_{disp}) + (0,07121)(B_{disp}) \quad (7)$$

4.4.5 Termografia de Infravermelho (IRT)

Para o experimento de IRT foi utilizada uma câmera termográfica da marca *Flir Systems*, modelo P640 da marca High, com escala de temperatura de -40 °C a 500 °C e

precisão de $\pm 2\%$ da leitura da medição. Para a análise de dados foi utilizado o *software ThermaCAM™ QuickReport 1.2* versão SP2 - (2020) concedido pela *Flir Systems*.

A infraestrutura usada para a realização das caracterizações está resumida no **Quadro 8**.

Quadro 8 - Infraestrutura usada para realização das caracterizações

Caracterização	Equipamentos	Local
MEV	TW 4000 Plus – HITACHI	CDE/UEMG
FTIR	Espectrofotômetro Frontier - PerkinElmer	UNIFEI – Campus Itabira
TGA	DTG- 60 – Shimadzu	UNIFEI – Campus Itabira
T	ACR-1023 - Instrutherm	CEMA/UEMG
IRT	Thermocam Flir modelo P 640 High	CEMA/UEMG

Fonte: Desenvolvido pela autora (2020).

As caracterizações tiveram o objetivo de fazer uma avaliação do caráter morfológico, químico, térmico e óptico do compósito, conforme a ordem em que as análises aparecem no **Quadro 9**.

Quadro 9 - Caracterizações realizadas nas diferentes etapas do processo

Caracterização	Objetivo	In natura	Deslignificada	Impregnada
MEV	Analisar morfologia	X	X	X
FTIR	Detectar grupos químicos	X	X	
TGA	Verificar a degradação térmica	X	X	
T	Avaliar a transparência			X
IRT	Estimar a condutividade térmica			X

Fonte: Desenvolvida pela autora (2021).

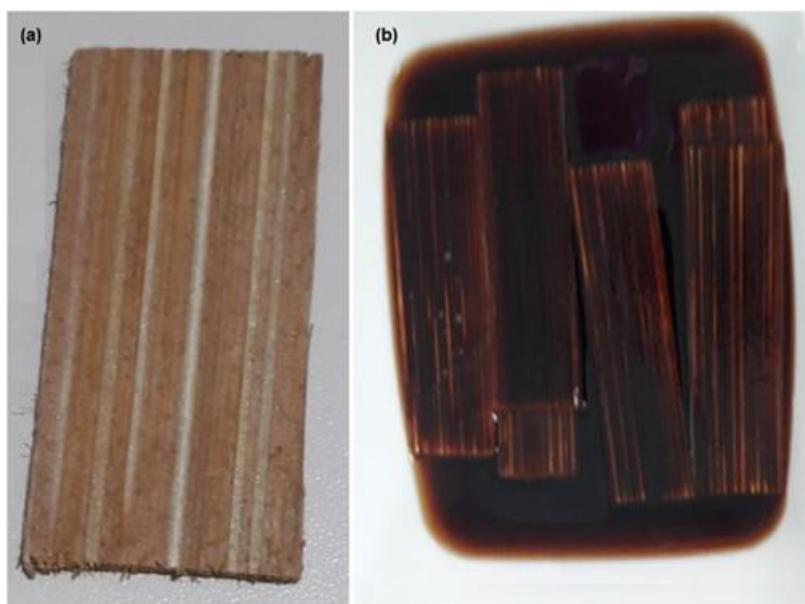
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo dos experimentos a seguir, foi obter o compósito transparente levando em consideração aspectos como efetividade do processo de deslignificação, ou seja, certificar-se de que o procedimento de remoção da lignina foi realizado com sucesso, grau de transparência alcançado após a impregnação do polímero, bem como preservação da estrutura anisotrópica do pecíolo se após o processo de impregnação.

5.1 PROCESSO DE DESLIGNIFICAÇÃO

Conforme já descrito, o primeiro tratamento para se alcançar a madeira transparente é a mercerização com hidróxido de sódio (NaOH). A **Figura 45** apresenta a foto da amostra de Jupati *in natura* pronta para o iniciar o tratamento de mercerização (a) e amostras já imersas na solução de NaOH após o período de 5 dias (b).

Figura 45 – a) Foto da amostra do pecíolo de Jupati *in natura* (b) e amostras imersas na solução de mercerização após 5 dias



Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

Já foi reportado que o tratamento alcalino (com NaOH) limpa a superfície das fibras eliminando impurezas, lignina, óleos e substâncias cerosas. Com isso a rugosidade da superfície da fibra aumenta e a absorção de umidade diminui devido à remoção dos grupos OH superficiais das fibras (SIAKENG *et al.*, 2020). Torna-se perceptível a mudança de

coloração da solução (**Figura 45b**) que ocorre devido a remoção de tais substâncias após o processo.

Após a mercerização a etapa de deslignificação é realizada nas soluções e condições previamente descritas, conforme aparece na **Figura 46**.

Figura 46 - Foto das amostras durante o processo de deslignificação



Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

Qiu *et al.* (2019) reportaram que após deslignificação via NaClO_2 o teor de lignina de $23,5 \pm 1,8\%$ para a madeira não tratada diminuiu para $1,6 \pm 0,2\%$ para a madeira deslignificada. Para a realização deste procedimento os autores secaram a madeira de choupo a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ por 24 h, as amostras foram impregnadas com a solução NaClO_2 1,5% em peso e tampão de acetato por 6h a 10 kPa, em seguida submetidas a 80°C por 8h na solução para deslignificação.

Na presente pesquisa, o teor de lignina, responsável pela cor da madeira, não foi medido. No entanto, pela **Figura 47** a qual ilustra essa variação, é perceptível que o Jupati perdeu a cor sugerindo que boa parte da lignina foi removida.

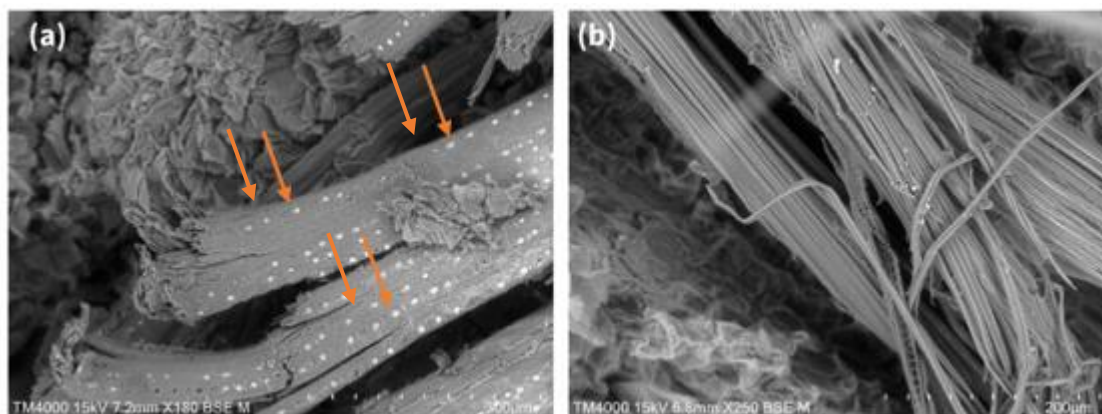
Figura 47 - Variação da cor das amostras de Jupati *in natura* e após o processo de deslignificação



Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

A **Figura 48** mostra as imagens de MEV do Jupati *in natura* (a) e após a deslignificação (b).

Figura 48 - Imagens de MEV: a) Jupati *in natura* e b) Jupati após o processo de deslignificação



Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

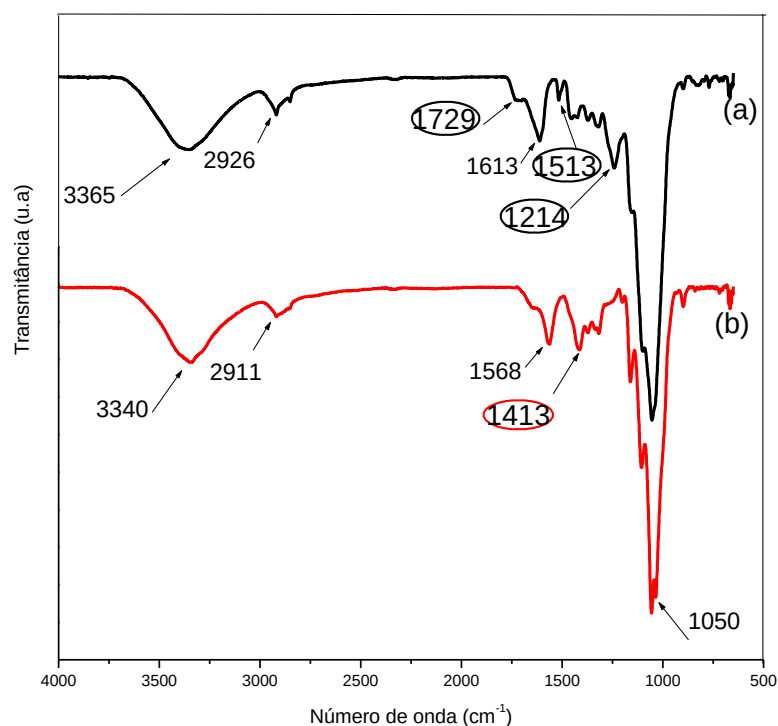
Em relação à micrografia do Jupati *in natura* (**Fig. 48a**), é possível perceber numerosas estruturas porosas obstruídas que ocorrem na superfície externa das fibras (ressaltadas com setas). Tais estruturas são chamadas de canais ou poços (*pit channels*), e são compostas por sílica (TAVARES *et al.*, 2020). Segundo Oliveira *et al.* (2019), esses canais são parcialmente ou totalmente desobstruídos durante o tratamento com NaOH, dependendo da concentração da solução e da temperatura. De acordo com esses autores, compostos ricos em sílica na forma de saliências são comuns em fibras de palmeiras amazônicas. A resistência

das folhas e caules das palmeiras é atribuída a presença de células (estegmatas) que contêm óxido de silício.

Após os tratamentos de mercerização e deslignificação (Fig. 48b) foram gerados vazios devido a retirada da lignina, contudo, é perceptível que as fibras se mantiveram organizadas sendo possível observar a seção longitudinal das fibras. Essa observação está de acordo com o que foi relatado por Manoel et al. (2015) quando estudaram os efeitos da deslignificação em fibras nativas do pantanal. Como já mencionado anteriormente, as propriedades mecânicas da madeira são, principalmente, devidas ao conteúdo de celulose e pela orientação celular da fibra, desta forma, preservar esta organização favorece a característica de anisotropia mecânica (EICHHORN et al., 2010; ZHU et al., 2016b; LI et al., 2018a).

Os espectros de FTIR das amostras de Jupati antes e depois dos tratamentos estão representadas na Figura 49.

Figura 49 - Espectros FTIR: (a) Jupati in natura e (b) Jupati deslignificado



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

A maioria dos grupos correspondentes à celulose, hemicelulose e lignina são absorvidos em comprimentos de onda próximos. Assim, é difícil mostrar por meio do FTIR a presença de lignina na amostra de Jupati *in natura* (KABIR et al., 2013). Os dois espectros

apresentaram bandas largas centradas acima de 3300 cm^{-1} referentes ao estiramento de ligações O-H da celulose, hemicelulose e água (MANOEL *et al.*, 2015). As bandas em torno de 2900 cm^{-1} referem-se a estiramentos simétricos e assimétricos das ligações C-H de cadeias alifáticas (MANOEL *et al.*, 2015).

Ambos os espectros apresentaram bandas em torno de 1600 cm^{-1} (estiramento C=C) e 1050 cm^{-1} (estiramento C-O-C), que estão de acordo com os espectros obtidos para outras madeiras. Essas bandas estão relacionadas aos grupos hidroxila nas celulosas e grupo carbonila do éster acetílico nas hemicelulosas. A banda em 1729 cm^{-1} , atribuída tanto à carbonila (C=O) de aldeído como compostos aromáticos da lignina (WU *et al.*, 2019), só consegue ser visualizada no espectro correspondente ao Jupati *in natura*. Do mesmo modo, Manoel *et al.* (2015) observaram a diminuição de intensidade dessa banda em amostras submetidas ao processo de deslignificação.

Bandas na região de 1515 cm^{-1} são atribuídas à vibração do anel benzênico¹ da lignina (MANOEL *et al.*, 2015). Essa banda foi observada no espectro do Jupati *in natura* em 1513 cm^{-1} , mas não foi observada no espectro da amostra submetida à deslignificação, indicando remoção parcial da lignina.

A lignina tem uma banda característica em 1214 cm^{-1} , atribuída ao modo de respiração² do anel aromático devido ao estiramento dos grupos C-O e C=O da lignina (KABIR *et al.*, 2013). Nota-se que uma banda, em 1214 cm^{-1} , aparece no espectro à amostra de Jupati *in natura*, mas não no espectro da amostra deslignificada. Além disso, uma absorção em 1413 cm^{-1} pode ser percebida apenas no espectro referente à amostra deslignificada. A banda em 1430 cm^{-1} foi designada como o dobramento do grupo C-H da celulose cristalina (KABIR *et al.*, 2013). O destaque percebido na banda atribuída à celulose cristalina no espectro, pode ser justificado pela redução significativa do conteúdo de lignina.

Segundo Xiao *et al.* (2020) a análise térmica é empregada para caracterizar e identificar substâncias como a biomassa por meio do monitoramento das mudanças em suas propriedades físicas (principalmente peso e energia) submetida a programação controlada de temperatura. Ainda segundo os autores, dentre os diversos métodos de análise térmica a termogravimetria é considerada eficaz e amplamente utilizada para a determinação da variação de massa de uma amostra em função da temperatura e/ou tempo. Com isso, é possível investigar processos que

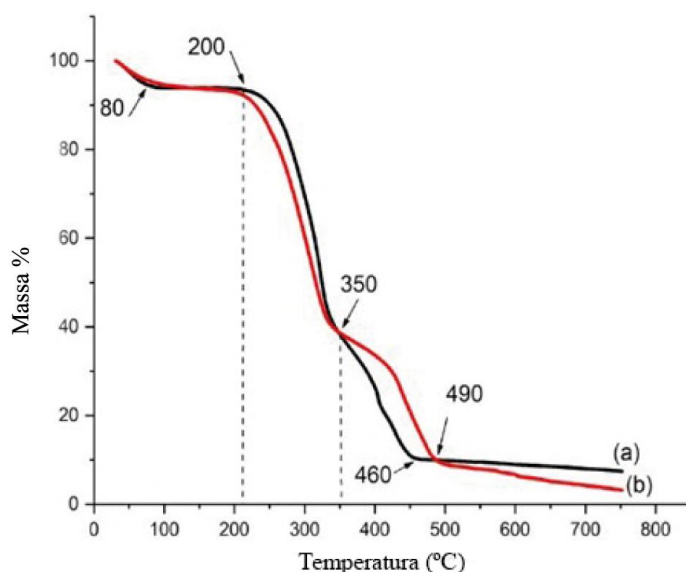
¹ Anel benzênico ou anel aromático. Sua presença ou ausência na estrutura molecular de uma substância a classifica como substância aromática ou alifática, respectivamente.

² Respiração: Modo vibracional de grupos químicos presentes no anel aromático semelhante ao movimento da respiração.

ocorrem sob ação da temperatura, tais como desidratação, oxidação, combustão, decomposição, e principalmente a estabilidade térmica do material.

As curvas de TG das amostras de Jupati *in natura* e deslignificado estão apresentadas na **Figura 50**.

Figura 50 - Curvas termogravimétricas do Jupati *in natura* (a) e deslignificado (b)



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

Tanto as amostras não tratadas quanto as tratadas apresentaram perda de água em torno de 80 °C, o que justifica a perda de massa inicial. A primeira etapa de degradação começa próximo a 200 °C continuando até 350 °C, ocorrendo de forma mais acentuada na amostra deslignificada. Esse comportamento pode ser atribuído à lignina, que retardou a degradação do Jupati *in natura* em comparação ao pecíolo deslignificado (KABIR *et al.*, 2013). Ainda em 350 °C, a tendência se inverteu e a amostra deslignificada passou a apresentar menor massa residual. Provavelmente porque a 350 °C a celulose foi totalmente decomposta devido à quebra de suas estruturas moleculares, enquanto a lignina, presente em maior quantidade na amostra *in natura*, continua a se degradar até a temperatura superior a 400 °C (KABIR *et al.*, 2013).

Assim, a TGA corroborou com os resultados do FTIR e ambos indicaram que o procedimento de deslignificação do pecíolo de Jupati *in natura* foi realizado com sucesso.

5.2 PROCESSO DE IMPREGNAÇÃO DO POLÍMERO

5.2.1 Impregnação por ultrassom

Ultrassom é um método que pode ser empregado para promover a impregnação da madeira usando pressão ambiente (sem necessidade de vácuo). Quando ondas de ultrassom se propagam em um meio líquido, elas produzem bolhas de cavitação. Essas bolhas rapidamente colapsam e produzem ondas de choque, as quais aumentam a remoção de extrativos que estão fortemente ligados à parede celular da madeira (ZHAO et al., 2016). Portanto, a permeabilidade e a transferência de massa da madeira são aumentadas e consequentemente a eficiência da impregnação aumenta, sem necessidade de um grande investimento em equipamentos (ZHAO et al., 2016). A Figura 51 apresenta uma amostra deslignificada do pecíolo de Jupati sendo impregnada com resina epóxi com auxílio de um ultrassom de banho de laboratório. Segundo Fink (1992), as resinas epóxi costumam ter índice de refração adequado entre 1,54 e 1,56.

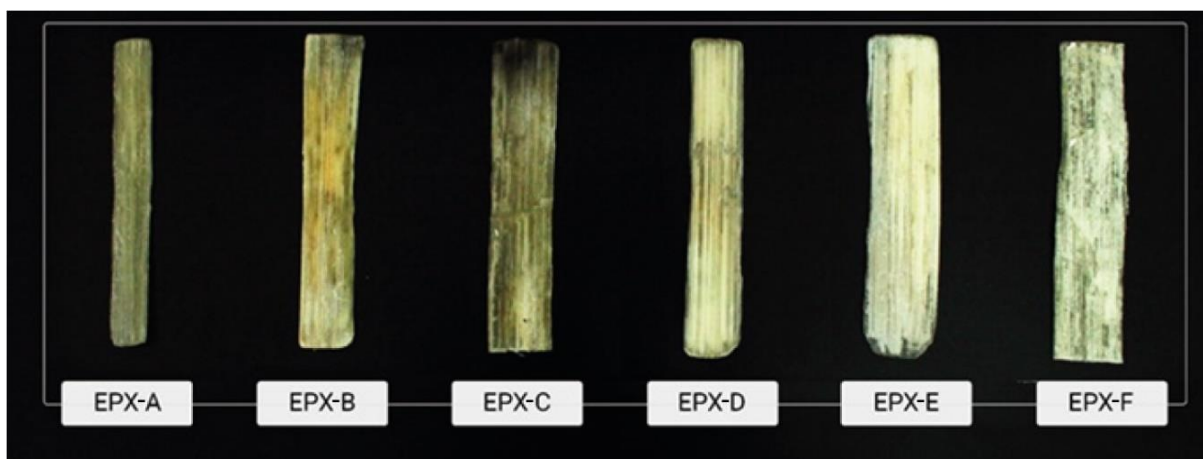
Figura 51 - Processo de impregnação assistido por ultrassom



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

A foto das amostras impregnadas com resina epóxi, descritas na Tabela 1, usando ultrassom está apresentada na **Figura 52**.

Figura 52 - Foto das amostras impregnadas com resina epóxi por ultrassom

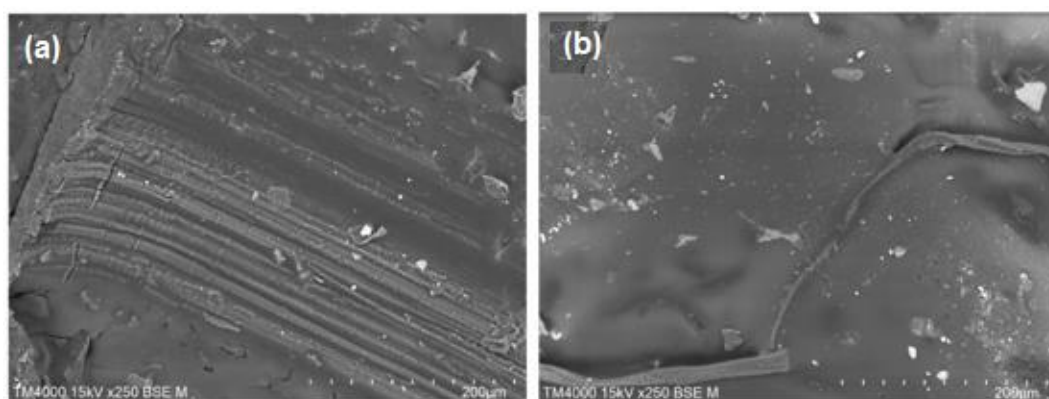


Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

Conforme pode ser observado, as amostras impregnadas por meio do ultrassom não apresentaram transparência e/ou translucidez. Possivelmente não foi fornecida energia suficiente para impregnação do polímero nas fibras do pecíolo deslignificado. Sendo assim, é provável que o polímero tenha ficado mais na superfície das amostras promovendo um tipo de “plastificação” da amostra.

As imagens de MEV das amostras EPX-C e EPX-F, selecionadas pelo fato de seus aspectos visuais demonstrarem melhor resultado, estão apresentadas na **Figura 53**. Conforme pode ser observado, de fato o polímero parece estar na superfície das amostras e não impregnado.

Figura 53 - Imagens obtidas por MEV das amostras: (a) EPX-C e (b) EPX-F. Aumento 250 X



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

Outro fator importante que foi perceptível após a impregnação com a resina epóxi, foi a contração das amostras. As amostras EPX-A, EPX-C e EPX-D reduziram consideravelmente de tamanho após a secagem em 35%, 25% e 20% respectivamente.

Esse resultado aponta para incompatibilidade entre a celulose (pecíolo deslignificado) e a resina. A contração é explicada pela formação de ligações de hidrogênio entre as moléculas de celulose em detrimento da interação da celulose com a resina (LI *et al.*, 2018c).

Os valores medidos de RGB das amostras e os valores de transmitância (T%), calculados a partir da equação 7, aparecem na **Tabela 2**. O Jupati *in natura* e o vidro foram usados como controle.

Tabela 2 - Valores de RGB e T% das amostras impregnadas usando ultrassom

Amostra	R	G	B	T%
Vidro	199	13	193	80
Jupati <i>in natura</i>	128	89	59	37
EPX-A	100	85	63	52
EPX-B	153	125	91	33
EPX-C	109	89	65	48
EPX-D	159	132	100	32
EPX-E	143	119	93	37
EPX-F	113	98	77	49

Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

De modo geral os valores de T% foram baixos em relação ao vidro, porém mais altos do que se poderia esperar se for considerado o aspecto visual. Essa observação aponta para possíveis erros durante a medição dos valores RGB. O alto índice de transmitância da amostra EPX-A de 52%, por exemplo, sugere a heterogeneidade da amostra. Possivelmente foi medida a transmitância da resina que não impregnou de fato na fibra deslignificada, ao contrário da amostra EPX-D que obteve o menor índice (32%). Neste caso, supõe-se que a medição focou na fibra que não obteve a transparência ou translucidez visada.

Xia et al. (2021) apresentaram altos valores de transmitância próximos de 90% para madeira Balsa (*Ochroma pyramidale*) deslignificada e impregnada com resina Epóxi. No caso dos autores, a impregnação da resina foi realizada pelo processo a vácuo.

Em vista dos resultados obtidos com a impregnação por ultrassom, foram realizados novos experimentos usando a impregnação a vácuo com a resina epóxi e com o poliuretano.

4.2.2 Impregnação a vácuo

Os experimentos envolvendo impregnação a vácuo foram realizados com duas dispersões aquosas de poliuretano (PUD). Além disso, sistema a base d'água estão em conformidade com a orientação para sustentabilidade. A **Figura 54** mostra a bomba usada para fazer o vácuo (**Figura 54a**) e o recipiente sob vácuo com PUD e a amostra (**Figura 54b**).

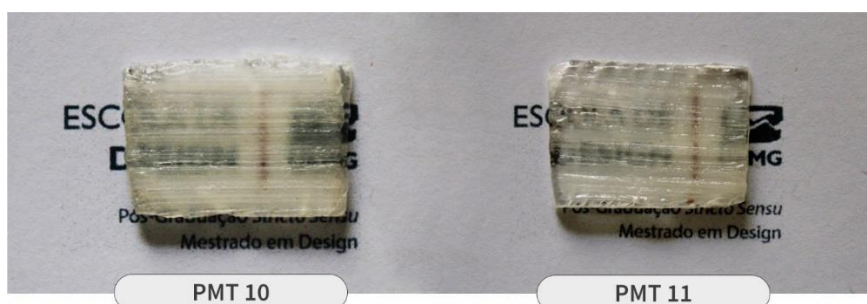
Figura 54 - Fotos para fins de ilustração da impregnação a vácuo: (a) bomba de vácuo e (b) impregnação a vácuo com PUD



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

As amostras PMT 10 e PMT 11 alcançaram certa translucidez, comprovando a maior efetividade do processo de compatibilização de interfaces quando realizado por meio da impregnação a vácuo (**Figura 55**).

Figura 55 - Amostras do pecíolo do Jupati impregnado com dispersão aquosa de poliuretano (PUD) utilizando bomba a vácuo sobrepondo o logotipo da Escola de Design (UEMG)

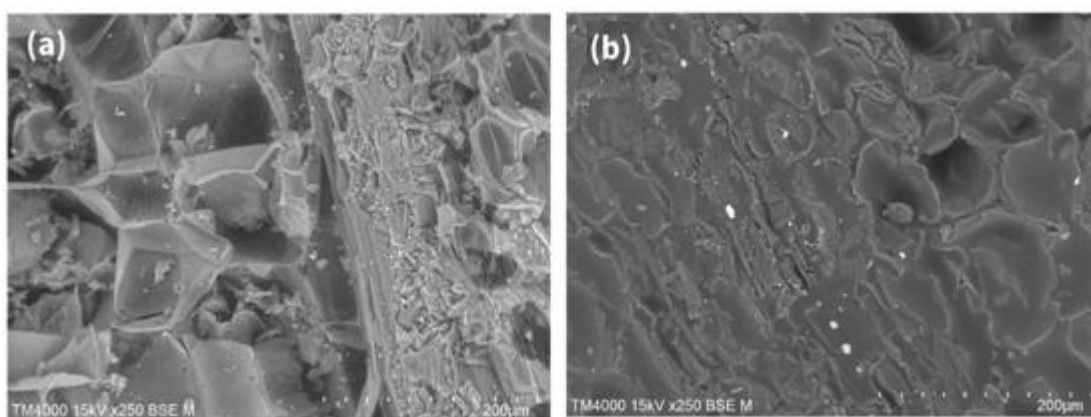


Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

Esse resultado sugere que o polímero de fato preencheu de forma considerável os poros da madeira deslignificada após o processo de impregnação a vácuo (ZHU *et al.*, 2016b).

É possível visualizar pela imagem de MEV, apresentada na **Figura 56b** (correspondente a amostra PMT 10), que ao contrário das amostras que foram impregnadas por meio do ultrassom, PMT 10 preservou a morfologia das fibras do Jupati *in natura* (**Figura 56a**). Esse comportamento indica que ocorreu a impregnação do polímero, e que este preencheu os vazios entre as fibras.

Figura 56 - Imagens obtidas por MEV das amostras: (a) Jupati *in natura* e (b) PMT 10. Aumento 250 X



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

Os valores medidos de RGB das amostras e os valores de transmitância (T%), calculados a partir da equação 7, aparecem na **Tabela 3**. Também para as amostras impregnadas a vácuo o Jupati *in natura* e o vidro foram usados como controle.

Tabela 3 - Valores de RGB e T% das amostras impregnadas usando vácuo

Amostra	R	G	B	T%
Vidro	199	13	193	80
Jupati <i>in natura</i>	128	89	59	37
PMT 10	120	100	95	46
PMT 11	149	142	135	40

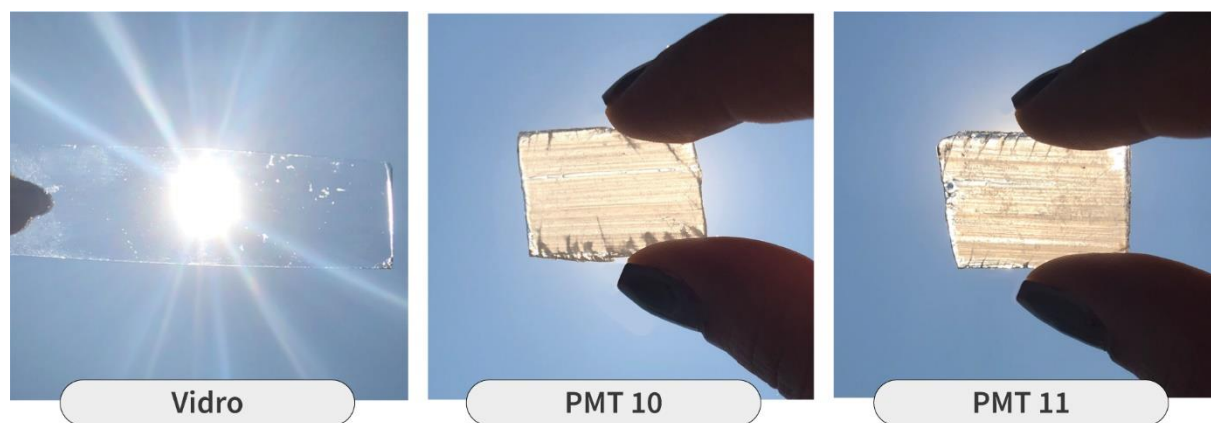
Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

Apesar da imagem de MEV ter sugerido que ocorreu a impregnação da resina, os valores de T%, que indicam o grau de transparência das amostras, não diferiram muito daqueles obtidos com a impregnação da resina epóxi usando ultrassom. Considerando aspectos visuais das amostras PMT 10 e PMT 11, bem como os resultados dos cálculos de índice de transmitância, estas podem ser classificadas como translúcidas. No entanto, como já discutido anteriormente, apesar dos valores de transmitância consideravelmente altos das amostras EPX-A (52%), EPX-C (48%) e EPX-E (49%), seus aspectos visuais e a não impregnação bem-sucedida da resina epóxi apontam que houve um erro no momento da medição, pois é possível visualizar as duas fases do compósito.

Para visualização do comportamento do material com a luz, o vidro e as amostras translúcidas (PMT 10 e PMT 11) foram fotografados direcionados a luz do sol para avaliar seu efeito antirreflexo como propõem Li *et al.* (2016a) (**Figura 57**).

Assim como dissertam os autores, o brilho no compósito transparente é removido e transmitido de forma mais difusa quando comparado com o comportamento da luz solar através do vidro.

Figura 57 - Evidência fotográfica do efeito ofuscante do vidro em comparação com a iluminação uniforme e difusa através das amostras de compósito PMT 10 e PMT 11 obtidas



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

Tal comportamento é apreciável para aplicação visada, pois a morfologia das fibras fornece uma barreira estrutural e fornece iluminação uniforme com maior conforto visual no ambiente ao qual está instalado além de, no caso da amostra translúcida, proporciona privacidade devido a sua “névoa” intrínseca (LI *et al.*, 2016a; KATUNSKÝ *et al.*, 2018).

Por outro lado, Fink (1992) relata que após deslignificadas, as amostras de madeira podem ser quase transparentes por meio da inclusão de uma resina com o mesmo índice de refração da madeira, que é cerca de 1,56.

Em seus experimentos o autor impregnou a madeira com dois tipos de monômeros³ acrílicos juntamente com o iniciador³ e fez a reação de polimerização *in situ*. Dessa forma ele aproveitou o fato que o monômero é muito menos viscoso do que o polímero, o que facilitou a impregnação. Ao mesmo tempo o autor contou com a possibilidade de obter polímeros com o índice de refração adequado. Segundo o autor, foram obtidas amostras transparentes.

Na presente pesquisa, foi realizado um experimento preliminar de impregnação de resina epóxi usando vácuo. A foto da amostra obtida está apresentada na **Figura 58**.

Figura 58 - Amostra preliminar obtida com impregnação a vácuo de resina epóxi



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

Segundo Fink (1992), as resinas epóxi costumam ter índice de refração adequado entre 1,54 e 1,56. No entanto, elas têm alguns inconvenientes, entre eles: a viscosidade alta que dificulta a impregnação, o fato dela ser termofixa, ou seja, ela possui um tempo de manuseio antes de começar a curar (endurecer), tal característica dificulta o processo e pode causar danos à bomba de vácuo e podem ser carcinogênicas. Desta forma, a resina epóxi não será mantida para estudos futuros.

³ Monômero é a matéria prima para obter o polímero. O monômero após a reação de polimerização, que é realizada com auxílio de iniciadores, se transforma em polímero.

Pelos resultados obtidos com PMT 10 e PMT 11 as dispersões de poliuretano, apesar de serem fáceis de impregnar, não devem ter o índice de refração almejado (1,56). Experimentos futuros estão previstos com outras dispersões de poliuretano, visto que o campo de poliuretanos é muito vasto e versátil.

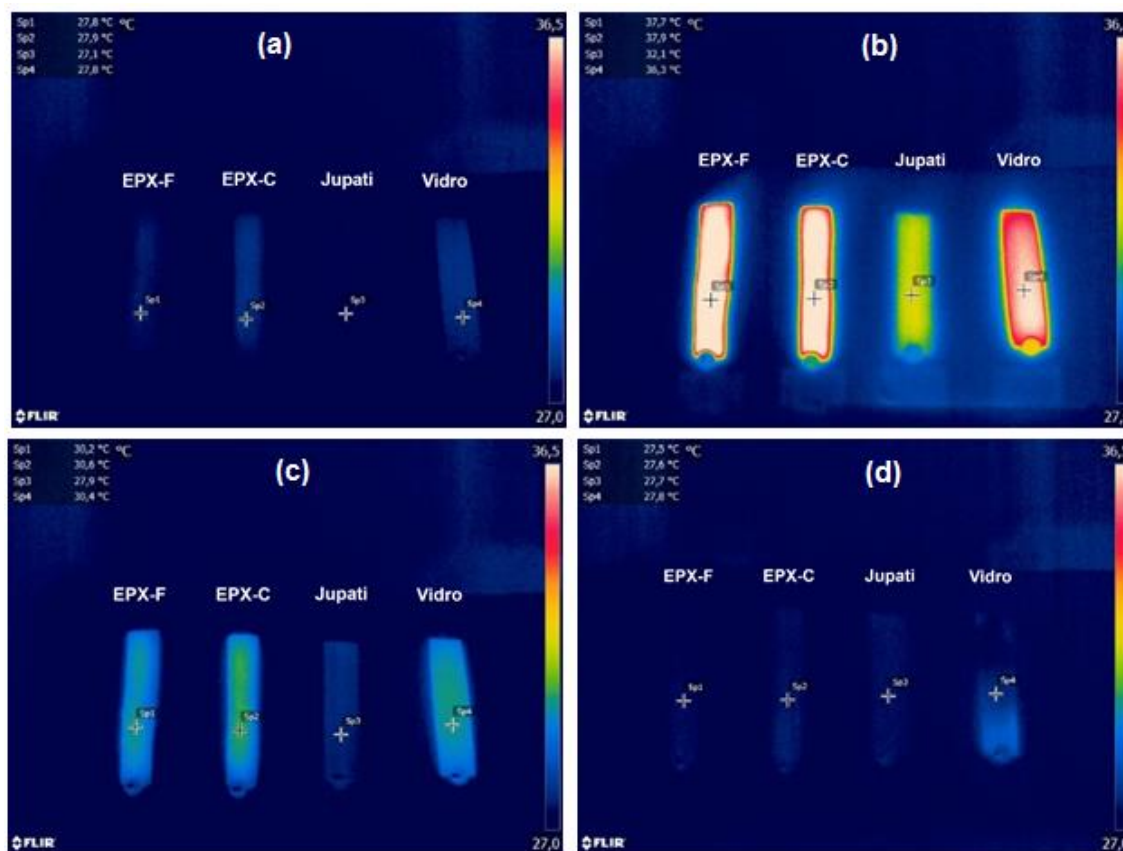
5.3 TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO (IRT)

A termografia de infravermelho ainda é uma técnica emergente no campo dos ensaios não-destrutivos e se apresenta como uma importante ferramenta devido a sua versatilidade e eficiência para estudos térmicos de diferentes naturezas (MADRUGA et al., 2010; BARREIRA; ALMEIDA; DELGADO, 2016). São vários os métodos utilizados para aplicação da termografia, sendo os mais utilizados o método ativo e passivo. Segundo Leicht (2018), para a termografia ativa uma fonte adicional externa de aquecimento ou refrigeração é necessária, e normalmente sua principal aplicação é realizada em laboratório e sob condições controladas. Nos sistemas passivos nenhuma estimulação artificial é utilizada, devendo existir apenas uma diferença de temperatura entre o objeto em estudo e o meio no qual ele está inserido, que frequentemente se encontra em temperatura mais elevada. A análise pelo método passivo conta com as condições naturais do material em estudo e do seu entorno, sendo o calor do sol um fator determinante. Ambas as técnicas de termografia passiva ou ativa fornecem resultados qualitativos ou quantitativos dependendo do tipo de análise desejada (HART, 1991).

Experimentos com termografia ativa foram realizados nas amostras impregnadas sob ultrassom com resina epóxi (EPX-C e EPX-F), usando Jupati *in natura* e vidro comum como amostras controle. As quatro amostras possuíam as mesmas dimensões (10 x 2,0 x 0,3 cm). As amostras foram colocadas no interior da mesma estufa pré-aquecida à 40 °C por um período de 10 min. Decorrido o tempo dentro da estufa, as amostras foram retiradas e colocadas sobre uma placa isolante de EPS, e as imagens foram imediatamente captadas pela termocâmera. Também foram captadas imagens antes do aquecimento e após 5 min e 10 min da retirada da estufa (resfriamento). A **Figura 59** mostra as imagens termográficas do experimento e as temperaturas medidas pela câmera termográfica aparecem na **Tabela 4**.

É importante ressaltar que, apesar de todas as vantagens, medições feitas pela técnica IRT dependem muito do ambiente circundante. Ou seja, os dados de temperatura derivados dos termogramas sofrem flutuações inevitáveis em condições experimentais (LAHIRI et al., 2012).

Figura 59 - Imagens termográficas das amostras: (a) início do experimento, (b) 10 min, (c) 20 min e (d) 30 min.



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

Tabela 4 - Valores de temperatura (°C) medidos pela câmera termográfica

	EPX-F	EPX-C	Jupati	Vidro
Início	27,9	27,8	27,1	27,8
10 min aquecimento	37,9	37,7	32,1	36,3
Diferença de temperatura	10	9,9	5,0	8,5
5 min resfriamento	30,6	30,2	27,9	30,4
10 min resfriamento	27,6	27,5	27,7	27,8

Temperatura ambiente: Max/Min = 36,5/27,0.

Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

De acordo com os valores apresentados na Tabela 4, é possível supor que a condutividade térmica das amostras impregnadas (amostras EPX-F e EPX-C) está maior do que do vidro.

A condutividade térmica (κ) é a propriedade intrínseca de um material, que relaciona sua capacidade de conduzir calor. Desta maneira, materiais de com alta condutividade térmica são utilizados como dissipadores de calor e materiais de baixa condutividade térmica são utilizados como isolamentos térmicos. Esta propriedade, que depende da temperatura do

sistema (ΔT), pode ser estudada a partir da Lei de Fourier que diz que a quantidade de calor (Q) que flui é inversamente proporcional à espessura do condutor (L). A quantidade de calor que flui é proporcional à área A de seção transversal do condutor. A quantidade de calor que flui é proporcional ao intervalo de tempo (Δt) considerado na condução. Analiticamente, a lei de Fourier, ou lei da condução térmica, pode ser expressa pela equação 8.

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{\kappa A \Delta T}{L} \quad (8)$$

Logo, a condutividade térmica pode ser definida pela equação 9.

$$\kappa = \frac{QL}{A \Delta t \Delta T} \quad (9)$$

A unidade no SI para a condutividade térmica é $\left(\frac{W}{m K}\right)$, na qual w é watt; m é metro e K é Kelvin.

A **Tabela 5** apresenta valores aproximados para κ , encontrados na literatura.

Tabela 5 - Valores aproximados de κ (27 °C) para os materiais usados

Material	Condutividade térmica (κ)
Vidro comum	0,72-0,86
Madeira	0,12-0,04
Epóxi	0,30
Ar	0,024

Fonte: Domínio público (2021).

Portanto, pelos valores da Tabela 4 pode-se estimar que a magnitude da condutividade térmica das amostras seguiria a seguinte ordem:

$$\text{Jupati } in \text{ natura} < \text{Vidro} < \text{EPX-C} < \text{EPX-F}$$

Pesquisas desenvolvidas por Zhu *et al.*, (2016b); Fink, (1992); Padadopoulos, (2005) mostraram que o vidro possui uma condutividade térmica mais alta que a madeira *in natura*. Por outro lado, Tais resultados são contrários aos resultados apresentados por Montanari *et al.* (2019) que afirma que a amostra de vidro levou 20 segundos para atingir a temperatura da

superfície aquecida a 60 °C, enquanto a madeira transparente, por ele desenvolvida, levou 210 segundos para atingir a mesma temperatura.

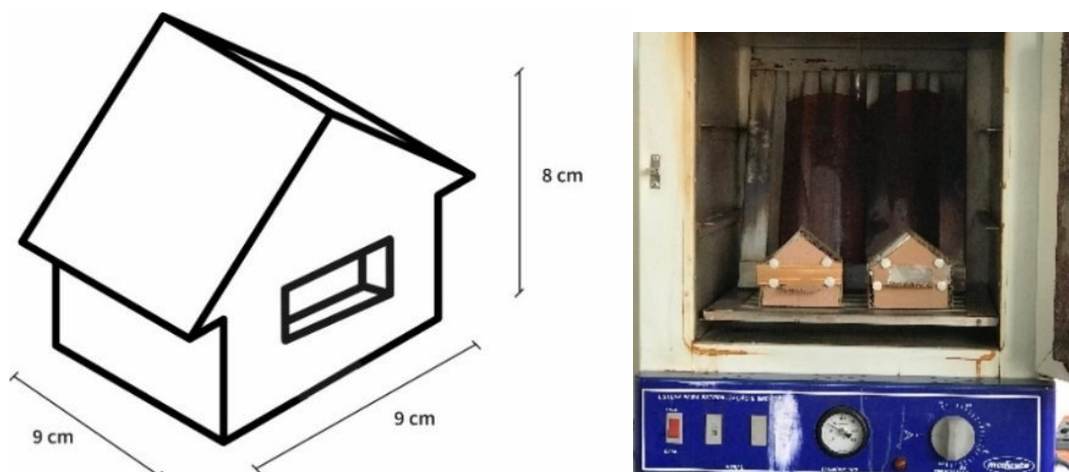
Segundo Takagi *et al.* (2007), os dados de condutividade térmica para densidade zero correspondem aos do ar. A condutividade térmica de compósitos obtidos com fibras vegetais aumenta gradualmente conforme a densidade do material aumenta. Em outras palavras, a condutividade térmica dos compósitos depende muito de sua densidade, como é o caso dos materiais isolantes térmicos convencionais.

Em vista disso, o desempenho dos compósitos (amostras EPX-F e EPX-C) foi atribuído à redução da porosidade natural da madeira pelo revestimento de resina epóxi. Tal resultado indica que não houve impregnação da resina, ao contrário a madeira foi recoberta pela resina, conforme foi comprovado pelas imagens de MEV. Inversamente, a incorporação de pó de madeira de pinho resultou na redução da condutividade térmica de resina epóxi e com isso melhorou sua capacidade de isolamento térmico (MOHAPATRA *et al.*, 2014).

Apesar disso, para materiais a base de madeira, além da densidade, a condutividade térmica aumenta com o aumento da temperatura e do teor de umidade (SONDEREGGER e NIEMZ, 2009). Portanto, a impregnação da madeira com resina pode levar a uma redução de absorção d'água pela madeira, compensando pelo menos parcialmente o aumento da densidade.

O método de termografia ativa também foi utilizado para comparar o desempenho térmico do pecíolo de Jupati *in natura* com o do vidro comum, a partir do aquecimento do material em estufa aquecida a 40 °C. Para tanto, foram construídos dois protótipos de papelão modulado, simulando a geometria de uma casa, em escala reduzida, revestida internamente com poliestireno expandido (EPS). O protótipo possui dimensões de 0,9 x 0,9 x 0,8 m (largura, profundidade e altura), e com aberturas de 0,2 x 0,4 m, conforme esquema da **Figura 60**. O intuito do protótipo foi avaliar se esses materiais (Jupati *in natura* e vidro) apresentavam alguma diferença de temperatura quando aquecidos em estufa à 40 °C conforme estudos de Montanari *et al.*, (2019).

Figura 60 - Dimensões do protótipo construído para experimentos de IRT.

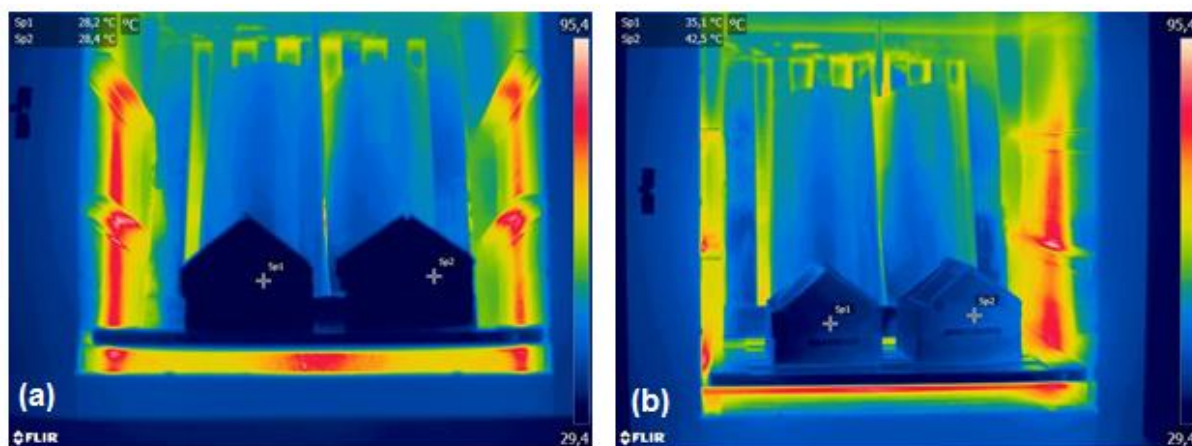


Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

Para simular a aplicação do material em janelas, as amostras de madeira Jupati *in natura* e de vidro, foram colocadas nas aberturas dos protótipos que foram colocados dentro da estufa durante 15 min. Antes de serem colocados na estufa as temperaturas foram registradas. Decorrido esse tempo a estufa foi aberta e as imagens térmicas foram imediatamente tomadas com os protótipos ainda no seu interior. Nesse momento é importante ressaltar que, apesar das vantagens do uso da técnica de termografia infravermelha, deve-se considerar que os fatores externos influenciam nas medições, ou seja, os dados de temperatura derivados dos termogramas sofrem influências inevitáveis das condições experimentais (LAHIRI et al., 2012), nesse sentido, tentou-se controlar tais fatores pelo uso da estufa.

A **Figura 61** mostra as imagens termográficas dos protótipos, no momento em que foram colocados dentro da estufa (a), e após 15 minutos de aquecimento dentro da estufa (b). A escala cromática do lado esquerdo dos termogramas, mostram as temperaturas máxima (95,4 °C) e mínima (29,4 °C) registradas no início do experimento, e após 15 minutos de aquecimento, percebe-se que elas se mantêm estáveis durante o experimento. As temperaturas foram tomadas nos (pontos de leitura), sendo 28,2 °C na madeira de Jupati *in natura* e 28,4 °C no vidro. Após 15 minutos as temperaturas foram de 35,1 °C e 42,5 °C respectivamente.

Figura 61 - Imagens termográficas das amostras em estufa à 40 °C: (a) medição inicial (Jupati 28,2 e vidro 28,4 °C) e (b) medição após 15 min na estufa (Jupati 35,1 e vidro 42,5 °C). Temperatura máxima 95,4 e mínima 29,4 °C



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

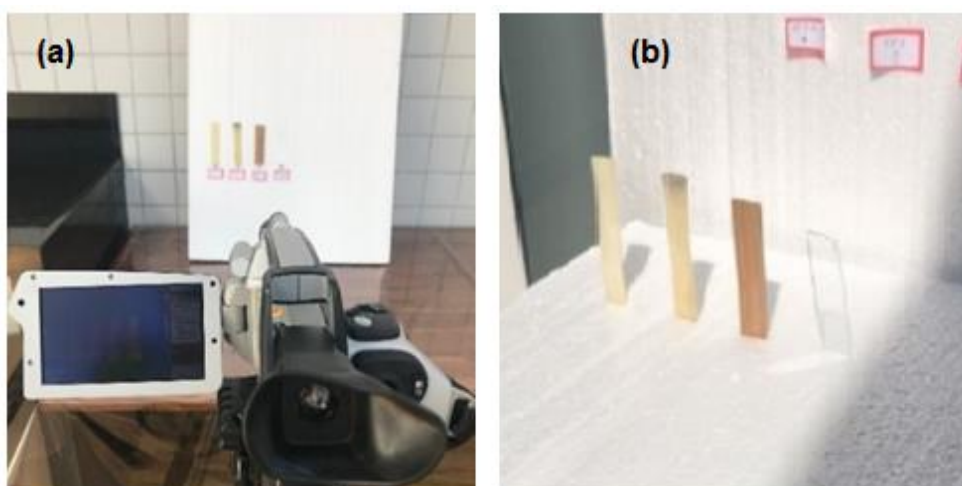
Tais resultados mostram um ganho de calor de 6,9 °C na madeira *in natura* e de 14,1 °C no vidro. Estes resultados corroboram com os experimentos realizados Montanari *et al.* (2019), que após colocar duas amostras (vidro e madeira transparente) em contato com uma superfície aquecida a 60 °C a amostra de vidro em 20 segundos atingiu a temperatura da superfície ao passo que a madeira transparente levou 210 segundos para atingir a mesma temperatura. Desta forma, o experimento com os protótipos, mostra que o material Jupati *in natura* possui capacidade de armazenamento de calor e propriedade de termorregulação melhor do que a do vidro, ou seja, o vidro aqueceu 7,2 °C a mais do que a madeira no mesmo período e nas mesmas condições térmicas. Essa diferença entre o vidro e a madeira pode ser atribuída à uma menor condutividade do Jupati *in natura* e a sua capacidade de absorver e armazenar energia térmica. Portanto, em relação aos valores de condutividade térmica, o experimento confirmou que:

$$\text{Jupati } in \text{ natura} < \text{Vidro}$$

Considerando que o comportamento dos materiais é bastante complexo (KHOUKHI, 2018) e que o estudo térmico de materiais necessita de muitos cuidados nas análises (LUCCHI, 2018), foi feito um estudo comparativo entre os materiais propostos EPXC e EPXF, o pecíolo de Jupati *in natura* e o vidro utilizando a termografia passiva e submetendo os materiais a insolação direta.

No início do teste as amostras permaneceram à sombra em local fresco e ventilado por um período de uma hora para estabilização da temperatura, e então foram obtidas imagens térmicas. Na sequência as amostras foram expostas ao sol por um período de 30 minutos (10:30 as 11:00 h), e as medições de temperaturas foram realizadas a cada 10 minutos. Utilizou-se para as análises uma emissividade de 0,95, a temperatura refletida foi de 20 °C e a distância da câmera ao objeto foi de 0,80 m (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016). As amostras foram dispostas na seguinte ordem (da esquerda para a direita) amostra de EPXF e EPXC, Jupati *in natura* e vidro (**Figura 62**).

Figura 62 - Posicionamento das amostras durante o experimento de termografia passiva: (a) antes do teste e (b) sob insolação



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

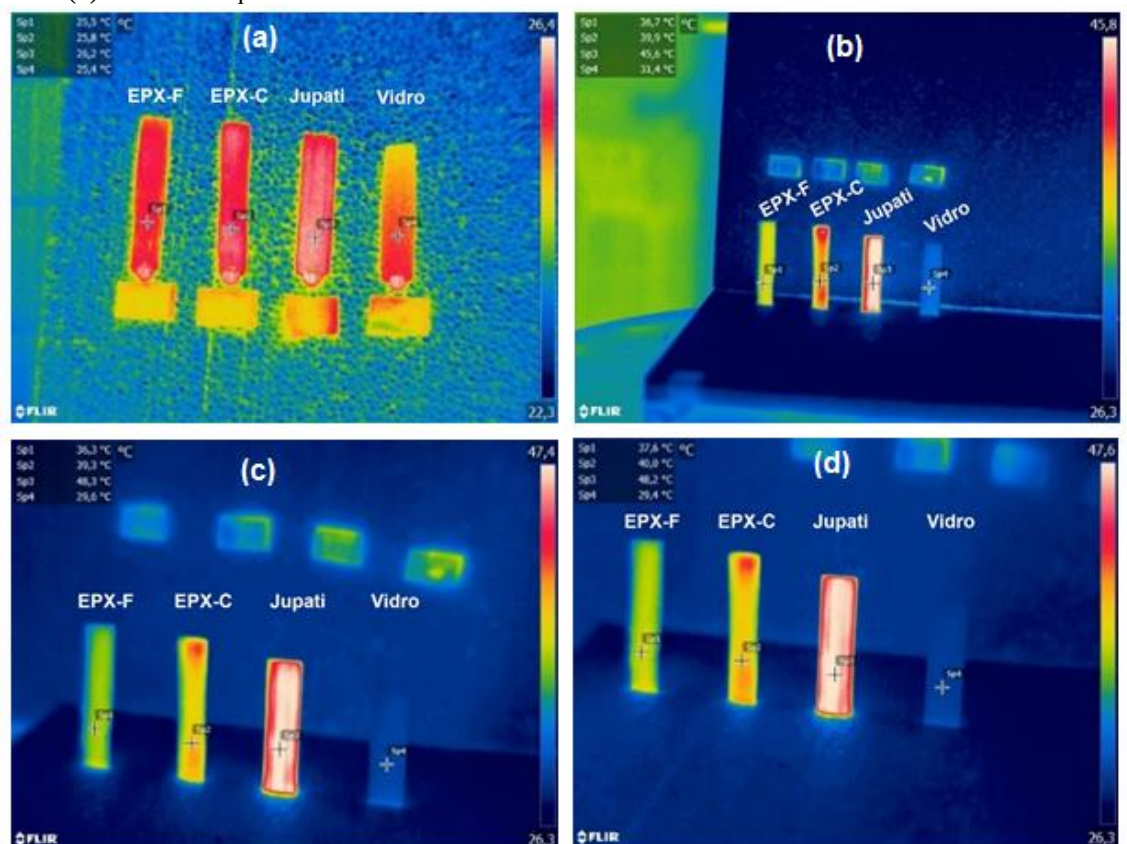
Existem três maneiras pelas quais a energia radiante que atinge um objeto pode ser dissipada: absorção, transmissão e reflexão. As frações da energia radiante total que estão associadas a cada um desses modos de dissipação são chamadas de absortividade (α), transmissividade (σ) e refletividade (ρ) do corpo (USAMETIAGA *et al.*, 2014).

Os materiais, semitransparentes ou translúcidos, quando expostos a radiação solar diretas possuem capacidade de transmitir a radiação solar mais facilmente, enquanto os materiais opacos são incapazes de transmitir a radiação, contudo, eles estão sujeitos a um ganho de calor, que está diretamente ligado à intensidade da radiação incidente e as propriedades térmicas desse material (CALLISTER, 2018; INCROPERA; DEWITT, 2014; FROTA; SCHIFFER, 2007; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016).

O vidro comum, material transparente, possui valores de σ , α e ρ de 0,85, 0,07 e 0,08, respectivamente. Isso significa que a transparência do vidro permite a passagem dos raios solares que aquecem o ambiente (NOVO *et al.*, 2014).

Foi realizada uma análise qualitativa das imagens termográficas da **Figura 63**, tomando como base a escala de cores do lado direito dos termogramas, onde observa-se que a madeira de Jupati *in natura* e as amostras de EPXC e EPXF mostraram as temperaturas mais altas em relação ao vidro.

Figura 63 - Amostras sob incidência solar: (a) início do experimento, (b) 10 min de aquecimento, (c) 20 min de aquecimento e (d) 30 min de aquecimento



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

Os valores de temperatura medidos pela câmera termográfica sob insolação natural estão apresentados na **Tabela 6**.

Tabela 6 - Valores de temperatura (°C) sob insolação natural medidos pela câmera termográfica.

	EPX-F	EPX-C	Jupati	Vidro	T _{amb}
Início	25,5	25,8	26,2	25,4	26,4/22,3
10 min	36,7	29,9	45,6	31,4	45,8/26,3
20 min	36,3	39,3	48,3	29,6	47,4/26,3
30 min	37,6	40,0	48,2	29,4	47,6/26,3
Diferença de temperatura	12,1	14,2	22,0	4,0	

Temperatura ambiente (T_{amb}): Max/Min (°C)

Fonte: Desenvolvido pela autora (2021).

O pecíolo de Jupati *in natura* foi o material que mais absorveu a radiação solar, mostrando ser um material isolante, enquanto o vidro foi o que mais transmitiu a radiação, mostrando ser um dissipador de calor (CALLISTER, 2018; INCROPERA; DEWITT, 2014).

Nesse sentido, pode-se afirmar que os materiais propostos apresentam comportamento térmico mais próximo da madeira do que do vidro comum, no entanto a sua transparência ficou mais próxima do vidro do que da madeira. Assim, a madeira, por ser um isolante natural devido a sua característica anisotrópica e pela presença de bolsas de ar na sua estrutura da célula (YU et al., 2011; KAWASAKI; KAWAI, 2006), se mostra um potencial substituto do vidro a partir do momento que se possa alcançar a transparência sem comprometer suas propriedades térmicas.

5.4 PROPOSTA DE APLICAÇÃO

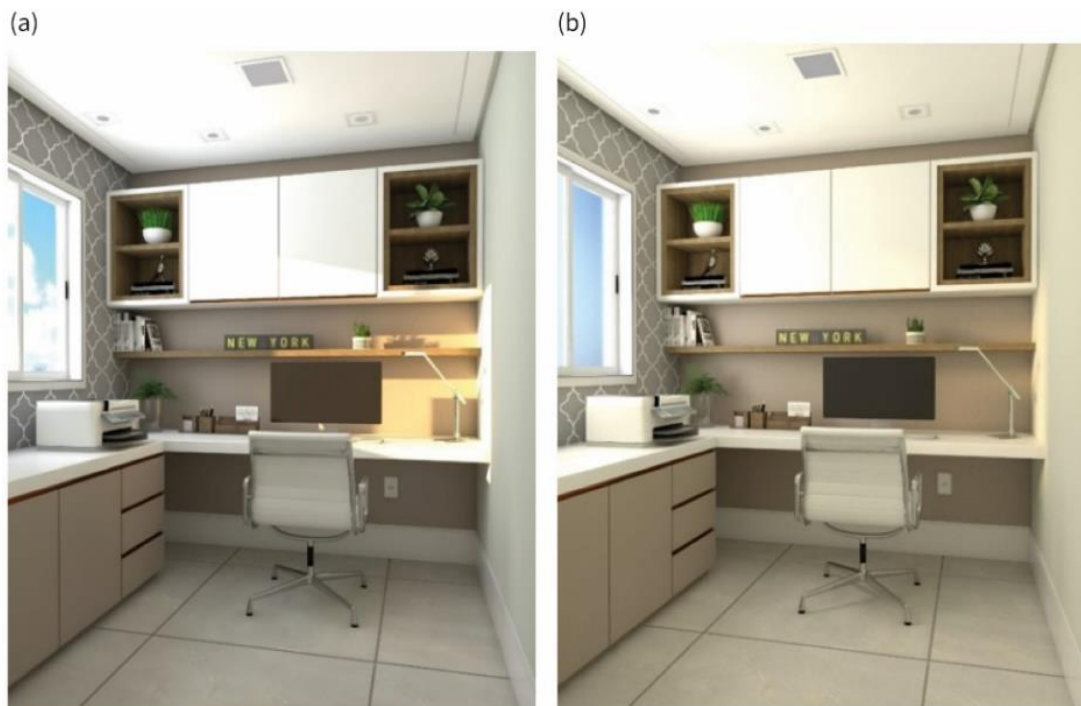
As vantagens funcionais apresentadas na literatura da madeira transparente perante o vidro na aplicação de janelas, motivou o direcionamento da presente pesquisa para tal aplicação. Com caráter ilustrativo, foi feita uma simulação do comportamento em aspectos visuais do compósito transparente da presente pesquisa em um ambiente fictício em 3D.

Na **Figura 64a** demonstra-se a luz incidente no ambiente atravessando a janela de vidro, é possível notar como ela se comporta incidindo de forma direta no ambiente, além de questões de pouca difusão da luz no ambiente, tal comportamento do tipo de incidência certamente geraria um desconforto térmico devido a exposição direta da luz solar na pele.

Já na **Figura 64b**, está ilustrado a simulação do que seria o comportamento da luz solar incidente na janela de madeira transparente: ao penetrar no compósito, a luz se espalha devido as interfaces internas, ou seja, a morfologia das filhas que se mantêm após os tratamentos de remoção da lignina e impregnação do polímero, por esse motivo o material faz com que haja um espalhamento da mesma no ambiente possibilitando um melhor

gerenciamento lumínico natural por meio do efeito antirreflexo do compósito. Além disso, tais aspectos também possibilitam o espalhamento do calor devido a sua característica térmica anisotrópica associada ao alinhamento das células da madeira, esta propriedade faz com que o compósito tenha uma maior resistência ao fônon ao percorrer a microestrutura da fibra gerando o efeito de espalhamento da temperatura (LI *et al.*, 2016a).

Figura 64 - Simulação de janela em um ambiente fictício sendo: (a) uma janela com vidro e (b) janela com a simulação de aplicação da madeira transparente



Fonte: Render e modelagem executado pela designer Alessandra Santos (2021).

Buscar-se-á desta forma, promover por meio da multifuncionalidade proporcionar maior conforto ambiental ao que se refere a fatores lumínicos e térmicos nos ambientes em que haja sua aplicação.

6 CONCLUSÕES

A proposta de utilização do pecíolo de Jupati na obtenção do compósito transparente, se deu principalmente por se tratar de uma alternativa de utilização desta parte da palmeira que é descartada durante a produção artesanal na comunidade de São Sebastião da Boa Vista localizado no Marajó no Estado do Pará, como uma proposta de substituição as madeiras que são utilizadas segundo a literatura. No processo de obtenção do material, também se avaliou possibilidades de otimizar e simplificá-lo, por meio da comparação dos resultados da impregnação por ultrassom e a vácuo. Após a obtenção das amostras, foi possível determinar que a impregnação a vácuo gerou melhores resultados, sendo possível obter amostras translúcidas de Jupati com poliuretano (chegando a 46% de transmitância), enquanto no processo por ultrassom obteve-se amostras “plastificadas”, ou seja, não houve a efetivação do preenchimento dos vazios da fibra gerados pela remoção da lignina, mas apenas um recobrimento da amostra com a resina epóxi. A resina utilizada na impregnação por ultrassom foi descartada pela sua característica termofixa, que poderia danificar a bomba a vácuo que após análise se mostrou o melhor método para impregnação do polímero nas amostras deslignificadas.

Neste contexto, é possível sistematizar as principais conclusões da pesquisa nos seguintes pontos:

1. as amostras impregnadas por meio do ultrassom não apresentaram transparência e/ou translucidez. Acredita-se que não houve o fornecimento de energia suficiente para a efetivação do procedimento de impregnação do polímero nas fibras do pecíolo deslignificado;
2. após a impregnação com a resina epóxi ocorreu a contração das amostras, reduzindo consideravelmente de tamanho, tal comportamento pode ser explicada pela formação de ligações de hidrogênio entre as moléculas de celulose em detrimento da interação da celulose com a resina;
3. as amostras PMT 10 e PMT 11 obtidas pelo processo de impregnação a vácuo utilizando o PU alcançaram certa translucidez, o que comprovou a maior efetividade do processo de compatibilização das interfaces, sugerindo que o polímero de fato preencheu de forma considerável os poros da madeira deslignificada após o procedimento;
4. Por meio das imagens de MEV apresentadas foi possível visualizar, ao contrário das amostras que foram impregnadas por ultrassom, que a amostra PMT 10 preservou a morfologia das fibras do Jupati in natura;

5. o brilho no compósito transparente é removido e transmitido de forma difusa quando comparado com o comportamento da luz solar através do vidro;
6. segundo a literatura as resinas epóxi costumam ter índice de refração adequado entre 1,54 e 1,56. No entanto, tal resina apresenta alguns inconvenientes, como por exemplo: alta viscosidade, o que dificulta a impregnação, e podem ser carcinogênicas;
7. ao considerar os resultados obtidos com PMT 10 e PMT 11, as dispersões de poliuretano, apesar da facilidade apresentada no momento da impregnação, não devem comportar o índice de refração almejado (1,56), desta forma, considera-se novos experimentos com outras dispersões, devido ao seu vasto campo de poliuretanos e sua versatilidade;
8. a condutividade térmica das amostras impregnadas (amostras EPX-F e EPX-C) se mostrou maior do que do vidro no teste com o aquecimento na estufa;
9. o desempenho dos compósitos (amostras EPX-F e EPX-C) com relação a condutividade térmica foi atribuído à redução da porosidade natural da madeira pelo revestimento de resina epóxi. Tal resultado indica que não houve impregnação da resina, ao contrário a madeira foi recoberta pela resina, conforme foi comprovado pelas imagens de MEV;
10. no teste com insolação natural o pecíolo de Jupati *in natura* foi o material que mais absorveu a radiação solar, mostrando ser um material isolante, enquanto o vidro foi o que mais transmitiu a radiação, mostrando ser um dissipador de calor;
11. os materiais propostos (EPX-F e EPX-C) apresentaram comportamento térmico mais próximo da madeira do que do vidro comum quando analisados após a insolação natural, no entanto a sua transparência ficou mais próxima do vidro do que da madeira.

Em suma, diante dos desdobramentos da pesquisa, sua grande contribuição tratou-se da ampla revisão da literatura nas pesquisas que vem sendo desenvolvidas para obtenção da madeira transparente, além disso, proporcionar o diálogo entre a área de desenvolvimento de novos materiais com o design e seu caráter social e aplicado. Questionar e investigar novas possibilidades de métodos para obtenção de materiais, comporta em si o caráter inovador que se tornou demanda global diante das problemáticas que tomaram espaço nas discussões que envolvem sustentabilidade, qualidade de vida e necessidades humanas dentro dos limites ambientais, sociais e econômicos. Considerar o fluxo da inovação dentro de sua

complexidade, é o que justifica a necessidade da transdisciplinaridade entre as áreas sociais e exatas na proposição de novas pesquisas, visando de fato o avanço da ciência e pesquisas científicas em benefício da sociedade e meio ambiente o qual se habita.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de possíveis desdobramentos futuros para a pesquisa, sugere-se as seguintes temáticas para avanço e complemento das discussões levantadas a partir de suas considerações finais:

1. avaliação de compatibilidade do Jupati deslignificado com outras dispersões de poliuretano com o intuito de melhorar o processo de impregnação e consequente aumento de seu grau de transparência;
2. obtenção de informações mais precisas no que concerne ao índice de refração do Jupati e dos polímeros que serão impregnados, proporcionando assim maior precisão de eficácia no processo de compatibilização das interfaces dos materiais em questão;
3. ensaio de impacto nas amostras obtidas para comparação de desempenho mecânico entre o compósito e o vidro;
4. análise de mudança de cor do material quando exposto aos raios UV (teste de amarelamento);
5. análise de absorção de água da amostra transparente;
6. avaliação de possibilidades de beneficiamento do compósito transparente no que concerne a proteção UV;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, U. P. **Raman imaging to investigate ultrastructure and composition of plant cell walls:** distribution of lignin and cellulose in black spruce wood (*Picea mariana*). *Planta*, 224 (2006) 1141–1153.

AL-HOMOUD, S. M. **Performance Characteristics and Practical Applications of Common Building Thermal Insulation Materials.** *Building and Environment*, 40 (2005) 353-366.

ASHBY, Michael; JOHNSON, Kara; tradução MARQUES, Arlete Simille. **Materiais e design:** arte e ciência da seleção de materiais no design de produto. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

BAGAVATHIAPPAN, S; LAHIRI, B B; SARAVANAN, T; PHILIP, JOHN JAYAKUMAR, T. Infrared Physics & Technology Infrared thermography for condition monitoring – A review. **Infrared Physics and Technology**. 60 (2013) 35-55 p.

BAJPAI, P. **Environmentally benign approaches for pulp bleaching**, Elsevier, 2012. 416p.

BALL, D. W. **Físico-Química**, Vol. 2; Thomson: São Paulo, SP, 2006.

BARBOSA, Paula Gloria. **Uma contribuição para o design do conforto:** avaliação da difusividade térmica de blocos cerâmicos e de concreto utilizando a termografia infravermelha. 2014, 146 p. Dissertação (Mestrado em Design). Universidade do Estado de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Design. Belo Horizonte, 2014.

BARREIRA, E., ALMEIDA, R. M. S. F., & DELGADO, J. M. P. Q. (2016). Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components. **Construction and Building Materials**, 110, 251–269.

BHAT, Ritesh; MOHAN, Nanjangud; SHARMA, Sathyashankara; PRATAP, Ashu; KENI, Agastya; Prasad; SODANI, Dev. **Mechanical testing and microstructure characterization**

of glass fiber reinforced isophthalic polyester composites. Journal of Materials Research and Technology 8 (2019) 3653-3661.

BISTAGNINO, L. Design sistêmico: uma abordagem interdisciplinar para a inovação. Trad. Lia Krucken. In: **Cadernos de Estudos Avançados em Design.** MORAES, D. KRUCKEN, L. Barbacena, MG: EDUEMG, 2009.

BRANZI, Andrea. **Modernità debole ediffusa.** Il mondo del progetto all'inizio del XXI secolo. MAilano: Ed. Skira, 2006.

BRIDGER, R.S. **Introduction to ergonomic.** 2. Ed London: Taylor & Francis, 2003. 548 p.

BROEGA, Ana Cristina; SILVA, Maria Elisabete. O conforto total do vestuário: design para os cinco sentidos. In: **Actas de Diseño**, v. 5, n. 9, p. 59-64, 2010.

CALADO, F. A. R. **Sistema de visão multiespectral para uma plataforma robótica de inspeção termográfica em subestação de energia.** 2013. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais:** uma introdução. 5°. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2018. 589 p.

CAPRA, F. **As conexões ocultas:** Ciência para uma vida sustentável. São Paulo: IDESA, 2005.

CARDOSO, Rafael. **Design para um mundo complexo.** São Paulo: Cosac Naify, 2013.

CARTER, H. A. **The Chemistry of Paper Preservation: Part 2. The Yellowing of Paper and Conservation Bleaching.** Journal of Chemical Education 73 (1996) 1068.

COELHO, Luiz Antonio. **Conceitos chave em design.** São Paulo: Ed. PUC-Rio, 2008.

CONCEIÇÃO, R. V. et al. Ethanolysis Optimisation of Jupati (*Raphia taedigera* Mart.) Oil to Biodiesel Using Response Surface Methodology Leyvison. **Chem. Soc.**, Vol. 26, No. 7, 1321-1330, 2015.

COTRIM, M. de A. P. **Design de tecidos funcionais: uma visão inovadora sobre complexação de óleo de capim limão (*Cymbopogon citratus*) com -ciclodextrina.** Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Design, Universidade do Estado de Minas Gerais. Minas Gerais, p. 102. 2015.

EICHHORN, SJ et al. **Review: current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites.** Journal of Materials Science. 2010; Vol. 45. pp. 1-33.

FANG, Z.; ZHU, H.; YUAN, Y.; HA, D.; ZHU, S.; PRESTON, C.; HU, L. **Novel Nanostructured Paper with Ultrahigh Transparency and Ultrahigh Haze for Solar Cells.** Nano Letters, 14 (2014) 765–773.

FINK, Siegfried. **Transparent Wood – A New Approach in the Functional Study of Wood Structure.** Holzforschung 46 (1992) 403-408.

FOURT, L; HOLLIES, NRS (1970), **Clothing: Comfort and Function**, Marcel Dekker, Inc., New York, ISBN 0-8247-1214-5.

FROTA, A.B.; SCHIFFER, S.R. **Manual do Conforto Térmico.** 8. ed., São Paulo: Studio Nobel, 2007. 43 p.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4ªed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2002.

GINDL-ALTMUTTER, W.; OBERSRIEBNIG, M.; VEIGEL, S.; LIEBNER, F. **Compatibility between Cellulose and Hydrophobic Polymer Provided by Microfibrillated Lignocellulose.** ChemSusChem, 8 (2014) 87–91.

GONÇALVES, Maria do Carmo. Microscopia eletrônica de varredura. In: CANEVAROLO JUNIOR, S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros.** São Paulo: Artliber, 2007.

HANSEN, James et al. Global surface temperature change. **Reviews of Geophysics**, v. 48, n. 4, 2010.

HABIBI, Youssef. Key advances in the chemical modification of nanocelluloses. **Chemical Society Reviews**, v. 43, n. 5, p. 1519-1542, 2014.

HART, J. M. **A practical guide for infra-red termography for building surveys**. Garston, Watford, BRE, 1991.

HEWITT, Paul G. **Física Conceitual**. Tradução de Trieste Freire Ricci; Revisão técnica de Maria Helena Gravina. 12ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

INCROPERA, F.P; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 7 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2014.

IIDA, Itiro; GUIMARÃES, Lia Buarque de Macedo. **Ergonomia: Projeto e Produção**. 3ed. São Paulo: Blucher, 2016.

JARDIM, Ninon Rose. **Mulheres entre enfeites & caminhos: cartografia de memórias em saberes e estéticas do cotidiano no Marajó das florestas (s.s. da boa vista - pa)** / Ninon Rose Tavares Jardim. Belém, PA: - 2013.

JEREMIC, D.; GOACHER, R. E.; YAN, R.; KARUNAKARAN, C.; MASTER, E. R. **Direct and up-close views of plant cell walls show a leading role for lignin-modifying enzymes on ensuing xylanases**. *Biotechnology for Biofuels*, 7 (2014).

JÚNIOR, Elias Hage. Resistência ao Impacto. In: In: CANEVAROLO JUNIOR, S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2007.

KARANA, E.; HEKKERT, P.; KANDACHAR, P. Meanings of materials through sensorial properties and manufacturing processes. **Materials & Design**, v.30, issue 7, p. 2778–2784, August 2009.

KABIR, M. M; WANG, H.; LAU, K. T.; CARDONA, F. Effects of Chemical treatments on hemp fiber structure. **Applied Surface Science**, v. 276, p. 13-23, 2013.

KHOUKHI, M. The combined effect of heat and moisture transfer dependent thermal conductivity of polystyrene insulation material: Impact on building energy performance. **Energy & Buildings**, v. 169, p. 228–235, 2018.

KATUNSKÝ, D; KANÓCZ, J; KARLA, V. Structural elements with transparente wood in architecture. **International Review of Applied Sciences and Engineering**, v. 9, n. 2, p. 101-106, 2018.

KAWANO, Yoshio. Espectroscopia de absorção no infravermelho. In: CANEVAROLO JUNIOR, S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2007.

KAWASAKI, Tamami; KAWAI, Shuichi. Thermal insulation properties of wood-based sandwich panel for use as structural insulated walls and floors. **Journal of Wood Science**, v. 52, n. 1, p. 75-83, 2006.

KROEMER, K. H. E; GRANDJEAN, E. **Manual de ergonomia**: Adaptando o trabalho ao homem. Tradução de Lia Buarque de Macedo Guimarães. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

KRUCKEN, Lia. Competências para o design na sociedade contemporânea. In: **Cadernos de Estudos Avançados em Design**: Transversalidade. MORAES, Dijon; KRUCKEN, Lia. 2. ed. Belo Horizonte: EdUEMG, 2016. 29-39 p.

KRUCKEN, Lia. **Design e território**: Valorização de identidades e produtos locais. São Paulo: Studio Nobel, 2009.

LAHIRI, B.B; BAGAVATHIAPPAN, S; JAYAKUMAR, T; PHIPLIP, J. Medical applications of infrared thermography: a review. **Infrared Physics & Technology**, v. 55, n. 4, p. 221-235, 2012.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. [S.l.]: Eletrobrás/Procel, 2016.

LANA, Sebastiana Luiza Bragança. A complexidade dos métodos em design. In: **Cadernos de Estudos Avançados em Design: Método**. MORAES, Dijon De; CONSELHO, Rosemary Bom. Barbacena: EdUEMG, 2011. 53-65 p.

LEICHT, Heinrich et al. Active and passive thermography for defect detection in polymer joints. In: **Vortrag 14th Quantitative InfraRed Thermography Conference**. 2018. p. 25-28.

LI, Tian; ZHU, Mingwei; YANG, Zhi; SONG, Jianwei; DAI, Jiaqi; YAO, Yonggang; LUO, Wei; PASTEL, Glenn; YANG, Bao; HU, Liangbing. **Wood Composite as an Energy Efficient Building Material: Guided Sunlight Transmittance and Effective Thermal Insulation**. Advanced Energy Materials 6 (2016a).

LI, Yuanyuan; FU, Qiliang; ROJAS, Ramiro; YAN, Min; LAWOKO, Martin; BERGLUND, Lars. **Lignin-Retaining Transparent Wood**. ChemSusChem 10 (2017) 3445-3451.

LI, Yuanyuan; FU, Qiliang; YU, Shun; YAN, Min; BERGLUND, Lars. **Optically Transparent Wood from a Nanoporous Cellulosic Template: Combining Functional and Structural Performance**. Biomacromolecules 17 (2016b) 1358-1364.

LI, Yuanyuan; VASILEVA, Elena; SYCHUGOV, Ilya; POPOV, Sergei; BERGLUND, Lars. **Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges**. Advanced Optical Materials 6 (2018a) 1-14.

LI, Yuanyuan; FU, Qiliang; YANG, Xuan; BERGLUND, Lars. **Transparent wood for functional and structural applications**. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 376 (2018b) 1-15.

LI, Yuanyuan; YANG, Xuan; FU, Qiliang; ROJAS, Ramiro; YAN, Min; BERGLUND, Lars. **Towards centimeter thick transparent wood through interface manipulation**. Journal of Materials Chemistry A 6 (2018c) 1094-1101.

LOBACH, Bernd. **Design Industrial: Bases para a configuração dos produtos industriais.** Trad. Freddy Van Camp. São Paulo: Blucher Ltda., 2001.

LUCCHI, E. Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 3077–3090, 2018.

LV, S.; FU, F.; WANG, S.; HUANG, J.; HU, L. **Novel wood-based all-solid-state flexible supercapacitors fabricated with a natural porous wood slice and polypyrrole.** RSC Advances, 5 (2015) 2813–2818.

MADRUGA, F. J.; IBARRA-CASTANEDO, C.; CONDE, O. M.; LÓPEZ-HIGUERA, J. M.; MALDAGUE, X. Infrared thermography processing based on higher-order statistics. **NDT & E International**, v. 43, n. 8, p. 661–666, nov. 2010.

MALDAGUE, X. **Introduction to NDT by active infrared thermography.** Materials Evaluation, v. 6, p. 1060-1073, 2002.

MALISKA, Ana Maria. Microscopia eletrônica de varredura e microanálise. **Laboratório de caracterização microestrutural e análise de imagens. Florianópolis: Notas de aula**, p. 98, 2004.

MANZINI, E. Design para a inovação social e sustentabilidade: comunidades criativas. In: **Cadernos do Grupo Altos Estudos**, v.i. Organizações colaborativas e novas redes projetuais. Coordenação de tradução Carla Cipolla; equipe Elisa Spampinato, Aline Lys Silva. Rio de Janeiro: E-papers, 2008.

MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis.** Trad. Astrid de Carvalho. São Paulo: Ed. USP, 2011.

MASLOW, Abraham. **Introdução à Psicologia do Ser.** Rio de Janeiro: Livraria Eldorado, 1970.

MANOEL, A. F. et al. Efeitos do processo de branqueamento de fibras nativas do Pantanal. In: **Embrapa Pantanal-Artigo em anais de congresso (ALICE).** In: CONGRESSO

BRASILEIRO DE POLIMEROS, 13., 2015. Anais. Natal: Associação Brasileira de Polímeros, 2015., 2015.

MAURI, Francesco. *Progettare progettando strategia*. Milano: Ed. Dunob, 1996.

MICHEL, A.T; BILLINGTON, S.L. Characterization of poly-hydroxybutyrate films and hemp fiber reinforced composites exposed to accelerated weathering. **Polymer Degradation and Stability**. 97 (2012) 870-878 p.

MI, Ruiyu et al. A Clear, Strong, and Thermally Insulated Transparent Wood for Energy Efficient Windows. **Advanced Functional Materials**, v. 30, n. 1, p. 1907511, 2020.

MISSOUM, Karim; BELGACEM, Mohamed; BRAS, Julien. Nanofibrillated cellulose surface modification: a review. **Materials**, v. 6, n. 5, p. 1745-1766, 2013.

MOHAPATRA, Ramesh Chandra; MISHRA, Antaryami; CHOUDHURY, Bibhuti Bhushan. Measurement on thermal conductivity of pine wood dust filled epoxy composites. **American Journal of Mechanical Engineering**, v. 2, n. 4, p. 114-119, 2014.

MONTANARI, Céline, et al. Transparent wood for thermal energy storage and reversible optical transmittance. **ACS applied materials & interfaces**, v. 11, n. 22, p. 20465-20472, 2019.

MOON, R. J.; MARTINI, A.; NAIRN, J.; SIMONSEN, J.; YOUNGBLOOD, J. **Cellulose nanomaterials review**: structure, properties and nanocomposites. Chemical Society Reviews 40 (2011) 3941.

MORAES, Dijon de. **Metaprojeto**: o design do design. São Paulo: Editora Blucher, 2010.

MORAES, Dijon de. Design e complexidade. In: **Cadernos de Estudos Avançados em Design**: Transversalidade. MORAES, Dijon; KRUCKEN, Lia. 2. ed. Belo Horizonte: EdUEMG, 2016. 13-28 p.

MOURÃO, Nadja Maria. Sustentabilidade com resíduos vegetais na produção artesanal: uma prática de design sistêmico em Chapada Gaúcha. In: **Pensamentos em design: aspectos tangíveis e intangíveis da pesquisa**. RIBEIRO, Rita A. C.; SILVA, Sérgio Antônio (org.) Belo Horizonte: UEMG/PPGD, 2013.

MÜLFARTH, Roberta Consentino Kronka. Ensino e conforto ambiental: discussão sobre a inserção da ergonomia no processo de projeto/Teaching and environmental comfort: A discussion about the insertion of ergonomics in the design process. **Oculum Ensaios**, v. 15, n. 1, p. 171-182, 2018.

MÜLLER, U.; RÄTZSCH, M.; SCHWANNINGER, M.; STEINER, M.; ZÖBL, H. **Yellowing and IR-changes of spruce wood as result of UV-irradiation**. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology 69 (2003) 97–105.

NETO, Amir Borges Ferreira; CORRÊA, Wilson Luiz Rotatori; PEROBELLI, Fernando Salgueiro. Consumo de Energia e Crescimento Econômico: uma Análise do Brasil no período 1970-2009. **Análise Econômica**, v. 34, n. 65, 2016.

NIEMEYER, L. **Design no Brasil: Origens e instalação**. Rio de Janeiro: 2AB, 2007.136 p.

NOVO, M. M. M. et al. Fundamentos básicos de emissividade e sua correlação com os materiais refratários, conservação de energia e sustentabilidade. **Cerâmica**, v. 60, p. 22-33, 2014

OBORNE, D. **Ergonomics at work**. 3.ed. London: John Wiley & Sons, 1995.

OLIVEIRA, J.; POTIGUARA, R. C. V.; LOBATO, L. C. B. **Fibras vegetais utilizadas na pesca artesanal na microrregião do Salgado**, Pará. Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Ciências humanas, Belém, v. 1, n. 2, p. 113-127, maio-ago. 2006.

DE OLIVEIRA, Dhimitrius NPS et al. Enhancement of the Amazonian Açaí Waste Fibers through Variations of Alkali Pretreatment Parameters. **Chemistry & biodiversity**, v. 16, n. 9, p. e1900275, 2019.

OXMAN, Neri. Age of entanglement. **Journal of Design and Science**, 2016.

PAPADOPOULOS, A. M. **State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments**. Energy Build. 37 (2005) 77-86.

PEDRA, S. A. **Potencialidades da termografia infravermelha aplicada ao design do conforto térmico de alvenaria estrutural**. 2011, 100 p. Dissertação (Mestrado em Design). Universidade do Estado de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Design. Belo Horizonte, 2011.

PEREIRA, Paulo H. Fernandes; ROSA, Morsyleide de Freitas; CIOFF, Maria O. Hilário; BENINI, Kelly C. C. de Carvalho; MILANESE, Andressa C; VOORWALD, Herman J.Cornelis; MULINARI, Daniela Regina. **Vegetal fibers in polymeric composites: a review**. Polímeros, 25(1), 9-22, 2015.

PESCE, Celestino. 2009. **Oleaginosas da Amazônia**. Belém: s.n., 2009. Vol. II.

QIN, J.; LI, X.; SHAO, Y.; SHI, K.; ZHAO, X.; FENG, T.; HU, Y. **Optimization of delignification process for efficient preparation of transparent wood with high strength and high transmittance**. Vacuum, 158 (2018). 158–165.

QIN, X.; XIA, W.; SINKO, R.; KETEN, S. **Tuning Glass Transition in Polymer Nanocomposites with Functionalized Cellulose Nanocrystals through Nanoconfinement**. Nano Letters, 15 (2015) 6738–6744.

QIU, Zhe et al. Transparent wood bearing a shielding effect to infrared heat and ultraviolet via incorporation of modified antimony-doped tin oxide nanoparticles. **Composites Science and Technology**, v. 172, p. 43-48, 2019.

RAMOS, Eni; CALATRAVA, S.F.; JIMÉNEZ, L. **Bleaching with Hydrogen Peroxide**. A Review. Afinidad. 65 (2008) 366-373.

RHEINGANTZ, P. A. Uma pequena digressão sobre conforto ambiental e qualidade de vida nos centros urbanos. **Cidade & Ambiente**, Universidade Federal de Santa Maria, v. 1, n. 22, p. 35-58, 2001.

RUAS, Álvaro César. **Conforto térmico nos ambientes de trabalho**. Fundacentro, 1999.

SACHS, Ignacy. Desenvolvimento: includente, sustentável, sustentado. In: **Desenvolvimento: includente, sustentável, sustentado**. 2004. p. 151-151.

SALES, R. B. C. **Estudo de compostos de cimento portland utilizando o ensaio de frequência ressonante forçada e termografia**. 2008. 204f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte.

SALES, R. B. C.; MOTTA, S. R. F.; AGUILAR, M. T. P. O papel da seleção de materiais na criação da identidade do produto pelo design. In: **Caderno de Estudos Avançados em Design: Identidade**. Barbacena: Editora da Universidade do Estado de Minas Gerais, 2010. 101-115 p.

SAMSONINKOVA, Valeria et al. Peptide–Polymer Conjugates for Bioinspired Compatibilization of Internal Composite Interfaces: via Specific Interactions toward Stiffer and Tougher Materials. **Advanced Materials Interfaces**, v. 4, n. 1, p. 1600501, 2017.

SHEN, Xiaoping; XIE, Yanjun; WANG, Qingwen. Improved Acetylation Efficacy of Wood Fibers by Ionic Liquid Pretreatment. **BioResources**, v. 12, n. 1, p. 684-695, 2017.

SIAKENG, R. et al. Alkali treated coir/pineapple leaf fibres reinforced PLA hybrid composites: Evaluation of mechanical, morphological, thermal and physical properties. **eXPRESS Polymer Letters**, v. 14, n. 8, 2020.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia e elaboração de dissertação**. 4ª edição. Florianópolis: UFSC, 2005.

SJOSTROM, E. **Wood chemistry: fundamentals and applications**. Elsevier, 2013.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de Análise Instrumental**, 6ª ed., Bookman: São Paulo, SP, 2009.

SLATER, K. (1986), **The Assessment of Comfort**, J. Textile Inst., vol. 77, no 3, pp. 157-171.

SODRÉ, José Barbosa. **Morfologia das palmeiras como meio de identificação e uso paisagístico** / José Barbosa Sodré. Lavras, MG: [s.n], 2005.

SONDEREGGER, W; NIEMZ, P. Thermal conductivity and water vapour transmission properties of wood-based materials. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 67, n. 3, p. 313-321, 2009.

SOUZA, Elvanio Costa de et al. **Impactos das mudanças climáticas sobre o bem-estar relacionado à saúde no Brasil**. 2013.

TAKAGI, H; KAKO, S; KUSANO, K; OUSAKA, A. Thermal conductivity of PLA-bamboo fiber composites. **Advanced Composite Materials**, v. 16 n. 4, p. 377-384, 2007.

TAVARES, Felipe Fernando da Costa et al. Thermal treatment of açáí (*Euterpe oleracea*) fiber for composite reinforcement. **Polímeros**, v. 30, 2020.

THACKARA, J. **Plano B: o design e as alternativas viáveis em um mundo complexo**. São Paulo: Saraiva, 2008.

USAMENTIAGA, Rubén et al. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. **Sensors**, v. 14, n. 7, p. 12305-12348, 2014.

VASSÃO, Caio Adorno. **Metadesign: ferramentas, estratégias e ética para a complexidade**. São Paulo: Blucher, 2010.

VERMEER, Martin; RAHMSTORF, Stefan. Global sea level linked to global temperature. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 106, n. 51, p. 21527-21532, 2009.

VON BERTALANFFY, Ludwig. **Teoria Geral dos sistemas**. Petrópolis: Vozes, 1973.

WANG, S.; LU, A.; ZHANG, L. **Recent advances in regenerated cellulose materials**. *Progress in Polymer Science*, 53 (2016) 169–206.

WU, Jiamin; WU, Yan; YANG, Feng; TANG, Caiyun; HUANG, Qiongtao; ZHANG, Jilei. **Impact of delignification on morphological, optical and mechanical properties of transparent wood**. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 117 (2019) 324–331.

XIA, Qinqin et al. Solar-assisted fabrication of large-scale, patternable transparent wood. **Science Advances**, v. 7, n. 5, p. eabd7342, 2021.

XIAO, Ruirui et al. Thermogravimetric analysis and reaction kinetics of lignocellulosic biomass pyrolysis. **Energy**, v. 201, p. 117537, 2020.

YADDANAPUDI, H. S.; HICKERSON, N.; SAINI, S.; TIWARI, A. **Fabrication and characterization of transparent wood for next generation smart building applications**. *Vacuum*, 146 (2017) 649–654.

YOUSIF, E.; HADDAD, Raghad. Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review, **SpringerPlus**. 398, 2013.

YOUSIF, E.; HASAN, A. **Photostabilization of poly(vinyl chloride)** – Still on the run. *Journal of Taibah University for Science*, 9(4), (2015) 421–448

YU, Zi-Tao et al. Experimental measurements of thermal conductivity of wood species in China: effects of density, temperature, and moisture content. **Forest Products Journal**, v. 61, n. 2, p. 130-135, 2011.

ZHAO, Zijian et al. Effects of frequency and processing time on the drying course of ultrasound-assisted impregnated wood. *Bioresources*, v. 11, n. 1, p. 1951-1958, 2016.

ZHU, M.; LI, T.; DAVIS, C. S.; YAO, Y.; DAI, J.; WANG, Y.; HU, L. **Transparent and haze wood composites for highly efficient broadband light management in solar cells.** Nano Energy, 26 (2016a) 332–339.

ZHU, Mingwei; SONG, Jianwei; LI, Tian; GONG, Amy; WANG, Yanbin; DAI, Jiaqi; YAO, Yonggang; LUO, Wei; HENDERSON, Doug; HU, Liangbing. **Highly Anisotropic, Highly Transparent Wood Composites.** Advanced Materials 28 (2016b) 5181–5187.

ZINGALE, Salvatore. “Le inferenze nel design”. In: DENI, Michela; PRONI, Giampaolo (org.). **La semiótica e il progetto:** design, comunicazione, marketing. Milano: Ed. Franco Angeli, 2008. P. 62-65.

WEBSITES CONSULTADOS

EPE BRASIL - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2020:** ano base 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energeticonacional-2020>

OLIVEIRA, J.; POTIGUARA, R. C. V.; LOBATO, L. C. B. **Jupatí (*Raphia Taedigera mart.*):** A sua utilização por comunidades. Online, 2011. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/44983/1/118-2.pdf>> Acesso em 04 ago. 2019.

RHEINGANTZ, P. A. **Projeto bioclimático** – quadro síntese de recomendações para a cidade do Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura. Disponível em: http://prolugar.fau.ufrj.br/wp-content/uploads/2017/10/recom_bioclimatica2.pdf. Acessado em: set, 2021.

SIMÕES, V.; COSTA, M. Trailer “**Artesanato tradicional em fibra de jupatí**”. Belém, 2013. Disponível em: <<http://vimeo.com/49053562>>. Acesso em: 30 jun. 2019.

WORLD DESIGN ORGANIZATION – WDO. **Definition of Industrial Design.** Disponível em: <<https://wdo.org/about/definition/>>. Acesso em: 14 jun. 2019.

NORMAS E MANUAIS CONSULTADOS

FLIR Systems. **The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals:** A Resource Guide for Using Infrared in the Research and Development Industry, United Kingdom, 2012.