



UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE MINAS GERAIS



ESCOLA DE DESIGN

Programa de Pós-graduação em Design (PPGD)
MESTRADO EM DESIGN

Orlando Gama da Silva Junior

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS À
BASE DE FIBRA DE CURAUÁ, AMIDO TERMOPLÁSTICO
E POLIETILENO, UTILIZANDO-SE A TERMOGRAFIA**

Belo Horizonte

2013

Orlando Gama da Silva Junior

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS À
BASE DE FIBRA DE CURAUÁ, AMIDO TERMOPLÁSTICO
E POLIETILENO, UTILIZANDO-SE A TERMOGRAFIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em *Design* da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) como requisito parcial para a obtenção de grau de Mestre em *Design*, na área de concentração em *Design*, Inovação e Sustentabilidade.

Linha de pesquisa: *Design*, Materiais Tecnologia e Processos.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rosemary do Bom Conselho Sales – UEMG.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Patrícia Santiago de Oliveira Patrício – CEFET/MG.

Belo Horizonte
Escola de *Design* - UEMG
2013

S586p Silva Junior, Orlando Gama.

Produção e caracterização de compósitos à base de fibras de curauá, amido termoplástico e polietileno, utilizando-se a termografia [manuscrito] / Orlando Gama da Silva Junior. – 2013.

129 f. il. color. grafs. tabs. fots.; 31 cm.

Orientadora: Rosemary do Bom Conselho Sales

Coorientadora: Patrícia Santiago de Oliveira Patrício

Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado de Minas Gerais.

Programa de Pós-Graduação em Design.

Bibliografia: f. 120-129

1. Fibras – Recursos Naturais Renováveis – Brasil - Teses. 2. Designers –

Conforto

Térmico – Teses. 3. Termografia – Compósitos Poliméricos - Teses. I. Sales, Rosemary do Bom Conselho. II. Patrício, Patrícia Santiago de Oliveira. III. Universidade do Estado de Minas Gerais. Escola de Design. IV. Título.

CDU: 62-03

Aos meus pais,
Orlando Gama e Neli Mara,
e minhas irmãs,
Barbara e Adrea,
que sempre me apoiaram e entenderam
o momento em que foi necessária
a minha partida de casa.

A Nelice, Washington e Yuri,
que são a minha extensão e base familiar
em Belo Horizonte.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me iluminar e guiar meus passos até este momento.

À minha orientadora, Dr^a. Rosemary do Bom Conselho Sales, pela orientação, incentivo e, acima de tudo, pelo exemplo de determinação, compromisso e competência.

À Dr^a. Patrícia Santiago de Oliveira Patrício, pela coorientação, auxílio, conhecimento compartilhado e pela disponibilidade para sempre atender quando surgiam as dúvidas.

À Dr^a. Eliane Ayres, que me guiou por esse novo caminho de sínteses poliméricas, ajudando-me sempre que necessitava.

A toda a equipe do Programa de Pós-graduação em *Design* (PPGD), em especial a Sebastiana Lana, Rita Engler, Lia Krucken, Regina Álvares, Jairo Drummond e ao Rodrigo Stenner, por sua eficiência profissional e atitude sempre amigável quando eu chegava com algum problema.

Ao Wanderson Leite, por sua disponibilidade de tempo e por compartilhar seus conhecimentos em modelamentos matemáticos, que foram de grande ajuda na análise dos dados.

A Rita Ribeiro e Anderson Horta, amigos que tive o prazer de conhecer e que foram essenciais em toda a caminhada que fiz desde que cheguei a Belo Horizonte, sempre me ajudando nos momentos em que mais precisei.

Aos meus amigos Raquel Canaan, Gilberto Almeida e Pedro Nascimento, o quarteto fantástico que se formou no início do mestrado, dando força e apoiando ao longo desses dois anos, e que tenho certeza estará junto por muito mais tempo.

À equipe do Centro de Biotecnologia da Amazônia (CBA), Dr. Imar Araujo, Dr^a Simone Silva, Dr^a Arlena Guimarães e Flávio Freires, que me auxiliaram no início da minha pesquisa, solucionando as minhas dúvidas e permitindo-me realizar o trabalho de campo.

À equipe do LEPCom - Tadeu Henrique, Alberto Mol e Tulio Boaventura -, por me auxiliarem e solucionarem as minhas dúvidas, em especial a Renata Gama e Camila Brey Gil, pela amizade construída. Ao Dr. Rodrigo Oréfice, por me permitir utilizar as instalações do laboratório para desenvolvimento da pesquisa e ser um exemplo de profissionalismo.

À equipe do Centro de Estudos em Design de Gemas e Jóia (CEDGEM): Bernadete Teixeira, Adriano Mol, Mara Guerra, Henrique Lana, Antonio Mattos, por terem me adotado em meio às suas atividades.

Andrea Perez, Karen Lumi, Claudio Luiz, Bernardo Bulcão, Rodrigo Sousa, Amanda Sampaio Anny Venâncio, Lílian Simão, Mylena Burlamaqui, Kel Ito, Francisco Léon, Isabela Marinho, Bia Coimbra, Ed Lago, amigos que mesmo estando em lugares diferentes do mundo, somos sempre presentes, comemorando as vitórias e consolando quando não acontece o esperado.

“Se você encontrar um caminho sem obstáculos,
ele provavelmente não leva a lugar nenhum”.

Frank Clark.

RESUMO

SILVA JUNIOR, O. G. **Produção e caracterização de compósitos à base de fibra de curauá, amido termoplástico e polietileno utilizando-se a termografia.** Dissertação (Mestrado) - Escola de *Design*, Programa de Pós-Graduação em *Design* da Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

O desenvolvimento de materiais oriundos de fontes renováveis, como fibras naturais, é uma realidade presente nos dias atuais. No mundo são fabricados cerca de 30 milhões de toneladas de fibras vegetais e o Brasil é responsável por grande parcela dessa produção. Devido à variedade de espécimes existente em território nacional, tem crescido o interesse por pesquisas científicas e tecnológicas que utilizam fibras tradicionais, como o sisal e a juta. Em consequência, surge o interesse por novos estudos com outros tipos de fibra, como a do curauá (*Ananas erectifolius*). Por ser uma planta que produz fibras de elevada resistência mecânica, principalmente quando adicionadas a polímeros, seu uso associado a outros tipos de materiais poderia resultar em produto mais resistente, com baixa densidade, boa tenacidade e boas propriedades térmicas. Atualmente, o *Design*, apoiado na Engenharia de Materiais, busca desenvolver produtos a partir de fontes renováveis e com menos impacto, sem agredir o meio ambiente. Nesta pesquisa foi desenvolvido um compósito polimérico à base de amido termoplástico (TPS), polietileno de baixa densidade (PEBD) e fibra natural de curauá nas proporções de 10, 20 e 30% m/m (massa/massa). O material resultante foi caracterizado por espectroscopia de infravermelho (FTIR), análise térmica (TG), análise mecânica, microscopias eletrônicas de varredura (MEV) e microscopia ótica. O compósito desenvolvido foi aplicado sobre blocos de cerâmica e submetido à insolação natural e seu comportamento térmico foi monitorado utilizando-se a termografia infravermelha. Os resultados mostram que os compósitos fabricados possuem potencial para serem utilizados como revestimento térmico de elementos construtivos. A termografia foi eficiente para identificar diferenças de temperatura em amostras de compósitos poliméricos com diferentes percentuais de fibras e possibilitou acompanhar seu comportamento térmico.

Palavras-chave: Compósitos poliméricos. Conforto térmico. Fibra natural de curauá. Termografia infravermelha.

ABSTRACT

SILVA JUNIOR, O. G. **Production and characterization of composites based curauá fiber, thermoplastic starch and polyethylene using thermography.** Dissertação (Mestrado) - Escola de Design, Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

The development of materials from renewable sources, such as natural fibers, is a current reality. Today in the world 30 million tons of natural fibers are produced and Brazil is responsible for a large part of this production. Due to the variety of specimens existing in Brazil, the interest in scientific and technological research has increased with traditional fibers, such as sisal and jute and also with other types as curaua (*Ananas erectifolius*). Being the plant that produces fibers with high mechanical resistance, especially when added to polymers, their use in combination with other types of material could result in a tougher product, low density, good toughness and good thermal properties. Currently the Design, supported in materials engineering, seeks to develop products from renewable and lower impact without harming the environment. In this research was developed a polymer composite based in thermoplastic starch (TPS), low density polyethylene (LDPE) and curaua fiber in the proportion of 10%, 20% and 30% m/m (mass/mass). The resulting material was characterized by infrared spectroscopy - FTIR, TG-thermal analysis, mechanical analysis, scanning electronic microscopy - SEM and optical microscopy. The developed composite was applied on ceramic blocks and subjected to natural sunlight, its thermal behavior was monitored using infrared thermography. The results show that the composites manufactured have potential for use as thermal insulated element in the building. Thermography was effective for identifying temperature differences in samples of polymer composites with different percentages of fiber and allowed to monitor the thermal behavior.

Key words: Polymeric Composites. Thermal confort. Natural Curauá fiber. Infrared thermography.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Polimerização do etileno	25
FIGURA 2 - Polímeros biodegradáveis	27
FIGURA 3 - Capacidade mundial de produção de polímeros biodegradáveis	29
FIGURA 4 - Proposta de classificação hierárquica de compósitos	31
FIGURA 5 - Plantação do curauá verde e roxo-avermelhado	35
FIGURA 6 - Flor (a) e fruto do curauá (b)	36
FIGURA 7 - Broto de curauá e mudas prontas para plantio	36
FIGURA 8 - Coleta de folhas do curauá por corte e bulbo central protegido	37
FIGURA 9 - Coleta de folhas de curauá por extração	37
FIGURA 10 - Máquina desfibradora	38
FIGURA 11 - Processo de extração da fibra	38
FIGURA 12 - Mucilagem e secagem da fibra (roxo-avermelhado e verde-claro) ...	39
FIGURA 13 - Microscopia eletrônica de varredura das fibras de curauá	40
FIGURA 14 - MEV lateral fibra de curauá lavada em duas ampliações: (a) X500, (b) X1.000	42
FIGURA 15 - Curvas de tensão-deformação de fibras de curauá com diferentes diâmetros	42
FIGURA 16 - Microscopias das fraturas das fibras de curauá em diferentes velocidades	43
FIGURA 17 - Espectro eletromagnético	52
FIGURA 18 - Modo de transferência de calor por condução	53
FIGURA 19 - Troca de calor por radiação entre duas superfícies	55
FIGURA 20 - Radiação de corpos reais	56
FIGURA 21 - Curvas de Planck registradas graficamente	57
FIGURA 22 - Imagens térmicas de uma fachada de edifício e de uma criança	60
FIGURA 23 - Técnicas mais comuns em termografia	61
FIGURA 24 - Etapas do trabalho	70
FIGURA 25 - Preparo das amostras: aplicação de fibra de curauá no bloco de cerâmica	72
FIGURA 26 - Ambiente de teste: aquecimento das amostras	72
FIGURA 27 - Montagem para a gelificação do amido de mandioca	73

FIGURA 28 - Montagem do modelo 1.....	74
FIGURA 29 - Fotografia do misturador Thermo-Haake.....	75
FIGURA 30 - Fotografia da prensa térmica.....	76
FIGURA 31 - Montagem do modelo 2.....	77
FIGURA 32 - Moinho de facas e peletizador.....	79
FIGURA 33 - Material peletizado	79
FIGURA 34 - Montagem do modelo 3.....	81
FIGURA 35 - Câmera termográfica infravermelha e aquecedor elétrico.....	82
FIGURA 36 - Termograma inicial da amostra antes do aquecimento	85
FIGURA 37 - Termograma da amostra com 24 minutos de aquecimento	86
FIGURA 38 - Termograma da amostra com 35 minutos de aquecimento	86
FIGURA 39 - Termogramas de resfriamento das amostras com 20 e 39 minutos.	87
FIGURA 40 - Início do ensaio termográfico	88
FIGURA 41 - Termograma realizado aos 15, 30, 50 e 75 minutos de aquecimento.....	89
FIGURA 42 - Termograma realizado aos 20, 40, 50 e 65 minutos de aquecimento.....	91
FIGURA 43 - Gráfico de TG dos materiais.....	93
FIGURA 44 - Gráfico de TG com o segundo intervalo de perda	93
FIGURA 45 - Gráfico de TG com o terceiro intervalo de perda.....	94
FIGURA 46 - Gráfico de TG com o quarto intervalo de perda	95
FIGURA 47 - Espectros de FTIR dos compósitos de PE-g-Am/amido e PE-g- AM/amido/fibras com as composições de 10, 20 e 30% m/m.	96
FIGURA 48 - Espectros de FTIR entre 3.800 e 2.600 cm ⁻¹ dos compósitos de PE- g-Am/amido e PE-g-AM/amido/fibras com as composições de 10, 20 e 30% m/m.....	97
FIGURA 49 - Espectros de FTIR entre 2.915 e 2.848 cm ⁻¹ dos compósitos de PE- g-Am/amido e PE-g-AM/amido/fibras com as composições de 10, 20 e 30% m/m.....	97
FIGURA 50 - Espectros de FTIR entre 1.462 e 1.373 cm ⁻¹ dos compósitos de PE- g-Am/amido e PE-g-AM/amido/fibras com as composições de 10, 20 e 30% m/m.....	98
FIGURA 51 - MEV (A) e MO (B) do material PE-g-AM/amido.....	100
FIGURA 52 - MEV (C) e MO (D) do material PE-g-AM/amido/10% m/m fibra	100
FIGURA 53 - MEV (E) e MO (F) do material PE-g-AM/amido/20% m/m fibra.....	100
FIGURA 54 - MEV (G) e MO (H) do material PE-g-AM/amido/30% m/m fibra.....	101

FIGURA 55 - Comportamento do espalhamento sobre as amostras	102
FIGURA 56 - Termograma inicial antes do aquecimento	103
FIGURA 57 - Termograma do material 3 após 30 minutos de insolação	105
FIGURA 58 - Termograma do material 3 após 50 minutos de insolação	107
FIGURA 59 - Termograma do material 3 após 70 minutos de insolação	108
FIGURA 60 - Termogramado material 3 após 90 minutos de insolação	109
FIGURA 61 - Termograma do material 3 após 105 minutos de insolação	110
FIGURA 62 - Termograma do material 3 após 125 minutos	111
FIGURA 63 - Superfície de resposta temperatura em função do percentual de fibras e tempo	115
FIGURA 64 - Mapa de temperatura em função do percentual de fibras e tempo	116

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - Comportamento mecânico das amostras.....	104
GRÁFICO 2 - Linhas de perfil inicial antes do aquecimento.....	105
GRÁFICO 3 - Linhas de perfil após 30 minutos de insolação.....	106
GRÁFICO 4 - Linhas de perfil após 50 minutos de insolação.....	107
GRÁFICO 5 - Linhas de perfil após 70 minutos de insolação.....	108
GRÁFICO 6 - Linhas de perfil após 90 minutos de insolação.....	110
GRÁFICO 7 - Linhas de perfil após 105 minutos de insolação.....	111
GRÁFICO 8 - Linhas de perfil após 125 minutos.....	112
GRÁFICO 9 - Curvas de regressão polinomiais.....	113

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Potencial de substituição de alguns polímeros por amido.....	29
QUADRO 2 - Comparação de algumas propriedades, entre fibras sintéticas e fibras vegetais.....	32
QUADRO 3 - Valores de condutividade e capacidade térmica.....	54
QUADRO 4 - Emissividade dos materiais.....	59
QUADRO 5 - Relação dos horários de medição da área em estudo e das amostras.....	90
QUADRO 6 - Relação dos horários de medição da área em estudo e das amostras.....	92
QUADRO 7 - Principais bandas observadas no espectro FTIR.....	98
QUADRO 8 - Resultados obtidos na medição do ângulo de contato.....	102

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Copolímeros usados para modificar a blenda TPS/PE.....	30
TABELA 2 - Percentual de reagentes na composição das amostras.....	78
TABELA 3 - Valores relativos às medições feitas antes, durante e após o aquecimento das amostras.....	87
TABELA 4 - Dados obtidos na análise termogravimétrica.....	95
TABELA 5 - Análise da temperatura (°C) por termografia em relação ao tempo e percentual de fibra.....	113

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius
A	Área de Seção Transversal da Amostra
AFEAM	Agência de Fomento do Estado do Amazonas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning</i>
C	Calor específico do material
CAV	Comissão Americana de Ventilação
CBA	Centro de Biotecnologia da Amazônia
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CCD	<i>Charged Coupled Device</i>
CEDtec	Centro de Estudos em <i>Design</i> e Tecnologia
CEFET	Centro Federal Tecnológico
cm	Centímetro
CO ₂	Dióxido de Carbono
C _T	Capacidade térmica total do componente
C _{Text}	Capacidade térmica externa do componente
E _i	Energia Incidente
ELETOBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras
E _o	Energia Emitida
EPS	Poliestireno Expandido
E _r	Energia Refletida
E _t	Energia Transmitida
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>
G	Grama
Ge	Germânio
HDBPE	Propriedades de compósitos de biopolietileno
IPAAM	Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia
IR	Infravermelho

ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IST	Instituto Superior Técnico
K	Coeficiente de Condutibilidade Térmica
Kg	Quilograma
KJ	Quiojoule
L	Comprimento do Corpo de Prova
LEPCom	Laboratório de Engenharia de Polímeros e Compósitos
LHPB	Polibutadieno Hidroxilado
m/m	Massa por Massa
m ²	Metro Quadrado
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
mL	Mililitro
mm	Milímetro
MO	Microscopia Ótica
NaOH	Hidróxido de Sódio
O-H	Hidroxila
Øm	Diâmetro Médio
P	Perda
PA	Poliamida
PC	Policarbonato
PEAD	Poliétileno de Alta Densidade
PEBD	Poliétileno de Baixa Densidade
PE-g-AM	Poliétileno Grafitizado com Anidrido Maleico
PELBD	Poliétileno Linear de Baixa Densidade
PET	Politereftalato de Etileno
PEUAPM	Poliétileno de Ultra-auto Peso Molecular
PEUBD	Poliétileno de Ultrabaixa Densidade
PMMA	Polimetilmetaclilato
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PP	Polipropileno
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinila
Q	Constante de Amortecimento da Amostra

Rpm	Rotação por Minuto
Rt	Resistência Térmica
Si	Silício
SSE	<i>Mean Squared Error</i>
T	Temperatura
T _{end set}	Temperatura de Término da Degradação
TG	Análise térmica
T _{on set}	Temperatura de Início da Degradação
TPS	Amido Termoplástico (<i>Thermoplastic Starch</i>)
TR	Temperatura Refletida
U	Resistência Térmica Total
UEMG	Universidade do Estado de Minas Gerais
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
W/m	Watts por Metro
ZnS	Sulfato de Zinco
ZnSe	Selenite de Zinco
α	Fração da Radiação Absorvida
ϵ	Emissividade
λ Lambda	Comprimento de Onda
λ_{\max} Lambda	Comprimento Máximo de Onda
μm	Micrômetro
ρ	Fração da Radiação Refletida
σ	Desvio-Padrão
T	Fração da Radiação Transmitida

SUMÁRIO¹

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Objetivos.	23
1.2	Justificativa.....	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1	Polímeros petroquímicos e de fonte renovável	25
2.2	Compósitos	31
2.3	Fibra de vegetais.....	33
2.3.1	Fibra de curauá	34
2.4	Conforto térmico.....	43
2.4.1	O <i>designer</i> e o conforto de ambientes.....	46
2.5	Ensaio não destrutivo	49
2.6	Conceitos de termografia infravermelha.....	49
2.6.1	Princípios da radiação	51
2.6.1.1	Condutividade térmica	52
2.7.2	Termografia por infravermelho	55
2.7.3	Descrição do método de termografia infravermelha	59
2.7.4	Equipamentos de termografia.....	64
2.7.5	Vantagens e limitações da termografia	66
2.7.6	Aplicação da termografia.....	67
2.7.7	Termografia aplicada ao estudo de materiais construtivos.....	68
3	MATERIAIS E MÉTODOS	70
3.1	Materiais.....	71
3.2	Métodos.....	71
3.2.1	Ensaio preliminar	71

¹ Este trabalho foi revisado de acordo com as novas regras ortográficas aprovadas pelo Acordo Ortográfico assinado entre os países que integram a Comunidade de Países de Língua Portuguesa (CPLP), em vigor no Brasil desde 2009. E foi formatado de acordo com a ABNT NBR 14724 de 17.04.2011

3.3	Amostra de compósito 1	73
3.3.1	Material experimental 1	74
3.4	Amostra de compósito 2.....	74
3.4.1	Material experimental 2	76
3.5	Amostra de compósito 3.....	77
3.5.1	Material experimental 3 (aplicado).....	79
3.6	Ensaio de termografia.....	81
3.7	Caracterização dos materiais	82
3.7.1	Microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura	82
3.7.2	Espectroscopia de absorção na região do infravermelho	82
3.7.3	Ensaio de tração uniaxial	83
3.7.4	Medida de ângulo de contato	83
3.7.5	Análise termogravimétrica	84
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	85
4.1	Ensaio preliminares	85
4.2	Material experimental 1	87
4.3	Material experimental 2	90
4.4	Material experimental 3 (aplicado)	92
4.4.1	Caracterização dos materiais: análise termogravimétrica	92
4.4.2	Espectroscopia de absorção na região do infravermelho	96
4.4.3	Ensaio de tração uniaxial	98
4.4.4	Microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV)	99
4.4.5	Medida de ângulo de contato	101
4.5	Análise termográfica material experimental 3.....	103
5	CONCLUSÃO	117
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	119
	REFERÊNCIAS.....	120

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas têm sido expressivos os esforços dos pesquisadores na busca por alternativas e soluções que promovam o desenvolvimento sustentável sem que isso ocorra de forma agressiva ao meio ambiente. Os parâmetros de sustentabilidade mais discutidos, sobretudo a partir da Conferência de Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, conhecida como a Rio 92, estão relacionados ao controle do consumo de energia elétrica e à substituição de materiais tradicionais por materiais alternativos. Uma preocupação atual está relacionada ao aumento da temperatura média do planeta, uma vez que ela impacta o consumo de energia elétrica e os sistemas de isolamentos térmicos. Dados fornecidos pelo Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAAM, 2011) mostram que em um período de 140 anos (1860/2000) houve aumento da temperatura média do planeta em 1,7°C. Na última década, o aumento registrado foi de 0,7°C e a previsão é de que até o ano de 2080 a elevação seja de até 4,0°C.

Esse aumento da temperatura reflete nos espaços construídos e influenciam diretamente o ambiente interno, externo e entorno das edificações. Assim, o conceito de sustentabilidade na construção civil, segundo Zylberman (2012), passa a não ser mais uma questão de opção por parte das incorporadoras e construtoras, e sim uma questão de sobrevivência. De acordo com o autor, os gastos com energia elétrica nos edifícios de todo o mundo somam cerca de 40% da produção de energia gerada. Esse consumo está direcionado para a utilização dos elevadores, ar-condicionado, computadores, lâmpadas, etc. A construção e operação desses edifícios também consomem, em média, 33% dos recursos naturais, geram 33% dos gases de efeito-estufa, além de consumir 12% de toda a água potável do planeta e gerar 40% de resíduos sólidos nos grandes centros. O Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) informa que a operação dos edifícios brasileiros consome, no total, cerca de 50% da energia elétrica gerada. Isso corresponde a 87,4% da energia total consumida no setor público, 89,4% no setor comercial e 41,7% no setor residencial. Uma alternativa, no entendimento de Zylberman (2012), é a implementação de projetos que utilizem

nos edifícios equipamentos eficientes, seja no uso e disposição das águas, no uso da energia elétrica e que sejam de fácil manutenção.

Atualmente, a utilização de aparelhos de ar-condicionado para aclimação dos ambientes tornou-se uma prática comum, porque ele apresenta uma forma prática e moderna de manter o conforto térmico de ambientes comerciais, industriais e residenciais. Os dados das Centrais Elétricas Brasileiras (ELETROBRÁS, 2013) e da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2013) demonstram que um aparelho de ar-condicionado de 14.000 *Btus* em funcionamento (8 horas/30 dias) gera um custo extra na conta de energia elétrica de R\$ 101,50 (de uma cidade como Manaus). Em Belo Horizonte esse custo pode chegar a R\$ 129,78. Nesse sentido, as autoridades governamentais já exigem em alguns territórios “medidas de eficiência energética”, entendidas como formas de “uso de equipamentos e hábitos que provocam menor uso da energia para auferir o mesmo serviço prestado”. Medidas como essas deram origem aos edifícios “eficientes” que, para Lamberts, Dutra e Pereira (1997), significam a adoção de medidas construtivas que minimizem o consumo de energia e ao mesmo tempo ofereçam condições de conforto térmico do ambiente construído. Esforços estão sendo implementados em diferentes setores e áreas do conhecimento com o intuito de garantir preservação ambiental e proporcionar melhor qualidade de vida para as pessoas.

A busca por medidas de eficiência energética associadas a novos materiais impulsionou a pesquisa também na área de compósitos poliméricos. A substituição de materiais tradicionais por novos materiais intensificou-se, principalmente nos últimos 20 anos. Esse desenvolvimento está ligado à possibilidade de produção de compósitos com boas propriedades mecânicas e baixas densidades, sendo possível substituir até mesmo materiais como a madeira e o aço. Diversas fibras naturais vegetais são produzidas em praticamente todos os países do mundo, designadas por materiais lignocelulósicos.

Com base nos dados da *Food and Agriculture Organization* (FAO, 2011), em 2011 foram fabricados cerca de 30 milhões de toneladas de fibras vegetais no mundo, sendo que em 2013 essa produção teve aumento em torno de 4%. Por ser um

recurso de rápida renovação, sua aplicação na indústria têxtil, automobilística e de embalagens industriais é elevada (MISHRA *et al.*, 2003; ZAH *et al.*, 2007). No Brasil, existem diversas culturas com potencial para sua produção, com reais benefícios socioeconômicos (FARIAS FILHO; TOLEDO FILHO; LIMA, 2010; MARTINS *et al.*, 2004). As mais pesquisadas e citadas pela literatura são as fibras de sisal, coco, juta, rami, fibra de bagaço de cana de açúcar, soja e a fibra de curauá. Diferentes estudos mostram que essas fibras poderiam ser aproveitadas com vantagens em diferentes segmentos, uma vez que elas apresentam boas propriedades mecânicas, físicas, químicas e térmicas (ARAUJO; MOTHÉ, 2004; FORD *et al.*, 2007; MATTOSO *et al.*, 1999; NEIRA, 2005).

A mistura de diferentes tipos de fibras, principalmente entre as sintéticas e naturais, vem tomando espaço e importância em muitos trabalhos de acadêmicos (AQUINO *et al.*, 2007; RODRIGUES; SILVA; AQUINO, 2009). Recente pesquisa mostrou o processo de hibridização entre a fibra de vidro-E e as fibras vegetais de licuri na concepção de um laminado compósito (DALTRO, 2011). Por se tratar de métodos de processamento bastante simples quando comparado aos verificados via síntese de novos materiais, esse campo de pesquisas torna-se bastante atraente, em razão da ampla diversidade, além de ser uma fonte de recurso renovável (BLEDZKI; GASSAN, 1999). Pesquisas sobre a empregabilidade de fibras vegetais naturais na construção civil estão direcionadas, principalmente, para uso como reforço em compostos cimentícios e em substituição às fibras minerais, sintéticas ou agregadas com outros materiais (SILVA *et al.*, 2012).

Para este estudo pesquisou-se o curauá, por ser uma planta nativa, de fácil manejo, resistente a pragas e abundante na Amazônia, região Norte do Brasil. O espécime é uma bromeliácea pertencente à família do abacaxi, conhecido cientificamente como *Ananas erectifolius*. Dados do Centro de Biotecnologia da Amazônia (CBA) notificam que na região do Amazonas as folhas do curauá são utilizadas para o beneficiamento da fibra; e o fruto, devido à sua acentuada acidez, está sendo estudado para o preparo de alimentos e sucos (DE PAOLI *et al.*, 2009; LEDO, 1967).

A termografia infravermelha, empregada nesta pesquisa, é uma técnica de ensaio não destrutivo de grande aplicabilidade, uma vez que mede o campo de temperatura de uma superfície a partir da imagem gerada pela radiação térmica. O processo de inspeção é feito por meio de equipamentos dotados de detectores sensíveis ao infravermelho, que captam a radiação térmica e a convertem em imagens térmicas. Pesquisas desenvolvidas por Maldague (2000) e Snell Jr. e Spring (2007) ressaltaram os avanços desses equipamentos, abrindo novos espaços e áreas de aplicação. Pode-se dizer que a técnica é nova na área do *design* e que ela apresenta potencial para aplicações em análises térmicas de elementos construtivos (CORTIZO, 2007; SALES *et al.*, 2011; PEDRA, 2011).

Para o presente trabalho utilizou-se a fibra de curauá *in natura* para produzir compósitos poliméricos baseados em amido puro ou misturados com polietileno de baixa densidade (PEBD) contendo diferentes teores de fibra (10/20/30% m/m). Nos compósitos com adição de poliolefinas, foi introduzido polietileno grafitizado com anidrido maleico (PE-g-AM) como agente compatibilizante. Os materiais produzidos foram caracterizados em relação às suas propriedades estruturais, térmicas e morfológicas, utilizando-se os ensaios de espectroscopia de infravermelho (FTIR), análise térmica (TG), análise mecânica e microscopias eletrônicas de varredura e ótica (MEV). O material resultante foi aplicado sobre blocos de cerâmica e submetido à insolação natural. Seu comportamento térmico foi estudado utilizando-se a termografia infravermelha. Os resultados mostram que termografia foi eficiente para identificar diferenças de temperatura nas amostras dos compósitos poliméricos fabricados com 10, 20 e 30% m/m de fibras. Os compósitos fabricados possuem potencial para serem estudados como revestimento térmico de elementos construtivos. É possível acompanhar a variação de temperatura de compostos poliméricos quando aplicados sobre blocos de cerâmica e submetidos à insolação direta.

1.1 Objetivos

Desenvolver e caracterizar compósitos poliméricos à base de amido e fibra natural de curauá com polietileno de baixa densidade (PEBD) e investigar seu

comportamento térmico quando aplicados em blocos de cerâmica, utilizando-se a termografia infravermelha.

São objetivos específicos deste trabalho:

- a) Desenvolver compósitos poliméricos baseados em fibra curauá, amido e PEBD.
- b) Estudar a influência do teor de fibras na adesão com a matriz polimérica.
- c) Estudar a influência do teor de fibras nas propriedades mecânicas dos compósitos.
- d) Estudar a influência do teor de fibras na estabilidade térmica dos compósitos.
- e) Estudar a influência das fibras na hidrofiliabilidade da superfície dos compósitos.
- f) Definir qual a melhor estratégia (termografia ativa ou passiva) para análise térmica das amostras do compósito polimérico e dos blocos de cerâmica fazendo-se uso da termografia.
- g) Estabelecer a relação entre o teor de fibras e a resposta térmica dos compósitos produzidos, usando-se a termografia.

1.2 Justificativa

Atualmente a extração da fibra do curauá vem se tornando uma vertente de comercialização para a comunidade que a extrai. O governo do estado do Amazonas está incentivando o seu cultivo entre as comunidades do interior do estado, a fim de proporcionar desenvolvimento e fonte de renda à população da região. Segundo a Agência de Fomento do Estado do Amazonas (AFEAM), o curauá poderia se tornar fonte de desenvolvimento e sobrevivência de muitas comunidades que hoje vivem de forma bastante precária. Nesse contexto, a presente pesquisa se justifica na medida em que busca uma forma alternativa de aplicação da fibra de curauá e ao mesmo tempo uma fonte de renda para a região, diminuição do consumo de energia elétrica do planeta, proporcionando mais conforto ambiental a partir de um produto final proveniente de fonte renovável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

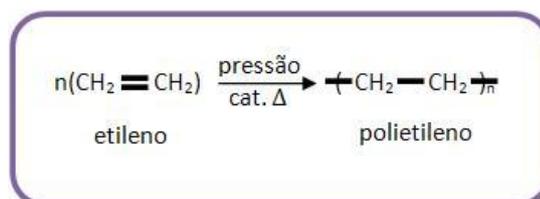
Neste capítulo são abordados os temas mais relevantes do levantamento bibliográfico no que diz respeito aos materiais usados para a produção do compósito, que são os polímeros, fibras naturais, especificamente fibra de curauá, seguidos das definições acerca do conforto térmico e termografia infravermelha.

2.1 Polímeros petroquímicos e de fonte renovável

Os polímeros são considerados estruturas que possuem um número de átomos encadeados superior a uma centena e com valor ilimitado, denominadas macromoléculas. Tais estruturas são repetidas dentro da cadeia e apresentam massa molar a partir da ordem de 10^3 a 10^6 Da, daí a proveniência do seu nome, que vem de origem grega *poli*, que significa “muitos”, e *mero*, que significa “partes” (MANO, 1985).

Entre os polímeros, as poliolefinas apresentam ampla utilização, destacando-se o polietileno. Simanke, Lemos e Pires (2013) relataram que atualmente o consumo mundial do polietileno é de 30% em relação ao consumo de outras poliolefinas. Sendo amplamente utilizado na produção de sacolas, filme para embalagem alimentar, utensílios domésticos, brinquedos e outros inúmeros produtos, o polietileno é obtido do processo de polimerização do etileno, que se agrupa sucessivamente para formar uma macromolécula. O etileno é uma matéria-prima proveniente do petróleo ou do álcool de cana de açúcar (CANTO, 1995). A FIG. 1 ilustra a reação de polimerização do etileno.

FIGURA 1 - Polimerização do etileno



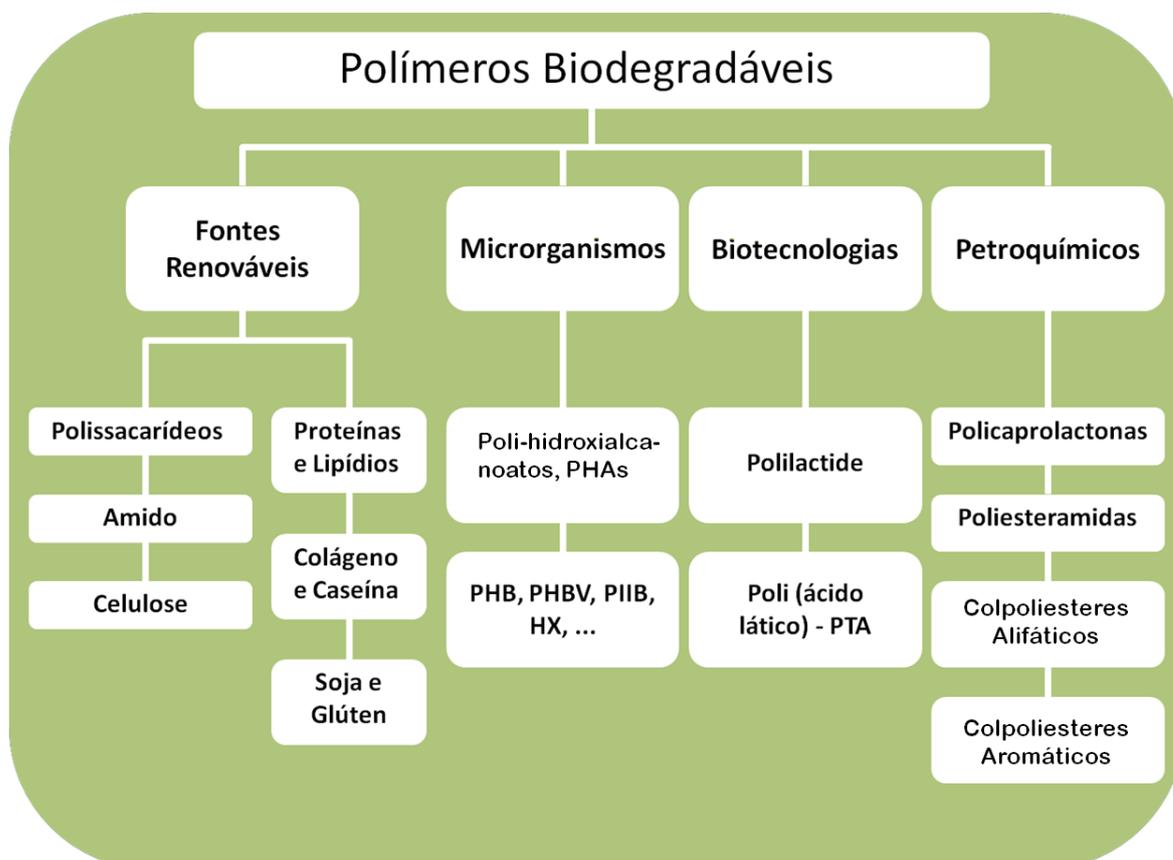
Fonte: <http://raulmaiden.blogspot.com.br>.

Dependendo da rota reacional e do sistema catalítico utilizado na sua polimerização, podem ser obtidos cinco tipos de polietilenos: polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno linear de baixa densidade (PELBD), polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de ultrabaixa densidade (PEUBD) e polietileno de ultra-alto peso molecular (PEUAPM). De maneira geral, o polietileno apresenta uma cristalinidade parcial, flexibilidade e tem as suas propriedades influenciadas e acentuadas pelas quantidades relativas das fases amorfa e cristalina. Devido à sua natureza parafínica e seu alto peso molecular, os polietilenos se apresentam inertes em relação à maioria dos produtos químicos (COUTINHO; MELO; SANTA MARIA, 2003). Em particular, o PEBD apresenta uma cristalinidade baixa, em torno de 50 a 60%, boa tenacidade, alta resistência ao impacto, alta flexibilidade, boa processabilidade e estabilidade. O PELBD apresenta mais cristalinidade que o PEBD, mas propriedades morfológicas semelhantes, como rigidez, densidade e dureza. O PEAD possui cristalinidade superior a 90%, baixa reatividade química, estabilidade em soluções alcalinas e é relativamente resistente ao calor e ao impacto. O PEUAPM é mais resistente à abrasão em comparação com outros termoplásticos, tem melhor resistência à corrosão, alta resistência à fadiga cíclica, alta resistência à fratura por impacto, alta resistência química, dureza e baixo coeficiente de atrito. A densidade do PEUBD é próximo de $0,865 \text{ g/cm}^3$, com elevada resistência, mais flexibilidade e melhores propriedades ópticas em relação ao PELBD. Os diversos tipos de polietilenos podem ser aplicados nas mais diversas áreas e processados por diversos métodos (COUTINHO; MELO; SANTA MARIA, 2003).

Apesar de grande versatilidade, propriedades mecânicas e custo relativamente baixo, os polímeros causam poluição da natureza e são obtidos a partir de fontes não renováveis. Isso impulsionou as buscas por materiais que apresentem as mesmas características dos polímeros fósseis somados à degradabilidade após o descarte. Com base nessa necessidade, surgem como alternativas três materiais com viabilidades técnicas, econômicas e grande potencial de expansão. Os biopolímeros, que são polímeros oriundos de matérias-primas de fontes renováveis, como milho, celulose, quitina, entre outros. Os polímeros biodegradáveis são aqueles provenientes ou não de fontes naturais renováveis e sua degradação é resultado da ação de microrganismos de ocorrência natural,

como fungos, algas e bactérias (BRITO *et al.*, 2011), e suas divisões são expostas na FIG. 2.

FIGURA 2 - Polímeros biodegradáveis



Fonte: adaptado de Brito *et al.* (2011).

A substituição de plásticos derivados do petróleo convencionais, com plástico de base biológica, é importante para compreender o fluxo desses materiais e seus impactos adversos em todas as partes de seus ciclos de vida, a fim de selecionar um material que é mais sustentável. Por serem materiais renováveis e de baixo custo, os carboidratos constituem-se em fonte mais promissora e economicamente mais viável para substituir os materiais de origem petroquímica. Entre os frequentemente utilizados, encontra-se o amido, que requer 68% menos energia para produção e menos emissão de dióxido de carbono (CO₂) que polímeros petroquímicos (CHÁVEZ *et al.*, 2012). O amido é o segundo polissacarídeo mais abundante na natureza, pode ser encontrado em raízes, sementes e fibras de plantas. É composto de dois polissacarídeos de D-glicose; a

amilose, que apresenta uma cadeia linear, e a amilopectina, com uma cadeia ramificada (FERREIRA; ROCHA, 2009).

O amido passou a ser considerado um polímero atrativo devido aos seus baixos custos, bons desempenhos em misturas com polímeros sintéticos, por permitir o processamento como termoplástico e permitir ser incorporado como carga mineral em polímeros tradicionais (ROSA; PANTANO FILHO, 2003). A gelatinização do amido ocorre no momento em que a sua estrutura cristalina é perdida, por volta de 70 a 90°C, e na presença de plastificantes como água e glicerol. Na gelatinização do amido por calor e cisalhamento, ocorrem sucessivamente três fenômenos: a fragmentação dos grânulos de amido; a quebra das ligações de hidrogênio entre as cadeias de amido, levando à perda da cristalinidade; e a despolimerização parcial das cadeias de amido (TAGHIZADEH; FAVIS, 2013). De acordo com Taghizadeh e Favis (2013), as temperaturas iniciais e finais da gelatinização, para diferentes plastificantes, aumenta na seguinte ordem: glicerol ≈ sorbitol « d-glicerol < poliglicerol.

A utilização de filmes de amido gelatinizado puro, como, por exemplo, destinados à embalagem de alimentos, tem sido muito limitada, devido à sua fragilidade no momento da transformação, à despolimerização em baixas temperaturas, propriedades mecânicas ruins, baixa barreira contra umidade e alta sensibilidade às alterações ambientais, como umidade e temperatura. Essas desvantagens necessitam ser superadas para que se tenha melhor desempenho dos biomateriais à base de amido. Diversas tentativas foram realizadas para melhorar os materiais à base de amido, como a adição de cargas de reforço resultando em materiais com propriedades moderadamente melhoradas, mas com processabilidade limitada e baixa compatibilidade devido à alta viscosidade e à energia interfacial. Em vista disso, o amido possui limitações técnicas que tornam difíceis a sua processabilidade e sua utilização como produto final. Assim, para ter melhor viabilidade no processamento e utilização, a formação de blendas com polímeros petroquímicos é uma estratégia que vem sendo pesquisada. Segundo Brito *et al.* (2011), o amido possui potencial de substituição de alguns polímeros petroquímicos pelo amido, cujos dados de substituição estão expostos no QUADRO 1.

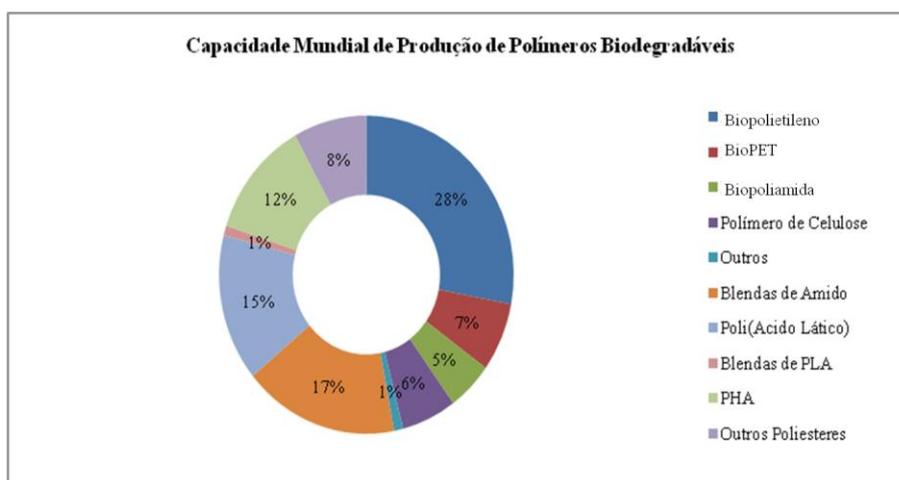
QUADRO 1 - Potencial de substituição de alguns polímeros por amido

Biopolímero / Polímero	PVC	PEAD	PEBD	PP	PS	PMMA	PA	PET	PC
Amido	-	+	+	+	+	-	-	-	-

+ substituição parcial, - não substitui. PVC: policloreto de vinila; PEAD: polietileno de alta densidade; PEBD: polietileno de baixa densidade; PP: polipropileno; PS: poliestireno; PMMA: polimetilmetacrilato; PA: poliamida; PET: politereftalato de etileno; PC: policarbonato.
Fonte: adaptado de Brito *et al.* (2011).

As análises realizadas por Imre e Pukánszky (2013) revelam que uma blenda produzida com um polímero que não é miscível com o amido pode resultar em uma mistura que possui propriedades mecânicas inferiores quando comparada a ambos os componentes utilizados. Os autores acrescentam que o amido e suas blends são de grande importância entre os polímeros biodegradáveis. Essa representação é demonstrada na FIG. 3, que expõe a capacidade de produção dessa classe de polímeros no mundo.

FIGURA 3 - Capacidade mundial de produção de polímeros biodegradáveis



Fonte: adaptado de Imre e Pukánszky (2013).

Cerclé, Sarazin e Favis (2013) avaliaram a eficácia de cinco copolímeros diferentes no que diz respeito à sua habilidade para compatibilizar blends de amido termoplástico PEAD/TPS (80:20) (TAB. 1).

TABELA 1 - Copolímeros usados para modificar a blenda TPS/PE

Copolímero	% Rx (m/m)	% MA (m/m)
PP-g-MA	-	3
PE-g-MA	-	3,9
PE-R ₁ -MA	Alto	3
PE-R ₂ -MA	Médio	3
PE-R ₃ -MA	Baixo	4

Fonte: adaptado de Cerclé, Sarazin e Favis (2013).

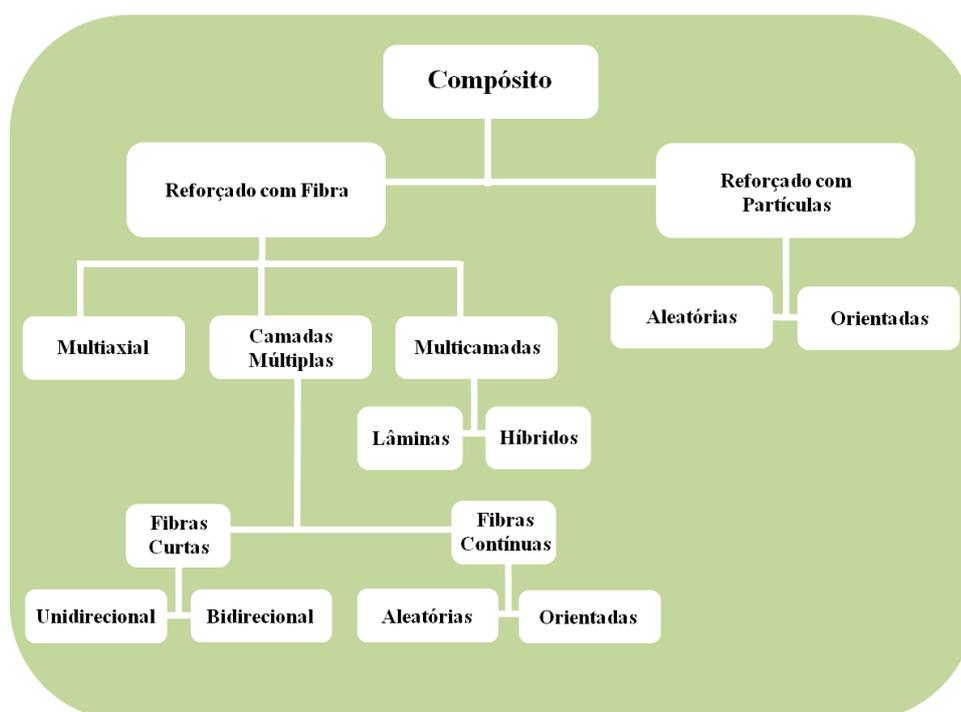
Para esses autores, os copolímeros PE-Rx-MA proporcionaram alongamentos na ruptura de sua cadeia na faixa de 700% e esses foram os mais altos valores reportados até o momento para esse tipo de blenda. Além disso, tais copolímeros inverteram a tendência tradicional de compatibilizantes de blenda de PEAD/TPS (80:20), os quais diminuem a resistência ao impacto à medida que o maior teor de compatibilizante é acrescido na blenda. Ao contrário, foi obtida significativa melhora nas características mecânicas de resistência ao impacto com entalhe. A grafitização do polímero reflete melhor molhabilidade da fibra, proporcionando melhor adesão interfacial. Em seus estudos, Albinate, Pacheco e Visconte (2013) relataram experimentos em que são avaliados os efeitos da utilização de PE-g-AM como compatibilizante, reforçando compósitos poliméricos com fibra natural. As propriedades mecânicas desse material foram alteradas, fornecendo melhores resultados de resistência à tração, devido à melhor interação causada pela formação da ligação química entre o anidrido da matriz polimérica e a hidroxila da fibra natural (ALBINATE; PACHECO; VISCONTE, 2013).

Apesar disso, Mortazavi, Ghasemi e Oromiehie (2013) reportaram que para teores elevados de TPS (30 a 80% m/m) a morfologia das blendas de amido sofre significativa alteração, que resulta na inversão de fases. Acima da concentração de inversão de fase, o TPS de fase dispersa passa a se tornar a matriz, resultando em baixas propriedades mecânicas e alta sensibilidade à umidade da blenda. Observaram que o módulo de Young e a resistência à tração das blendas diminuem linearmente com o aumento do teor de TPS e no ponto de inversão de fase essas propriedades diminuem rapidamente. Outras propriedades também foram avaliadas. Foi concluído que para se obterem blendas PEBD/TPS com alta eficiência, o teor de amido não pode exceder a concentração na qual ocorre inversão de fase.

2.2 Compósitos

Um material compósito é a combinação macroscópica entre dois ou mais materiais com características superiores e também inferiores aos dos seus constituintes originais. Esses materiais são produzidos pela mistura (seja ela física ou química) de duas fases, uma contínua e outra descontínua (elemento de reforço e matriz), podendo ser na forma de partículas, fibras ou mantas. Uma definição mais teórica diz que um compósito é um material multifásico que apresenta propriedades diferentes de cada componente individual, de modo a produzir a combinação dessas propriedades. E de acordo com esse princípio da ação combinada, melhores propriedades são criadas a partir de adequada escolha de materiais (CALLISTER JR., 2007). Uma proposta de classificação hierárquica de materiais compósitos foi apresentada por Levy Neto e Pardini (2006), visualizada na FIG. 4.

FIGURA 4 – Proposta de classificação hierárquica de compósitos



Fonte: adaptado de Levy Neto e Pardini (2006).

Tecnologicamente, os compósitos mais importantes são os que na fase dispersa encontram-se na forma de uma fibra. Resistência e/ou rigidez alta são as características perseguidas frequentemente, sendo expressas em termos de

resistência específica e módulo específico. A maioria dos compósitos é desenvolvida visando à melhoria das propriedades mecânicas, como rigidez, resistência e tenacidade, sendo às vezes exploradas combinadamente outras propriedades, como resistência às condições ambientais e às altas temperaturas (CALLISTER, 2005).

Satyanarayana, Arizaga e Wypych (2009) analisam em sua pesquisa os pontos que se destacam como favoráveis para a utilização de fibras naturais de origem vegetal como reforço em compósitos. Destacam-se a abundância de suas fontes renováveis e o aumento de interesse das questões sustentáveis. Outros dados de análises comparativas foram reunidos pelos autores e encontram-se no QUADRO 2.

QUADRO 2 – Comparação de algumas propriedades, entre fibras sintéticas e fibras vegetais

Fibras	Peso	Resistência	Módulo	Conteúdo de
Fibras Vegetais	0,6 – 1,2	1,60 – 2,95	10 – 130	4
Vidro	2,6	1,35	30	30
Kevlar	1,4	2,71	90	25
Carbono	1,8	1,71	130	130

Fonte: adaptado de Satyanarayana, Arizaga e Wypych (2009).

Mano *et al.* (2010) avaliaram o efeito da velocidade de rotação do parafuso de uma extrusora dupla-rosca nos parâmetros dimensionais da fibra de curauá em compósitos de PEAD e PP após moldagem por injeção. De acordo com eles, mudanças na razão de aspecto das fibras após o processamento constituem um fator importante que afeta as propriedades mecânicas do compósito. As dimensões das fibras diminuem com o aumento da velocidade de rotação do parafuso porque as altas forças de cisalhamento causam quebra das fibras e desfibração. E além da redução na razão de aspecto das fibras o aumento da velocidade de rotação do parafuso causou degradação térmica nas duas matrizes de polímero e contribuiu para a queda da resistência mecânica. Por outro lado, a quebra na cadeia dos polímeros aumentou o alongamento na ruptura dos compósitos. Além disso, a desfibração devido ao aumento da velocidade do parafuso favoreceu a dispersão das fibras.

Castro, Ruvolo Filho e Frollini (2012) reportaram a diferença nas propriedades de compósitos de biopolietileno (HDBPE) e fibras de curauá obtidos por dois tipos de processamento: mistura dos componentes em misturador interno (Haake) seguida de moldagem por prensagem térmica e mistura em extrusora de dupla-rosca seguida de moldagem por injeção. De acordo com eles, a resistência ao impacto aumentou de 150 para 300 J m⁻¹ para o compósito produzido pelo segundo método. Além disso, os autores referiram o polibutadieno hidroxilado (LHPB) como agente compatibilizante apto a promover boa adesão das fibras na matriz, isto é, o LHPB foi capaz de promover a transferência de carga da matriz para as fibras a partir da interface do compósito.

2.3 Fibra de vegetais

As fibras vegetais vêm sendo utilizadas por diversas culturas e sua aplicação é das mais variadas. Inicialmente, as fibras eram utilizadas para fabricação de artefatos rústicos como bolsas, mantas, cordas, redes, pincéis, cestos, entre outros produtos que eram comercializados no mundo há centenas de anos. Mais recentemente, estudiosos começaram a investigar as fibras vegetais como reforço em materiais compósitos poliméricos, destacando-se os compósitos de matriz termorrígida (SINGH *et al.*, 1994).

Por se tratar de um produto de grande apelo ambiental e baixo custo, as fibras vegetais tornam-se excelentes matrizes para aplicação em materiais compósitos. Suas vantagens são amplas e estão normalmente associadas a baixo custo de produção e processamento, além de ser biodegradável, atóxico, passível de reciclagem, baixa densidade, boas propriedades mecânicas, baixa abrasividade se comparado às fibras sintéticas. Outros fatores também contribuem para o crescente interesse pelo uso de fibras naturais, como sua procedência de fontes renováveis, absorção e armazenagem de CO₂, baixo consumo de energia na sua produção, além da promoção de trabalho e renda na área rural. Segundo Levy Neto e Pardini (2006), existem também desvantagens associadas às fibras naturais, como baixa temperatura de utilização; baixa estabilidade dimensional; elevada sensibilidade a efeitos ambientais - como variações de temperatura e umidade, influência das condições do solo no plantio e época da colheita,

processamento pós-colheita -; geometria complexa e não uniforme, além de propriedades mecânicas modestas em relação aos materiais fibrosos sintéticos. Contudo, a utilização de fibras de curauá formando compósitos que possam favorecer o isolamento térmico para aplicação na construção civil pode contribuir significativamente nesse segmento, inclusive em associação a outros tipos de materiais. Pesquisas relacionadas com a combinação de matérias naturais ou não naturais são importantes para aperfeiçoar o desempenho de compósitos, extraindo ao máximo suas potencialidades.

2.3.1 Fibra de curauá

O curauá é uma planta amazônica conhecida desde os tempos pré-colombianos, pela qualidade de suas fibras que são extraídas das folhas da planta. Pertencente à família das bromeliáceas, a mesma do abacaxi (DE PAOLI *et al.*, 2009; SILVA; SANTANA, 2011; TOMCZAK, 2010), é conhecida cientificamente como *ananas erectifolius*. A planta vem atraindo a atenção dos pesquisadores, particularmente a partir de 1993, quando sua fibra foi reconhecida comercialmente pela indústria automotiva brasileira (ZAH *et al.*, 2007).

A fibra de curauá economicamente está entre as *lignocelulósicas* (agentes de reforço na preparação de compósitos) de mais rigidez e é a terceira no país, depois da fibra de sisal e juta. O crescente interesse pela fibra natural de curauá impulsionou seu cultivo em larga escala na região Amazônica. É uma planta com boas propriedades mecânica e térmica, de fácil manejo, resistente a pragas, podendo ser cultivada em consórcio com outras culturas ou em áreas de reflorestamento e produção de madeira, tornando-se fonte de renda e diversificação de culturas para pequenos agricultores, podendo também ser cultivada em grandes plantações (FIG. 5). O espécime apresenta duas variedades: curauá roxo-avermelhado e curauá verde-claro, denominado de curauá branco (LEDO, 1967). A resistência à tração da fibra de curauá é cinco a nove vezes maior que a do sisal ou da juta. As folhas de onde são extraídas as fibras medem aproximadamente 1,0 a 1,5 m de comprimento e 4,0 a 7,0 cm de largura e 5 mm de espessura, dependendo da sua variedade. Com aproximadamente oito meses as folhas rendem 5-8% de fibras (MONTEIRO;

AQUINO; LOPES, 2008; SATYANARAYANA; GUIMARÃES; WYPYCH *et al.*, 2007; SILVA; AQUINO, 2008).

FIGURA 5 – Plantação do curauá verde e roxo-avermelhado



Fonte: do autor.

Segundo o Centro de Biotecnologia da Amazônia (CBA), uma planta com esses padrões de folhagem pode produzir 200 a 300 g de fibra durante sua vida produtiva. Além da extração das folhas para obter-se a fibra, o curauá fornece uma flor, muito solicitada em arranjos tropicais devido à sua aparência exótica (FIG. 6). As folhas são utilizadas para o beneficiamento da fibra (FIG. 6) e o fruto ainda não é aproveitado comercialmente pelo produtor da fibra devido à sua alta acidez e elevado número de sementes. Atualmente está havendo incentivo por parte das autoridades do município de Nova Olinda do Norte no sentido de estimular a extração da polpa dos frutos do curauá para facilitar o seu consumo e inseri-lo no cardápio da merenda escolar do município. O governo do estado do Amazonas está incentivando o cultivo do curauá pelas comunidades do interior do estado, para proporcionar desenvolvimento da região.

FIGURA 6 – Flor (a) e fruto do curauá (b)



(a)

(b)

Fonte: do autor.

Segundo a AFEAM, após um ano do plantio do curauá já se pode realizar a primeira colheita das folhas. A partir do segundo ano a colheita pode ser realizada a cada seis meses. Aconselha-se realizar nove colheitas e depois proceder a um novo plantio, utilizando o broto gerado no caule da própria planta (FIG. 7).

FIGURA 7 – Broto de curauá e mudas prontas para plantio



Fonte: do autor.

A planta adulta ocupa aproximadamente área de 1,4 m² e em 1 hectare podem ser plantadas até 2.500 mudas. O processo para obtenção das fibras é feito com a coleta das folhas. Esse processo pode ser realizado pelo corte das folhas pela base, utilizando um instrumento de corte. Esse processo é recomendado durante as primeiras colheitas para evitar a danificação do bulbo central da planta (FIG. 8).

FIGURA 8 – Coleta de folhas do curauá por corte e bulbo central protegido



Fonte: do autor.

O outro processo para realizar a coleta e a remoção completa da folha é arrancando-a da base da planta. Esse recurso deve ser realizado nas últimas colheitas, quando a planta deverá ser replantada. Essa forma de coleta torna o processo de extração mais rápido (FIG. 9).

FIGURA 9 – Coleta de folhas de curauá por extração



Fonte: do autor.

A extração das fibras das folhas é feita em uma máquina desfibradora (FIG. 10). Para isso, foi feita uma adaptação em um modelo de máquina que se utiliza para beneficiamento da fibra do sisal. A adaptação foi feita pelo CBA. O equipamento é movido à gasolina, o que facilita o manuseio próximo das plantações. Possui motor de 5,5 HP/GX160 Honda, com rotação de 1.800 rotações por minuto - rpm (capacidade 3,6 litros/5horas – consumo 0,66 L/h).

FIGURA 10 – Máquina desfibradora



Fonte: do autor.

A desfibragem da folha é realizada em duas etapas. Na primeira a folha é colocada na cavidade frontal da máquina e desfibrada até a sua metade; em seguida é desfibrada a outra metade da folha (FIG. 11). A duração da desfibragem de uma folha dura em torno de sete a nove segundos, dependendo do seu comprimento. Após a extração as fibras são lavadas para remover os resíduos de seiva. Uma planta gera em torno de 30 gramas de fibra.

FIGURA 11 – Processo de extração da fibra



Fonte: do autor.

O resíduo gerado na extração da fibra é chamado de mucilagem (FIG. 12). A mucilagem é composta da seiva da planta e pequenos resíduos da fibra que está sendo utilizada pelos produtores, como ração animal ou fertilizante orgânico. Na etapa seguinte ocorre a lavagem das fibras para renovar os resíduos de seiva resultante do processo de extração. Essa etapa é muito importante no processo

de beneficiamento da fibra, pois se restar algum resíduo pode verificar-se proliferação de fungos na fibra. Antes da lavagem é possível perceber a cor, após a lavagem fica impossível identificar de qual espécime veio a fibra. Após a lavagem a fibra é seca naturalmente pelo período mínimo de 48 horas, acondicionada em fardos e armazenada para distribuição.

FIGURA 12 – Mucilagem e secagem da fibra (roxo-avermelhado e verde-claro)



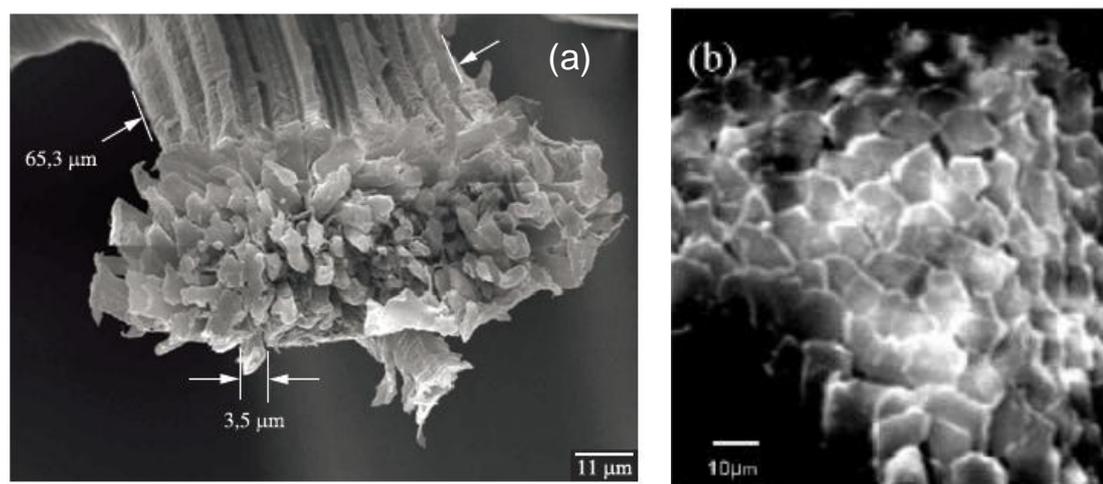
Fonte: do autor.

Na literatura ainda são poucos os trabalhos de caracterização química da fibra do curauá, no entanto, os resultados quanto à composição típica é apresentada por Hoareau *et al.* (2005) como sendo: celulose 73,6%, hemicelulose 9,9%, lignina 7,5% e cinzas 0,9%. Já em outro trabalho a composição encontrada foi: celulose 66,4%, lignina 7,5%, xilana 11,6%, mannan 0,1%, galactan 0,5% e arabinan 0,5% (MISHRA *et al.*, 2003). Estudo desenvolvidos por Caraschi e Leão (2000) mostram a caracterização química como: celulose 70,7%, umidade 7,92%, cinzas 0,79%, solubilidade em água quente 1,03%, solubilidade em NaOH 1% 19,3%, solubilidade em ciclo-hexano: etanol - 1:1 0,48%, holocelulose 91,8%, lignina 11,1% e índice de cristalinidade 75%. Os autores consideram a possibilidade do uso da fibras de curauá em materiais compósitos ou novos produtos.

Estudos desenvolvidos por Spinacé *et al.* (2011) mostram que a fibra de curauá possui diâmetro médio (\varnothing m) de 65 μ m. Já Gomes *et al.* (2007) ressaltam um (\varnothing m) equivalente a 9-10 μ m (FIG. 13). Pode-se observar também nas micrografias obtidas por MEV da secção em corte das fibras de curauá que a fibra

é composta por feixes de microfibrilas. Esse aspecto, além do ângulo em que as fibrilas se encontram na estrutura, reflete nas suas propriedades mecânicas, pois, de acordo com Hughes (2004), o módulo de elasticidade das fibras vegetais diminui em função do aumento do ângulo das microfibrilas.

FIGURA 13 – Microscopia eletrônica de varredura das fibras de curauá



Fonte - (a) Spinacé *et al.* (2011) e (b) Gomes *et al.* (2007).

A fibra de curauá é aplicada como reforço mecânico em compósitos poliméricos para o desenvolvimento de peças plásticas na linha automotiva (ZAH *et al.*, 2007). Tomczak (2010) realizou estudos que caracterizaram térmica e mecanicamente a fibra de curauá, como demonstrado nas curvas de degradação analisadas nas atmosferas de nitrogênio e oxigênio.

Estudos mostram que a utilização combinada de fibra de curauá e vidro, formando compósitos híbridos, possibilita o incremento significativo das propriedades mecânicas, mantendo algumas das características e vantagens das duas classes de fibra (SILVA, 2010).

Trabalhos desenvolvidos por Ford *et al.* (2007), Neira (2005) e Araujo e Mothé (2004) enfatizam a eficiência da fibra *in natura* de sisal e de coco na formulação de compósito associados à fibra de curauá. Cordeiro *et al.* (2009) realizaram uma análise da viabilidade econômica das monoculturas de paricá (*Shizolobium amazonicum*) e curauá e da associação no cultivo de ambas. Foi constatado que o plantio associado é economicamente recomendável, tanto para agricultores que

desejam implantar um reflorestamento como para empresas interessadas em reduzir o custo florestal.

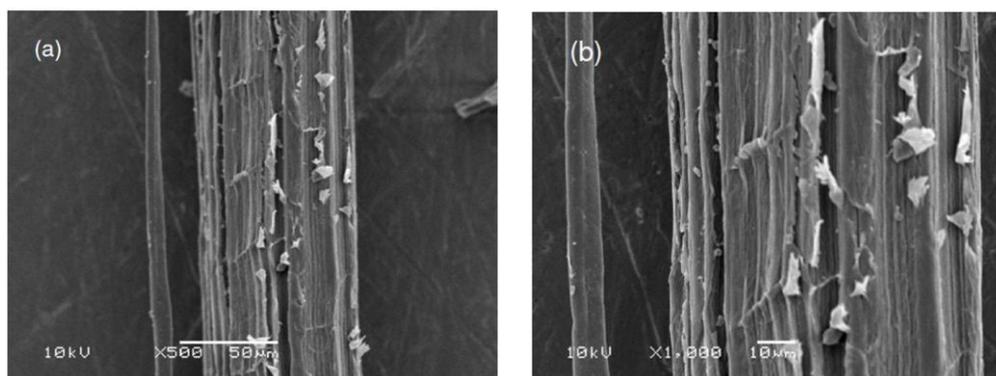
Também são encontrados estudos de espectroscopia dessas fibras, incluindo espectroscopia infravermelho, e de propriedades físicas e mecânicas, incluindo cristalinidade, resistência à tração em diferentes condições e propriedades térmicas. Estudos de difração de Raios-X revelam um índice de cristalinidade das fibras de curauá em torno de 66%, o que pode explicar a alta resistência observada. O coeficiente de expansão térmica da fibra única e do feixe de fibras, no intervalo de temperaturas entre 293 e 323 K, foi determinado como sendo $38,07 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ e $10,57 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$, respectivamente (TOMCZAK, 2010; TOMCZAK; SATYANARAYANA; SYDENSTRICKER, 2007)

Resultados de estudos de Caraschi e Leão (2000) demonstraram que até 200°C ocorre a perda de água e de alguns componentes como ceras e sujidades, enquanto próximo de 250°C inicia-se a degradação das estruturas químicas dos componentes das fibras, seguida de carbonização com perda de massa entre 18 e 85%. Em 2007, Tomczak, Satyanarayana e Sydenstricker constataram que no primeiro pico exotérmico entre 200 e 290°C há degradação de hemicelulose e entre 240 e 360°C há degradação da celulose, formando uma estrutura ramificada. Num outro pico, entre 280 e 500°C, ocorre a degradação da lignina. Percebe-se que a lignina se decompõe lentamente com o máximo de 439°C (SPINACÉ *et al.*, 2009).

Nos ensaios realizados por Silva (2010) a perda de massa nas fibras *in natura* iniciou-se com a evaporação de água entre 32 e 125°C, sendo o ponto de máxima evaporação em torno de 69°C. Um segundo processo de perda de massa verificou-se entre 174 e 253°C, atribuído à degradação de hemicelulose, ceras e sujidades presentes nas fibras *in natura*. A degradação continuou com a presença de um ombro entre 295 e 317°C, creditado à degradação de hemicelulose. Entre 317 e 398°C, com máximo grau de degradação em torno de 365°C, detectou-se principalmente a degradação da celulose. Acima de 365°C a perda de massa continua com a degradação da lignina restante.

As fibras de curauá são formadas por um conjunto de microfibrilas, a superfície da fibra é ligeiramente rugosa e não uniforme, o que pode facilitar a adesão fibra/matriz (FIG. 14). Diferentemente das fibras sintéticas, essas fibras apresentam grande diversidade na forma geométrica da seção transversal, lembrando também que o diâmetro das fibras de curauá não é uniforme ao longo do comprimento das fibras (SILVA, 2010).

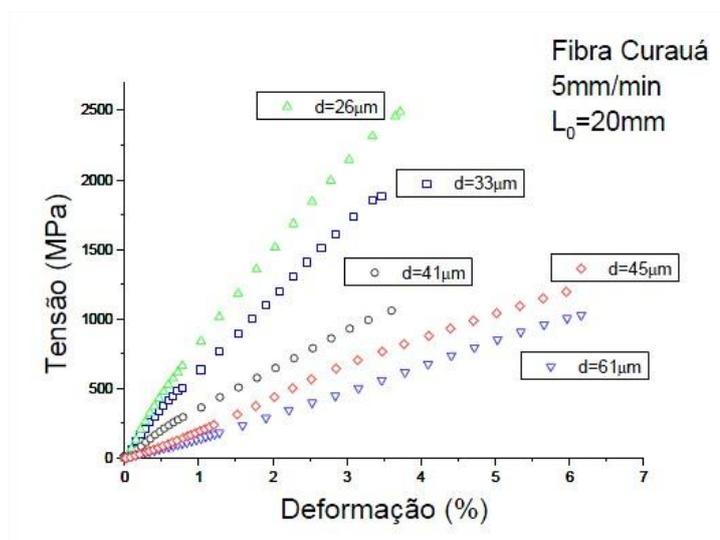
FIGURA 14 – MEV lateral fibra de curauá lavada em duas ampliações:(a) X500, (b) X1.000



Fonte: Silva (2010).

Tomczak (2010) utilizou o ensaio de tração-deformação para avaliar as propriedades mecânicas da fibra de curauá utilizando cinco amostras com diferentes diâmetros (FIG. 15).

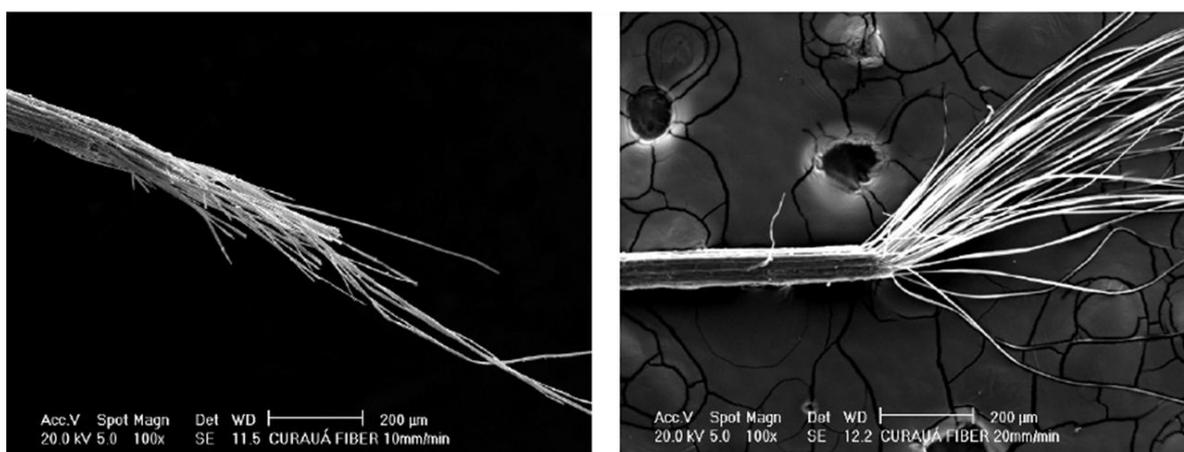
FIGURA 15 – Curvas de tensão-deformação de fibras de curauá com diferentes diâmetros



Fonte: Tomczak (2010).

As curvas analisadas demonstram comportamento de baixa deformação, em torno de 3 a 6%, da fibra de curauá. Após as análises mecânicas, Tomczak (2010) realizou análises morfológicas da fibra, com microscopia óptica para observar a fratura da fibra, em que é observada uma fratura frágil das microfibrilas (FIG. 16), comportamento de ruptura diferente, dependendo da velocidade do teste.

FIGURA 16 – Microscopias das fraturas das fibras de curauá em diferentes velocidades



Fonte: Tomczak (2010).

2.4 Conforto térmico

O conforto térmico é uma condição psicológica e está relacionada à satisfação com as condições térmicas de um ambiente, sendo julgado como processo cognitivo que envolve parâmetros que são influenciados por processos físicos, fisiológicos, psicológicos, entre outros (ASHRAE, 1992). As sensações de conforto e desconforto térmico são analisadas diretamente com base na temperatura e umidade detectada pela pele, na temperatura sentida no interior do corpo e nos esforços necessários para obter a regulamentação da temperatura corporal. Segundo Lamberts *et al.* (2007), um ambiente termicamente neutro é aquele em que a pessoa se sinta termicamente confortável (sem calor ou frio) em relação ao ambiente em que se encontra.

A *International Organization of Standardization* (ISO) 7730 (1994) define conforto térmico como a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente. Frota e Schiffer (2007) consideram os níveis de satisfação térmica do corpo

humano aquele que exibe temperatura em torno de 37°C, geralmente obtidos quando é mantida uma faixa estreita entre 36,1 e 37,2°C. O desconforto, em consequência, poderá ser causado por correntes de ar, diferenças de temperaturas, assimetria da temperatura radiante, taxa metabólica alta ou ainda por uma vestimenta pesada. A *American National Standards Institute/ American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning (ANSI/ASHRAE) Standard - 55 (2004)* estabelecem a diferença de temperatura do ar vertical admissível entre a cabeça e os tornozelos abaixo de 3°C e para temperatura de piso admissível o intervalo de 19 a 29°C.

Os primeiros estudos referentes às condição combinadas de temperatura e umidade do ar (termo-higrometria) e suas influências no rendimento operacional em ambientes de produção industrial foram registrados em 1916 (FROTA; SCHIFFER, 2007). Essas pesquisas tiveram a participação da Comissão Americana de Ventilação (CAV), cujo objetivo foi avaliar o rendimento do trabalho dos operários que desempenhavam atividades físicas em diferentes temperaturas. Também foram investigadas as condições às quais soldados em guerra são submetidos. Os estudos comprovam que, para esforços físicos, o aumento da temperatura de 20 para 24°C diminui o rendimento em 15%. Em ambientes cuja temperatura seja de 30°C e a umidade relativa do ar em torno de 80%, o rendimento diminui por volta de 28% (FROTA; SCHIFFER, 2007).

Áreas como Engenharia, Arquitetura, área médica e atualmente o *Design* vêm se dedicando ao estudo do conforto humano, buscando melhorar o conforto pessoal onde se vive, trabalha, estuda, diverte, etc. O homem busca sentir-se bem termicamente quando está em um ambiente ou quando utiliza um bem de consumo ou um produto. Para De Moraes (2010), normalmente se busca em um produto, em primeiro lugar, a solução para um problema funcional específico e hoje, cada vez mais, pelas suas qualidades estéticas, de identidade, de exclusividade e por proporcionar reconhecimento social e estima. No entanto, estudos relacionados ao conforto térmico buscam compreender os fatores motivacionais e comportamentais relacionados a essas necessidades para desenvolver soluções inovadoras e criativas que possam atender aos seus

desejos e proporcionar mais satisfação e melhor qualidade de vida para essas pessoas (LANA; LAGE, 2007).

Aspectos relacionados ao conforto térmico podem ser afetados por diferentes variáveis que são classificadas como variáveis humanas e ambientais. As variáveis humanas estão relacionadas ao tipo de vestimenta, ao metabolismo das pessoas e pode ser afetado pela idade, sexo, peso, hábitos alimentares, etc. As variáveis ambientais são a temperatura radiante média, a velocidade do ar, a umidade relativa do ar e a temperatura do ar, sendo esta última a principal variável. A velocidade e a umidade do ar são importantes nas perdas de calor por evaporação, responsáveis por aproximadamente 25% das perdas de calor do corpo humano (LAMBERTS *et al.*, 2007). A atividade que a pessoa exerce irá determinar sua temperatura corporal e a quantidade de suor que irá provocar. Estudos de Fanger (2001) mostram que se a temperatura da pele de uma pessoa estiver acima ou abaixo de certo valor ($\approx 37^{\circ}\text{C}$), o indivíduo não estará termicamente confortável (LAMBERTS; XAVIER; GOULART, 2002). O autor cita quatro situações comuns que podem provocar desconforto: radiação térmica (janelas frias, superfícies não isoladas, calor de fornos ou máquinas, etc.), correntes de ar, gradiente de temperatura no sentido vertical (temperatura da cabeça superior à dos pés) e pisos aquecidos ou resfriados.

Existem vários métodos de se avaliar o efeito conjunto das variáveis do conforto térmico, sendo a que mais se aproxima ao perfil climático brasileiro o proposto por Fanger (2001). O autor utiliza um “estado estacionário” ao assumir que um organismo exposto a um ambiente térmico constante por tempo prolongado encontra-se em equilíbrio com o mesmo. Esse método leva em consideração variáveis do conforto térmico como *Predicted Mean Vote* (PMV) e índice de pessoas insatisfeitas *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD), sendo considerado um método de avaliação completo e descrito na norma ISO 7730/94 - “*Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*” (LAMBERTS; XAVIER; GOULAR, 2002). A norma especifica os critérios de conforto com base em uma correlação entre a sensação térmica e o grau de desconforto/conforto das

pessoas em determinado ambiente. A norma considera confortável o ambiente no qual as pessoas que se sentem satisfeitas atingem percentual de 90%.

Com base nas zonas de respostas fisiológicas e comportamentais dos indivíduos, que variam segundo as atividades que estiverem desempenhando e as condições a que estiverem submetidos, pode-se determinar uma zona de conforto considerando-se as vestimentas utilizadas e as atividades exercidas. Conforme Lamberts, Xavier e Goulart (2002), seguindo o método de PMV, para pessoas sem qualquer vestimenta a zona de conforto estaria entre 29 e 31°C e para pessoas com vestimenta normal de trabalho estaria entre 23 e 27°C. Outra faixa de temperaturas um pouco mais flexível para o conforto térmico foi proposta por Givoni (1998) e validada por Barbosa e Lamberts (2002) para a cidade de Londrina, no Paraná, onde a zona de conforto estaria entre 18 e 29°C. Nessa proposta não são consideradas a umidade do ar e outras características climáticas, enfatizando-se apenas a temperatura do ar, por ser o fator preponderante na avaliação do conforto térmico.

2.4.1 O *designer* e o conforto de ambientes

No século XVIII, quando a Revolução Industrial apresentou ao mundo o atual sistema de produção, não se imaginava que ela seria responsável por mais outra revolução. O conceito de lar que temos nos dias de hoje foi formado em consequência dessa revolução. A partir do momento em que as atividades produtivas e de comercialização foram desvinculadas das residências e transferidas para as fábricas, lojas e escritórios, as casas assumiram o caráter exclusivo de um espaço doméstico de desfrute do tempo ocioso. O ato de ir trabalhar nas fábricas não agradava os operários, ainda na visão de Forty (2007), pois eles tinham sua liberdade controlada por administradores e supervisores que impunham regras para o seu dia de trabalho, ao contrário de quando trabalhavam em casa e decidiam quando iriam e por quanto tempo trabalhariam. Esses fatores opressivos impostos aos operários não apenas separaram fisicamente os locais de trabalho do lar, mas também estimularam a manter mentalmente os dois espaços separados, onde o lar passou a receber virtudes positivas que o

transformou em um abrigo onde se era recuperada parte do respeito perdido nas fábricas.

Essa mudança, segundo o autor, também aconteceu na classe dos empregadores e grandes empresários, que antes mantinham suas residências próximas das fábricas. E no final do século XIX, afirmando que o mundo em que trabalhavam era brutal e ilusório e necessitavam experimentar e expressar as virtudes morais e emoções honestas, começaram a construir suas chácaras e mansões em bairros diferentes, sem a atmosfera industrial (FORT, 2007).

Com todas essas mudanças, as casas passaram a adquirir caráter novo e diferenciado, a preocupação agora passou a ser deixar mais harmoniosos o ambiente doméstico, a decoração e o *design* dos objetos que passam a compor o ambiente. Toda essa evolução que ocorreu para que as residências fossem transformadas em lar é visível até nos dias atuais. Exemplo disso é a importância que a cozinha adquiriu como cômodo de maior relevância nas residências, um posto anteriormente mantido pelas salas de visitas. Essa mudança se deve ao fato de que não se possuía mais uma grande quantidade de empregados e os trabalhos domésticos acabaram sendo absorvidos pelos membros da família (FORT, 2007).

As residências são hoje espaços que interagem entre si, a cozinha se encontra em um espaço ao lado das salas, a varanda pode ser inserida na sala dependendo da necessidade do usuário, uma tendência que surgiu entre os anos de 1960 e 1970 em Nova York com a utilização dos *loft's* como moradia para profissionais liberais nos Estados Unidos da América. Essa nova forma de viver se transformou em desafio para engenheiros, arquitetos e *designers* de interiores e de produto, pois necessitam acompanhar essa tendência e desenvolver ambientes diferentes, mas que convivam harmoniosamente junto com produtos que devam ser utilizados nesses diversos espaços com harmonia e conforto. Nesse sentido, surge uma nova vertente de investigação, que é o *design* do conforto, que envolve não só aspectos estéticos, mas também aspectos técnicos de conforto dentro e fora dos ambientes construídos, onde o homem trabalha, vive e se diverte. O *design* do conforto é um assunto bastante atual e tem

merecido, nos últimos anos, atenção especial de profissionais e de pesquisadores. O termo tem suas raízes no conforto humano, buscando satisfazer de forma efetiva as condições da mente que expressa conforto/desconforto no lugar e/ou situação na qual o sujeito esteja inserido (PEDRA, 2011).

Promover a interação entre o usuário e o meio onde ele vive é uma das principais atividades exercidas pelo *designer*, porém atualmente essa interação está voltada para um campo mais subjetivo, porque o simples ato de consumir perdeu o seu significado junto ao usuário. Este ultrapassou as barreiras das análises objetivas e passou a perceber aspectos subjetivos que conferem fatores emocionais e lhe remetem a sentimentos, muitas vezes não identificados pelo próprio usuário. No entanto, o processo de percepção é permeado pelas sensações vivenciadas (CAMILOTI; LUZ; PISETTA, 2011). O conforto dos ambientes visto pelo prisma do *design* possibilita ampliar a desejabilidade desses locais para atender às necessidades do usuário e proporcionando mais atração pelo ambiente a partir da compreensão das necessidades, de seus desejos e de suas referências, para que o usuário obtenha estímulos sensoriais positivos que sejam refletidos física e emocionalmente. O ambiente doméstico é o seu local de refúgio, um espaço criado para se manter afastado do caos do cotidiano e lhe proporcionar conforto, funcionalidade e prazer, um conjunto com espaços e objetos que o compõem em uma disposição harmoniosa. Essas informações foram disponibilizadas pela *Reader's Digest* para publicação no "O Grande Livro da Decoração", em 1976. Contudo, Forty (2007) realça o fato de que o lar se torna uma fonte de bem-estar físico, uma transformação de ambiente visível quando passou de um espaço de beleza para se tornar um espaço eficiente.

Dessa forma, a criação de novos materiais que permitam criar ambientes termicamente confortáveis e busquem satisfazer as necessidades de conforto de forma sustentável passa a ser compromisso ético entre os profissionais e pesquisadores. Nesse sentido, diferentes estudos estão sendo desenvolvidos para avaliar as questões pós-ocupação de edifícios, mostrando a influência das condições de conforto térmico sobre a qualidade do ambiente e sua influência sobre o desempenho dos usuários e do seu conforto pessoal (BARBOSA;

LAMBERTS, 2002; BATIZ *et al.*, 2009; CONCEIÇÃO; LÚCIO, 2011; KRÜGER, 1999; NOGUEIRA; NOGUEIRA, 2003; XAVIER; LAMBERTS, 1999).

2.5 Ensaaios não destrutivos

Os ensaios não destrutivos são realizados em materiais para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos internos no material, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior. Uma definição clássica de ensaios não destrutivos diz que são aqueles que não prejudicam nem danificam o uso futuro do elemento ensaiado, ou seja, não provocam perda na capacidade resistente do elemento (LEITE, 1966). Esses ensaios, além de serem de fácil execução, podem ser realizados *in loco*, com baixo custo e ausência de danos, o que permite que sejam repetidos várias vezes. No entanto, o conhecimento das condições de trabalho e de teste deve servir de guia para o estabelecimento de critérios de qualidade, uma vez que os resultados são, na maioria das vezes, de caráter qualitativo e com significado indireto (AGUILAR *et al.*, 2003).

Apesar de serem muitas as técnicas utilizadas para inspeção de materiais por métodos não destrutivos, nenhuma delas pode revelar todas as informações requeridas (CASTANEDO, 2005). Uma técnica de ensaio não destrutivo que vem sendo cada vez mais utilizada é a termografia infravermelha. Sua aplicação para estudo de metais é bastante difundida, mas não é usual para a investigação de materiais cimentícios (CASTANEDO, 2005; CORTIZO, 2007; MALDAGUE, 2002; MALHOTRA; SIVASUNDARAM, 1991; MEOLA *et al.*, 2005; PEDRA, 2011; RANTALA *et al.*, 1997; SALES *et al.*, 2011; TAVARES, 2006; WEIL, 1991).

2.6 Conceitos de termografia infravermelha

A termografia infravermelha é uma técnica que utiliza um equipamento (visor térmico) que capta a radiação térmica emitida pela superfície em estudo sem a necessidade de contato. Esse equipamento converte a radiação térmica emitida pela superfície do objeto, que é invisível ao olho humano, devido ao seu comprimento de onda em imagens visíveis e detalhadas do perfil de temperaturas

da sua superfície. Sua história tem início em 1800, quando Willian Herschel descobriu os raios infravermelhos. Ele tentava conhecer quais cores do espectro eram responsáveis pelo aquecimento dos objetos. Chegou então à conclusão que a temperatura subia à medida que se passava da cor violeta para o vermelho e que a maior temperatura ocorria para além do vermelho, para além do visível. Contudo, a termografia teve o seu nascimento mais especificamente no pós-guerra, quando foi amplamente aplicada no rastreamento e localização noturna de alvos. Em 1950, com o surgimento do radiômetro percebe-se importante avanço na utilização da termografia, uma vez que esse equipamento foi capaz de medir os fluxos de radiação ou a força da radiação eletromagnética em curtas distâncias. Em 1990 o método de termografia se desenvolveu efetivamente com o surgimento dos detectores *charged coupled device* (CCD), dispositivo que transforma a luz em sinais elétricos de baixo ruído capazes de criar imagens de alta qualidade. O início desse século foi marcado por grandes avanços, com a introdução de microbolômetros e com os progressos dos detectores térmicos e câmeras de infravermelho, o que possibilitou o desenvolvimento de equipamentos cada vez mais sofisticados e compactos. Por se tratar de uma técnica e ensaio não destrutivo, esse método termoanalítico segue por um caminho emergente nas pesquisas, sendo uma alternativa para diagnosticar, analisar, monitorar e identificar defeitos, anomalias e falhas em sistemas ou materiais invisíveis ao olho humano (HUDSON, 2006; MENDONÇA, 2005; MEOLA *et al.*, 2005; ROGALSKI, 2004).

Os avanços tecnológicos implementados na área de termografia nos últimos 20 anos ampliaram consideravelmente a sua atuação em indústrias de grande porte em parceria com universidades de todo o mundo (CHRYSOCHOOS, 2012). Vários métodos e formas de pesquisas estão sendo implementados. Titman (2001) mostra que para perfeita aplicação da termografia é necessário que se verifiquem três condições básicas: o objeto ou superfície em estudo deve apresentar temperatura diferente do meio em que se encontra; uma diferença no gradiente térmico do objeto, com as mesmas propriedades, pode significar um defeito ou uma falha do material; na ausência das condições anteriores pode ser aplicada uma fonte de calor ou de frio na superfície de modo a realçar anomalias ou defeitos do objeto em estudo. Meola *et al.* (2005) sugere que a existência de

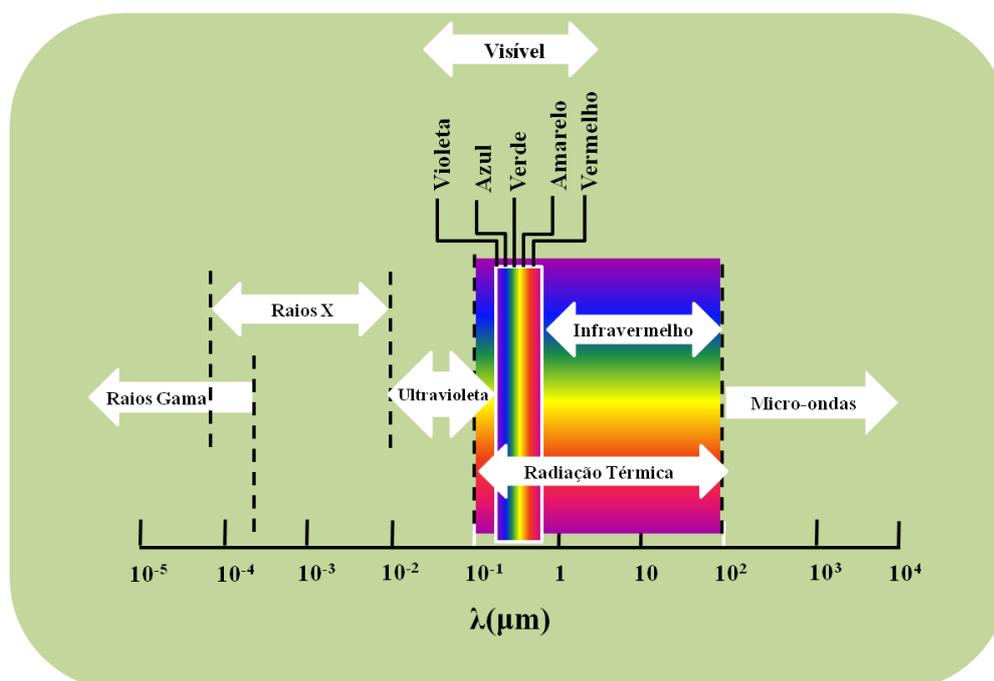
defeitos a certa profundidade da superfície interfere no fluxo de calor que atravessa o material, causando variações locais da temperatura superficial, as quais podem ser detectadas com a aplicação da termografia.

Tarpani *et al.* (2009) realizaram pesquisas utilizando a termografia infravermelha como método de avaliação de danos causados por impacto em matriz polimérica reforçada com fibras de carbono, obtendo resultados positivos. Larbi Youcef *et al.* (2011) desenvolveram estudos com base na simulação em uma bancada de teste que avaliou a resistência térmica de paredes construídas com diversos níveis e tipos de materiais isolantes.

2.6.1 Princípios da radiação

Um dos princípios da radiação é a transmissão de energia na forma de onda eletromagnética caracterizada por determinado comprimento de onda capaz de interagir com meios distintos. As unidades mais comuns em infravermelho (IR) é μm , micron ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} = 1/1.000 \text{ mm}$). O espectro eletromagnético está dividido em bandas, delimitadas em função do comprimento de onda, traduzindo as características físicas das fontes emissoras. Embora a emissão da radiação ocorra em diferentes comprimentos de onda, existe um intervalo do espectro eletromagnético em que a radiação é detectada em forma de calor, conforme mostrado na FIG. 17 (HOLST, 2000; INCROPERA; DeWITT, 2008; KREITH, 1977; PAPPALLETTERE, 2004).

FIGURA 17 – Espectro eletromagnético

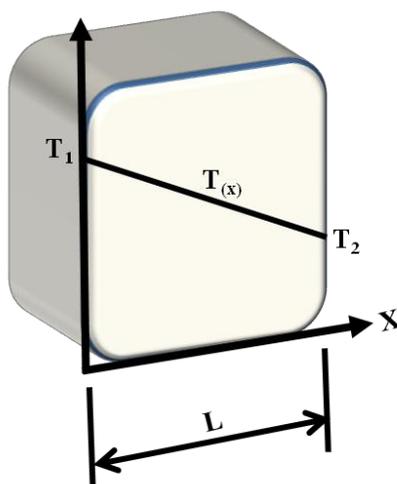


Fonte: adaptado de Incropera e DeWitt (2008).

2.6.1.1 Condutividade térmica

Para que um fluxo de energia térmica exista, deve haver sempre uma fonte de calor que fluirá de zonas mais quentes para zonas mais frias. O calor é conduzido pelo material pela transferência direta de energia térmica gerada pela colisão entre as moléculas. Existem três formas de transmissão: fluxo de calor por condução, convecção e radiação. A condução, segundo Incropera e DeWitt (2008), ocorre quando a energia térmica é transferida por meio de um meio sólido ou fluido estacionário. O mecanismo físico responsável por esse tipo de transferência ocorre em função da passagem de energia de partículas mais energéticas para partículas de menos energia, devido ao movimento e interação que existe entre eles (átomos, moléculas ou elétrons livres) (FIG. 18). A taxa de fluxo de calor em condições de regime permanente é diretamente proporcional à condutividade térmica do objeto, à seção transversal do material a partir da qual o calor flui e à diferença de temperatura entre as duas extremidades do objeto. Este será inversamente proporcional ao comprimento ou espessura do mesmo.

FIGURA 18 - Modo de transferência de calor por condução



Fonte: adaptado de Incropera e DeWitt (2008).

O fluxo de calor transferido por condução, segundo a direção, é quantificado pela Lei de Fourier - Equação (1).

$$Q_{tempo} = \frac{A(T_1 - T_2)}{L} \quad (1)$$

Sendo:

condutividade térmica do material: $\lambda(W/m \cdot ^\circ C)$;

área da seção transversal: $A(m^2)$;

diferença de temperatura $T_1 - T_2$ (λ);

comprimento do percurso de condução: (L).

Multiplica-se o tempo pela potência para obter a energia: $1 \text{ joule} = 1 \text{ watt/segundo}$.

Para paredes compostas com várias resistências associadas define-se o coeficiente de transmissão térmica global (U , expresso em $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), pela Equação (2): Coeficiente de transmissão térmica.

$$U = \frac{1}{Rt} \quad (2)$$

A resistência térmica e o valor de U são parâmetros que devem ser considerados na termografia por infravermelhos quando aplicada ao estudo de envoltórias de

edifícios. O valor de U é a resistência térmica total entre as duas temperaturas de ar separadas por uma parede simples.

O QUADRO 3 apresenta valores de condutividade e capacidade térmica de alguns materiais:

QUADRO 3 - Valores de condutividade e capacidade térmica

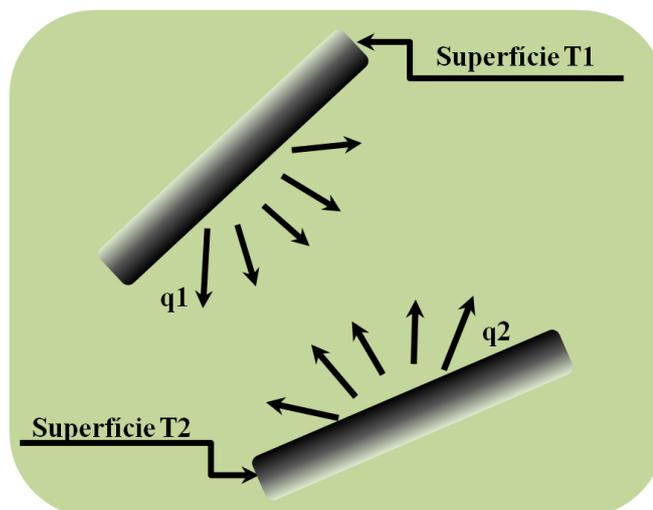
Materiais	Condutividade (W/m*K)	Capacidade (KJ/Kg*K)
Cobre	401	0,39
Alumínio	237	0,90
Aço	52	0,46
Gelo Puro	2,04	2
Tijolo	1	0,75
Vidro	0,9	0,84
Água	0,6	4,18
Madeira	0,14	1,80 – 2,80
Fibra de Vidro	0,04	-
Ar (Parado)	0,025	1
Argon	0,018	-
Xenon	0,0051	-

Fonte: adaptado de IST (2013).

Outra forma de transferência de calor é a convecção. Incropera e DeWitt (2008) acusam que ela pode ser considerada a forma de transferência de calor que ocorre entre uma superfície de um sólido e um fluido (gás ou líquido) em movimento quando eles estiverem sob diferentes temperaturas. O modo de transferência de calor por convecção abrange dois mecanismos: a transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório (difusão) e a energia transferida por meio do movimento global do fluido.

A radiação térmica é uma forma de transmissão de calor que não necessita de um meio material para sua propagação, pois superfícies com temperaturas diferentes do zero absoluto emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas (FIG. 19). Ao contrário da condução e da convecção, na radiação térmica o transporte de energia é instantâneo e associado a um mecanismo diferente. A energia não é transportada ponto a ponto no interior do meio, mas a partir de troca direta entre as superfícies afastadas e a diferentes temperaturas (INCROPERA; DEWITT, 2008).

FIGURA 19 - Troca de calor por radiação entre duas superfícies



(q_1 e q_2 : intensidades dos fluxos térmicos; T_1 e T_2 : temperaturas das superfícies).

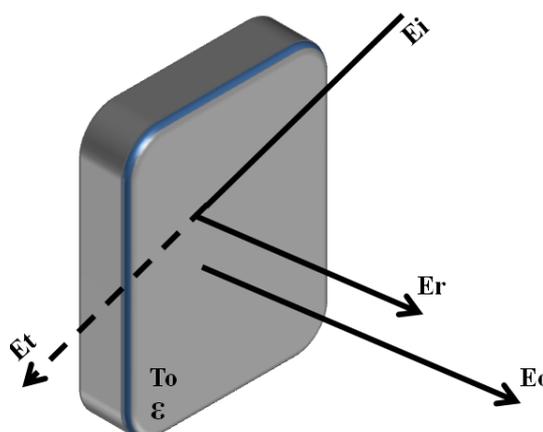
Fonte: adaptado de Incropera e DeWitt (2008).

A radiação ocorre mediante dupla transformação da energia: parte do calor do corpo com alta temperatura converte-se em energia radiante, que chega até o corpo com baixa temperatura, onde é absorvida em proporção que depende da superfície receptora, sendo novamente transformada em calor (FROTA; SCHIFFER, 2007; LAMBERTS; GHISI; PAPST, 2000).

2.7.2 Termografia por infravermelho

A radiação térmica, ou apenas radiação, depende de dois fatores: da temperatura e da capacidade que o corpo tem de emitir energia conhecida também como poder emissivo ou emissividade. Todos os corpos são emissores de radiação infravermelha. Uma das leis da Física diz que materiais que se encontrem com temperatura acima do zero absoluto (-273°C) radiam calor ou energia térmica, quanto maior a temperatura do material maior será a sua radiação. A radiação emitida e que sai de um objeto é então apresentada na FIG. 20.

FIGURA 20 - Radiação de corpos reais



Fonte: adaptado de IST (2013).

Na FIG. 20 E_o é a energia emitida, E_r a energia refletida, E_t energia transmitida, E_i energia incidente, ϵ emissividade. Assim, um corpo em condições de equilíbrio é demonstrado pela Equação (3) – Cálculo de incidência de energia:

$$E_o + E_r + E_t = E_i \quad (3)$$

A radiação que provém dos seus arredores e que incide em um objeto é chamada de radiação incidente. Quando essa radiação atinge o objeto, uma parte dessa radiação sempre será absorvida pelo material (α) e poderá mudar sua temperatura; outra parte será refletida (ρ), uma parcela pode ser transmitida (τ), logo, o poder emissivo máximo será (Equação 4 – Cálculo de incidência de radiação):

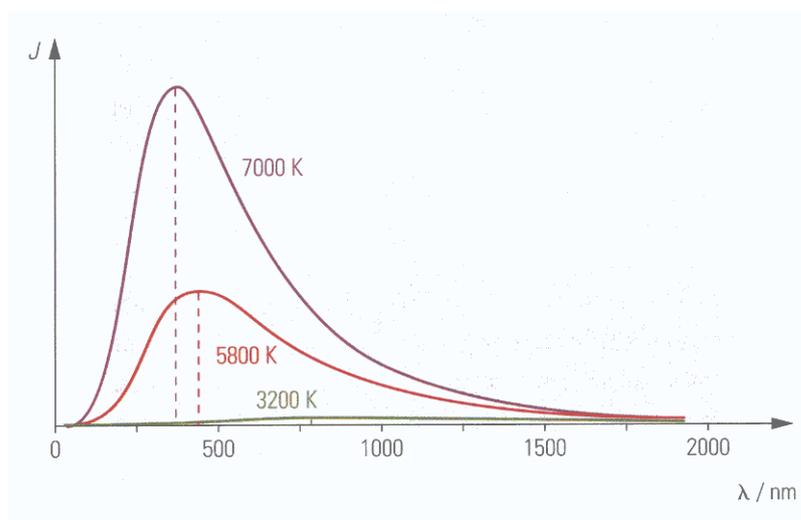
$$W\alpha + W\rho + W\tau = \text{Radiação incidente total} = 100\% \quad (4)$$

Então a proporção da radiação absorvida, refletida e transmitida vai depender das propriedades do material, sendo que cada material tem determinada capacidade para exercer essas funções e a soma das três será sempre igual a 1. A expressão matemática é apresentada na Equação 5 (Radiação, reflexão e transmissão em materiais), em que α representa a absorvidade, ρ é o coeficiente de reflexão e τ o coeficiente de transmissibilidade:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (5)$$

Para definir as características da radiação térmica das superfícies dos materiais é necessário introduzir o conceito de corpo negro. O corpo negro é aquele elemento que absorve toda a radiação incidente sobre um material, independentemente da direção ou do seu comprimento de onda. Existe um limite superior para o poder emissivo, que é previsto pela lei de *Stefan-Boltzmann* e de *Planck*. Essa lei descreve matematicamente as propriedades de um corpo negro em função da temperatura e comprimento de onda da radiação. Quanto mais alta for a temperatura do corpo, maior a agitação das partículas constituintes, maior as amplitudes das suas oscilações e as frequências das mesmas. A FIG. 21 mostra a variação da intensidade da radiação emitida por um corpo negro se a temperatura for maior ou menor do que a temperatura considerada: $K = 5800$.

FIGURA 21 – Curvas de Planck registradas graficamente



Fonte: <http://curiosidadcientifica.wordpress.com>.

O ponto máximo de cada curva difere em função do comprimento de onda e é determinado pela Equação (6): Lei do Deslocamento de Wien.

$$\lambda_{\text{max}} = 2898/T \quad (6)$$

Sendo: (2898) e o valor da constante de *Wien*, então, o corpo negro define o caso ideal de transferência de calor por radiação e o poder emissivo máximo para a superfície é definido pela equação (7): Lei de *Stefan-Boltzmann*.

$$\alpha = 1 \text{ logo } (\rho + \tau) = 0 \quad (7)$$

De modo geral, na vida real os objetos não são corpos negros, uma vez que grande parte deles não é transparente e sim opaca, ou seja, $\tau = 0$. No caso de objetos reais devem-se levar em conta os dois tipos de radiação: a que sai diretamente do objeto ou a emissividade e a radiação refletida que vem dos arredores, podendo ser calculada matematicamente pela Equação (8): Cálculo de radiação refletida.

$$W_{\varepsilon} + W_{\rho} = W_{\text{radiação}} = 100\% \quad (8)$$

Um corpo real tem uma emissão calculada matematicamente pela Equação (9): Cálculo de emissividade.

$$W_b = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (9)$$

Sendo:

W_b é o poder emissivo máximo;

T é a temperatura absoluta da superfície;

ε emissividade;

e a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^4$).

A emissividade é um ponto importante na análise termográfica, sendo vista como a taxa de radiação emitida por um corpo real comparada com a radiação emitida por um corpo negro, ambos à mesma temperatura e com o mesmo comprimento de onda. Seu intervalo de variação situa-se entre zero e um. A capacidade ou habilidade que um objeto possui para absorver energia radiante incidente é numericamente igual à capacidade que ele tem para emitir a sua própria energia em forma de radiação. Assim, pode-se representar matematicamente pela Equação 10 (Cálculo de absorção):

$$\begin{aligned} \alpha + \rho + \tau &= 1 \\ \alpha &= 1 \\ \varepsilon + \rho + \tau &= 1 \end{aligned} \quad (10)$$

O QUADRO 4 apresenta a emissividade de alguns materiais. Esses valores podem variar ligeiramente, dependendo da literatura de referência. Os valores de emissividade para análise dos resultados de termografia desta pesquisa estão em conformidade com os valores do Instituto Superior Técnico (IST, 2013) de Lisboa, Portugal, conforme QUADRO 4.

QUADRO 4 - Emissividade dos materiais

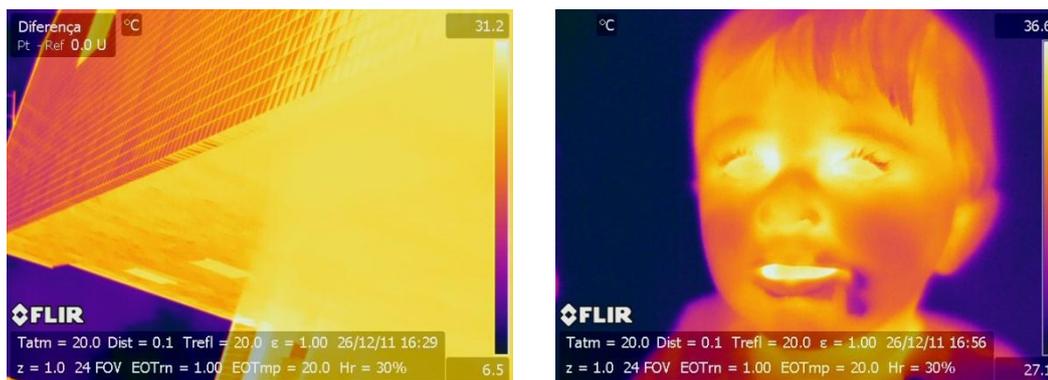
Materiais	Emissividade
Cobre	0,05
Aço	0,07
Alumínio Bruto	0,68
Alumínio Oxidado	0,85
Alumínio Polido	0,1
Cimento	0,95
Tijolo Regular	0,86 – 0,81
Plástico Branco	0,84
Plástico Negro	0,95
Papel Branco	0,07 – 0,9
Pele Humana	0,98
Madeira	0,9

Fonte: adaptado de IST (2013).

2.7.3 Descrição do método de termografia infravermelha

O método de captação da energia térmica dos materiais utilizando a termografia infravermelha é feito por meio de um equipamento que mede, calcula e reproduz a radiação a partir de detectores sensíveis ao infravermelho (atualmente em torno de 307.200 *pixels*) e a converte em sinais elétricos. Esses sinais normalmente são baixos e proporcionais ao fluxo de radiação, por isso são amplificados, lidos e processados em *softwares* e são transformados em imagens térmicas, os termogramas (FIG. 22).

FIGURA 22 – Imagens térmicas de uma fachada de edifício e de uma criança



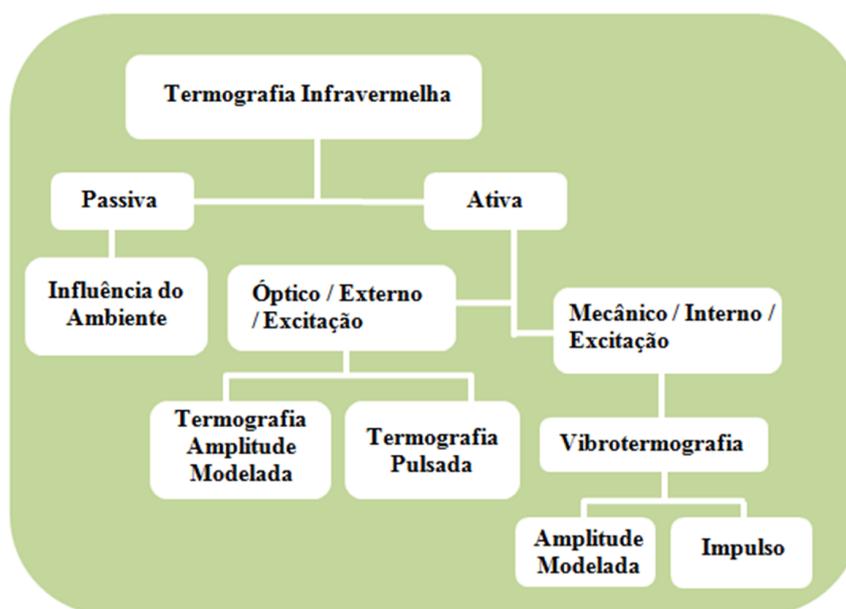
Fonte: cedidas por Sales (2011).

Dependendo do tipo de análise desejado, as câmaras termográficas são capazes de detectar variações de temperatura de forma qualitativa ou quantitativa (VERATTI, 2007). Na termografia qualitativa a imagem térmica é feita a partir de uma análise simples, em que são registradas apenas as diferenças de temperatura na superfície do material, indicando a existência ou não de uma anomalia. Pesquisa apresentada por Oliveira (2012) mostra o uso da termografia qualitativa para investigar zonas com deficiência de isolamento térmico em edifícios, como fuga de ar pelos fechamentos e umidade. Já na termografia quantitativa, a análise da imagem considera, além das variações de temperatura superficiais existentes, também outros parâmetros, como a temperatura ambiente, umidade relativa do ar, distância da superfície, emissividade, temperatura refletida, entre outras. As imagens térmicas podem ser analisadas por meio de *softwares* específicos do fabricante, nos quais são selecionados valores de dados capazes de traduzir quantitativamente os pontos de interesse. A partir desses dados é possível gerar gráficos e tabelas com auxílio do *Excel* e programas matemáticos como o *Matlab*, o que possibilita construir gráficos, mapas de temperatura e/ou mapas de superfície 3D.

Chrysochoos (2012) propõe uma discussão de aspectos teóricos e de práticas de aplicações específicas de técnicas por infravermelho, avançando nos estudos das imagens de forma que possibilite estudos de características termofísicas como a difusividade local ou a condução térmica do material, que possibilite medições quantitativas mais confiáveis da temperatura.

A radiação infravermelha medida pela câmara termográfica não depende exclusivamente da temperatura superficial do material, ela pode variar em função da emissividade do material, do meio ao qual está exposto e pela absorção atmosférica. Muitas vezes é necessário compensar esses efeitos por meio de lentes ou filtros especiais. Existem equipamentos que fazem essa compensação automaticamente, todavia, a emissividade, a temperatura aparente refletida, a umidade relativa do ar, a temperatura atmosférica e a distância entre o material e câmara devem ser introduzidas no equipamento ou durante a análise dos termogramas (PEDRA, 2011; SALES *et al.*, 2011). Dessa forma, a captação da radiação incidente sobre o material pode ser obtida a partir da estimulação que promove o aquecimento ou resfriamento do objeto. Dependendo da forma como é feita essa estimulação, os sistemas que utilizam sensores térmicos são classificados em passivos e ativos, conforme mostrado na FIG. 23 (CASTANEDO *et al.*, 2007).

FIGURA 23 – Técnicas mais comuns em termografia



Fonte: adaptado de Castanedo *et al.* (2007).

Nos sistemas passivos, nenhuma estimulação artificial é utilizada, existe apenas uma diferença natural de temperatura entre o objeto em estudo e o meio onde ele está inserido, que frequentemente está sob temperatura mais elevada. Nesse tipo de sistema apenas uma análise qualitativa, por comparação com uma situação

padrão, pode ser feita, ficando o resultado sujeito aos conhecimentos e à experiência do avaliador. Por outro lado, o emprego desse sistema no acompanhamento sistemático das condições normais de trabalho permite conhecer e identificar possíveis anomalias, entre outras (CASTANEDO, 2005; MALDAGUE, 2000; PEDRA, 2011; SALES *et al.*, 2011; TAVARES; CUNHA; ANDRADE, 2005). A termografia passiva é muito utilizada na avaliação de estruturas prediais, na Medicina, na descoberta de fogo em florestas, em programas de pesquisa de eficiência térmica, no monitoramento de tráfego em estradas, na agricultura, na Biologia, na investigação e detecção de gás e em testes de ensaios não destrutivos de modo geral. Nessas aplicações, os perfis de temperatura anormais indicam um problema potencial relevante a detectar. Lega *et al.* (2012) utilizam a termografia infravermelha para detectar, avaliar e monitorar sinais de contaminação ambiental, utilizando plataformas aéreas. No estudo foi possível identificar fontes de poluição e águas contaminadas.

Segundo Maldague (2000), na termografia passiva um material com um diferencial de temperatura do ponto quente em relação ao entorno, na ordem de 1°C a 2°C (fora da faixa da incerteza), pode indicar algum tipo de problema. Entretanto, quando essa diferença está acima de 4°C, é uma forte evidência de comportamento anormal do material. Castanedo *et al.* (2007) consideram esse tipo de estimulação como externa, porque a energia incide sobre a superfície e propaga-se através do material até encontrar a anomalia. Maldague (2000) propõe que, em casos em que se deseje obter resultados quantitativos, deve-se usar a termografia ativa.

Na termografia ativa, ao contrário da termografia passiva, um estímulo externo é necessário para gerar diferenças relevantes de temperatura. Diversas técnicas de estimulação térmica podem ser empregadas para provocar um fluxo de calor no objeto em estudo, cada qual com características e limitações próprias (MALDAGUE, 2000). As mais usadas são: termografia pulsada, termografia modulada ou termografia *lock-in*, termografia pulsada por fase de aquecimento e a vibrotermografia (CASTANEDO, 2005; MALDAGUE, 2000; MEOLA *et al.*, 2005; RANTALA, WU; BUSSE, 1996; TAVARES, 2006). A escolha do tipo de estímulo

térmico depende não só das características da superfície a ser testada, mas essencialmente do tipo de informação requerida.

Wiggenhauser (2002) relata que a termografia ativa pode ser utilizada na identificação de falhas não visíveis de um material e na detecção de umidade em amostras com mais segurança do que a passiva. Resultados semelhantes foram conseguidos por Tavares, Cunha e Andrade (2005). Na literatura consultada a técnica de termografia pulsada é a mais tradicional e consiste basicamente na aplicação de pulsos curtos de energia térmica na superfície do objeto em estudo (de 3 ms a 2 s, dependendo do material). Essa estimulação pode ser quente ou fria. O importante é o estabelecimento de um gradiente de temperatura entre a fonte térmica e o objeto de estudo. A intensidade da estimulação dependerá da diferença de temperatura entre o material em teste e o ambiente no qual ele está inserido (MALDAGUE, 2000; MEOLA *et al.*, 2005).

A termografia modulada, também conhecida como *lock-in*, é baseada no aquecimento oscilante (aplicação de ondas de calor em determinada frequência), de modo que sejam introduzidas ondas térmicas altamente atenuadas e dispersivas dentro do material e próximo da superfície. O campo de temperatura resultante é gravado remotamente com uma termocâmara, a partir da emissão térmica infravermelha do material. Isso pode ser feito acoplando-se o sistema a um amplificador de ondas térmicas ou a um computador. Essas ondas podem ser geradas e detectadas remotamente (MALDAGUE, 2002; MEOLA *et al.*, 2005).

A termografia pulsada por fase é uma técnica de processamento de sinal baseada na dualidade dos domínios de frequência e tempo e na transformada de Fourier. Cada função temporal tem uma representação de frequência que varia no tempo, mas possui valor constante no domínio de frequência. Utilizando-se o conceito da transformada de *Fourier*, a evolução temporal da temperatura, como obtida em uma clássica termografia pulsada, pode ser conduzida para o domínio de frequência, que é, de fato, a distribuição espectral de amplitude e fase (CASTANEDO; MALDAGUE, 2004; MALDAGUE, 2002; MEOLA *et al.*, 2005; TAVARES, 2006).

A vibrotermografia utiliza um sistema ultrassônico que provoca a vibração das partículas sem a necessidade de aquecer a superfície. As ondas ultrassônicas deslocam-se através do material e dissipam a energia nas anomalias, provocando libertação local de calor que, por sua vez, se desloca para a superfície. A vibrotermografia subdivide-se, da mesma forma, na técnica ativa de solicitação externa, em função do tipo e amplitude do sinal ultrassônico, como: vibrotermografia de amplitude modelada (*lock-in vibrothermography*) ou vibrotermografia por impulso (*burst vibrothermography*). Os avanços no desempenho das câmeras de infravermelho nos últimos 20 anos tornaram possível detectar pequenas trincas usando baixa excitação (pulsos de alta energia de curta duração). Em consequência a isso, houve renovado interesse em utilizar a vibrotermografia como um método de detecção não destrutiva de trincas (RANTALA *et al.*, 2007; RANTALA, WU; BUSSE, 1996; SALES, 2008).

2.7.4 Equipamentos de termografia

Atualmente, três tipos de sistemas de medição, segundo Barreira (2004), são utilizados na medição da radiação térmica: os termômetros pontuais ou de ponto quente, os *scanners* de linha e as câmaras termográficas. O termômetro pontual, como o nome indica, apenas fornece a temperatura de determinado ponto na superfície do elemento em estudo, embora não forneça uma imagem térmica. São aplicados em muitas técnicas não destrutivas. Os *scanners* de linha permitem obter um perfil de temperatura ao longo de uma linha na superfície do material e a resposta térmica é construída com a repetição sucessiva do processo de captação até atingir a imagem completa. As câmaras termográficas são instrumentos que captam, por meio de um detector, a radiação infravermelha emitida pela superfície do material e a convertem em um sinal elétrico. Esse sinal é tratado por uma unidade de controle presente no equipamento e posteriormente é transformado em uma imagem térmica de duas dimensões. A imagem gerada pode ser transferida para o computador, onde é tratada ou analisada, utilizando-se uma escala de cores ou em tons de cinza.

Modernos equipamentos que utilizam termografia por infravermelho dispõem de programas dedicados para o processamento de dados que são instalados em

computadores, de onde é possível importar as imagens para posterior manipulação de diversos parâmetros, como a temperatura refletida, temperatura atmosférica, emissividade, umidade relativa e distância focal. As funções de análise são variadas, podendo ser de ponto térmico, área, linhas isotérmicas, medição por linha térmica ou medição de dimensões. Os dados podem ser disponibilizados em forma de cálculo, gráficos ou histogramas. Durante a utilização da câmera termográfica os dados analisados são disponibilizados em tempo real, na forma de imagens térmicas, na tela do equipamento. A resolução da tela não tem influência na qualidade da imagem captada pelo sensor do equipamento que normalmente é de qualidade superior. Os dados podem ser armazenados como imagem digital estática, em formato de vídeo, com gravação digital de voz, o que permite dispor de informação detalhada juntamente com a imagem. Esses equipamentos são constituídos por vários componentes, sendo os principais as lentes, o detector, o processador eletrônico, controles e comandos, tela ou monitor, sistema de armazenamento de informações, processamento de dados, *software* de análise e filtros (BARREIRA, 2004).

As lentes desempenham importante papel em um equipamento termográfico, pois ela capta a radiação infravermelha incidente no detector, excluindo a radiação visível. Os materiais mais utilizados na construção da lente são o Germânio (Ge), Silício (Si), cristais de Selenite de Zinco (ZnSe) e Sulfato de Zinco (ZnS). A escolha tem impacto direto na resolução da medição devido às diferentes curvas de transmissão. As lentes possuem diversas distâncias focais. Para a maioria das aplicações a lente apresenta um campo de visão entre 16° e 25°. Nas aplicações em que o espaço de inspeção é limitado ou o campo de visão é muito amplo, é recomendada a aplicação de uma lente com ampla distância focal (HELLIER, 2003).

Existem situações em que é necessária a colocação prévia de filtros especiais de modo a obter uma medição correta. Antes da aplicação de qualquer filtro é importante conhecer o intervalo do espectro eletromagnético que a resposta do sistema irá ocorrer, para selecionar corretamente o filtro. Hellier (2003) sugere algumas aplicações mais frequentes: filtro de pico de chama suprime toda a radiação acima de 3,8 μm (sistemas *Short Wave*) ou 10,8 μm (sistemas *Long*

Wave), possibilitando a visualização de objetos quentes por meio de chamadas. Filtro de radiação solar suprime o efeito de brilho da radiação solar em sistemas *Short Wave* pela exclusão de comprimento de onda abaixo dos 3 μm . Filtros para superfícies de vidro: avaliação da superfície de vidro descarta comprimentos de onda abaixo dos 4,8 μm . Os equipamentos mais modernos já permitem o carregamento automático da curva de calibração no momento da instalação do filtro, embora seja necessária verificação regular para não afetar os valores de medição.

2.7.5 Vantagens e limitações da termografia

São inúmeras as vantagens e usos da termografia por infravermelhos. De modo geral destaca-se como vantagem o fato de não haver necessidade do contato direto entre objeto em estudo e a câmara termográfica. A distância de captação de imagem pode variar de muito próximo até longas distâncias, o que possibilita o estudo e a inspeção em áreas de difícil acesso ou consideradas potencialmente perigosas e sem riscos para o equipamento ou para o operador, o que torna esse tipo de ensaio bastante eficiente em termos de tempo e de custos. Outra vantagem é que a escala de medição do equipamento (variação -20°C e 1600°C) pode ser modificada com ajuste da abertura das lentes da câmara, além de possibilitar a utilização de filtros corretivos de controle de sensibilidade e ajuste da radiação térmica. Computa-se também como vantagem da técnica não ser necessária qualquer fonte de iluminação externa, o que permite sua utilização tanto em inspeções diurnas quanto noturnas. Os equipamentos são compactos e fáceis de transportar, possuem capacidade de detecção de pequenas variações de temperatura (até um valor de $0,04^{\circ}\text{C}$), aumentando seu campo de atuação e utilização tanto em laboratório quanto em campo (CLARK; McCANN; FORDE, 2003; MALDAGUE, 2000; TITMAN, 2001).

No entanto, alguns parâmetros da aplicação da técnica de termografia devem ser observados. Devido à sua complexidade eles exigem soluções construtivas e uso de mecanismos que influenciam a captação da radiação infravermelha, assim, a obtenção e análise da imagem térmica por termografia requerem qualificação para operar o equipamento, registrar e/ou interpretar corretamente os resultados.

A emissividade da superfície pode ser considerada um dos parâmetros mais significativos na avaliação termográfica. A variação ao longo da superfície pode levar a um perfil de temperaturas incorreto e diagnóstico duvidoso dos resultados. Uma limitação da termografia pode ser atribuída ao efeito da atenuação da radiação infravermelha na atmosfera, causada pela absorção da energia radiante por partículas que estão em suspensão, como CO₂ e o vapor de água, podendo afetar os resultados obtidos devido à difusão aleatória das partículas (CLARK; McCANN; FORDE, 2003; MALDAGUE, 2000; TITMAN, 2001).

Contudo, esses efeitos podem ser desprezados quando as distâncias são menores entre o objeto de estudo e o equipamento. Outros problemas poderão surgir quando a termografia é aplicada em áreas externas, podendo afetar a temperatura e influenciar nos resultados, tais como a interferência de obstáculos entre o equipamento e o objeto, árvores ou vegetação, pontes, rios, terraplanagens, rede elétrica ou de transmissão, entre outros. As condições climáticas ou o horário da medição têm impacto direto nos resultados obtidos, da mesma forma como a radiação solar incidente sobre a superfície em estudo pode elevar a temperatura. A chuva e o vento podem provocar queda brusca da temperatura ambiente (CLARK; McCANN; FORDE, 2003; MALDAGUE, 2000; TITMAN, 2001).

2.7.6 Aplicação da termografia

Atualmente, os sistemas de termografia por infravermelho têm se tornado uma técnica extremamente abrangente. Os equipamentos estão cada vez mais acessíveis, mais compactos, fáceis de transportar, com interessante custo-benefício. Atualmente, na área industrial a termografia por infravermelho se apresenta como uma técnica de inspeção extremamente útil, pois realiza análises sem necessitar de contato físico com o sistema em estudo. Pode realizar e verificar equipamentos durante o seu funcionamento sem interferir na produção, além de permitir a classificação de componentes elétricos e espessuras de revestimentos e obter o cálculo de trocas térmicas (ABENDI, 2012). Devido ao seu caráter não invasivo e não destrutivo, a técnica vem sendo empregada em diferentes áreas do conhecimento e investigação, tais como: astronomia e

exploração espacial, avaliação da eficiência de fornos e caldeiras, estudo dos materiais, construção civil, inspeção em fachada de edifícios, indústria aeronáutica e espacial, automobilística, eletrônica, inspeção e manutenção de sistemas elétricos, vigilância contra incêndios, manutenção de sistemas mecânicos, monitoração de reservatórios, controle de processos industriais, segurança e vigilância, usos militares e rastreamento noturno, medicina do homem e veterinária, estudo dos vulcões, entre outras.

2.7.7 Termografia aplicada ao estudo de materiais construtivos

Para estudo dos materiais construtivos existe grande interesse por novos métodos de controle que atendam às necessidades de se produzir mais rápido, com mais arrojo, com competitividade e dentro dos modernos padrões de controle de qualidade. Isso indica que haverá crescente utilização e conseqüente ampliação do mercado de termografia. Nos últimos anos, tanto o Canadá quanto os Estados Unidos estão desenvolvendo programas de apoio e investigação sobre essa técnica. Pode-se notar, contudo, que o método de infravermelho está adquirindo abrangência cada vez maior na avaliação dos diversos tipos de materiais. A relativa facilidade de utilização do equipamento e seu caráter não destrutivo indicam que o método poderá ser usado no futuro em larga escala para controle e inspeção de todo tipo de material, seja durante a sua produção ou na sua fase de uso. Uma de suas vantagens é possibilitar a inspeção de grandes superfícies com segurança e rapidez durante o dia ou a noite. Weil (1991) considera nesse processo a ação solar uma excelente fonte de energia para inspeção diurna. O sol pode alcançar grandes áreas e produzir distribuição uniforme de calor ao longo de toda a superfície a ser inspecionada. No caso de inspeção noturna esse processo pode ser invertido, funcionando o material como fonte de calor para o meio ambiente mais frio. Weil (1991) salienta que o importante é estabelecer um gradiente de temperatura entre o ambiente e o material e que calor deverá fluir através do mesmo, não importa em que direção seja.

Kirchhoff, *apud* Doebelin (1990) e Incropera e DeWitt (2003) consideram um ponto a se considerar a condição da superfície da área a ser testada, porque,

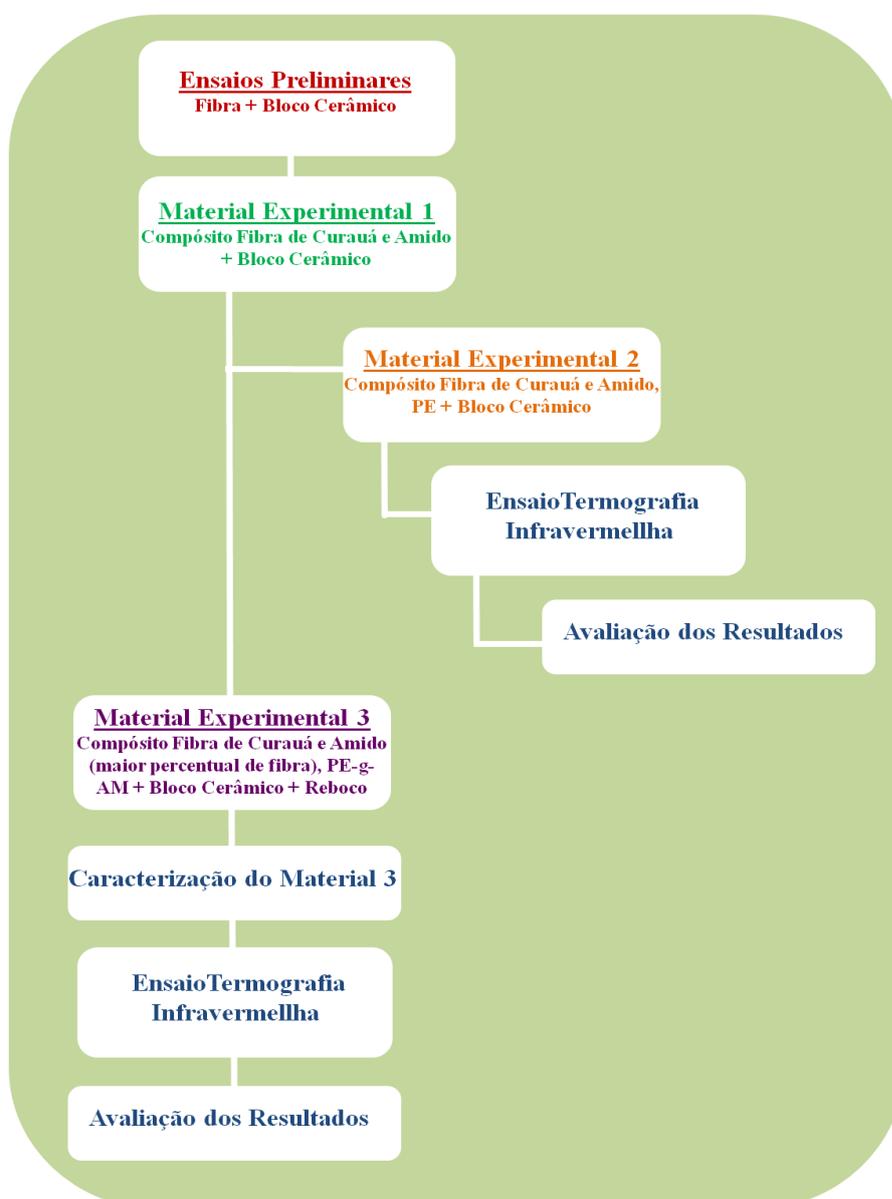
dependendo do material, fatores externos podem interferir na medição de temperatura, como nuvens, velocidade do vento, temperatura e umidade superficial, entre outros. Portanto, a aplicação e a utilização da termografia como técnica de ensaio não destrutivo dependem não só da experiência do usuário na manipulação do equipamento e na interpretação da imagem termográfica obtida, mas também, e, sobretudo, do conhecimento das características térmicas do material sob investigação e das condições ambientais presentes durante o ensaio, pois estes são fatores que influenciam preponderantemente os resultados.

De igual importância é o conhecimento das características da técnica termográfica a ser utilizada (WEIL, 1991; WIGGENHAUSER, 2002). Desde 2002, a técnica de termografia foi incluída nos regulamentos das construções de edifícios dos Estados Unidos e Reino Unido, com o objetivo de avaliar o isolamento térmico de suas instalações (CLARK; McCANN; FORDE, 2003).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em cinco etapas, que consistiram em ensaios preliminares, preparação das amostras de compósito amido/fibras curauá, preparação de material experimental 1, material experimental 2 e material experimental 3, aplicação, caracterização dos materiais do modelo experimental 3, ensaios termográficos e análise dos resultados. As etapas do trabalho são apresentadas na FIG. 24.

FIGURA 24 – Etapas do trabalho



Fonte: do autor.

3.1 Materiais

As fibras naturais de curauá utilizadas foram adquiridas da produção do sítio “Tucuxi”, que fica no município de Nova Olinda do Norte, no estado do Amazonas. As etapas de coleta e beneficiamento foram orientadas e acompanhadas de um engenheiro florestal do CBA.

Para a preparação dos compósitos baseados em amido e fibras foram utilizados amido de mandioca (*Manihot esculenta*) - fornecido pela Amidos Navirai, Glicerol (Synth) -, água deionizada e a fibra de curauá.

Para a confecção das amostras baseadas em PEBD/amido e fibra curauá, foi utilizado o PEBD (*Quattor*), PE-g-AM da Aldrich e PE-g-AM peletizado *Fusabond* MB 226D da DuPont.

Além disso, foram utilizados blocos de cerâmica (tijolo furado comum) fabricados no mercado de Belo Horizonte, MG, com dimensões de 14 x 19 x 29 cm e cola branca (acetato de polivinila) para aderência da fibra ao bloco de cerâmica. Os materiais utilizados foram adquiridos no comércio de Belo Horizonte. Depois de prontas, as amostras permaneceram por 24 horas em temperatura ambiente para climatização com o ambiente de teste. Esses blocos foram utilizados para o ensaio de termografia.

3.2 Métodos

Os métodos utilizados neste estudo estão descritos neste item.

3.2.1 Ensaio preliminares

A montagem e execução do primeiro experimento foram feitas no laboratório da Universidade do Estado de Minas Gerais. Foram utilizados blocos de cerâmica (tijolo comum furado) com dimensões de 14 x 19 x 29 cm. Duas amostras foram preparadas, sendo que uma delas teve a superfície coberta com a fibra de curauá *in natura* (cruzada, formando uma malha). Usou-se o acetato de polivinila (cola

branca) para aderir à fibra no bloco, a outra amostra serviu de referência e não sofreu interferência (FIG. 25).

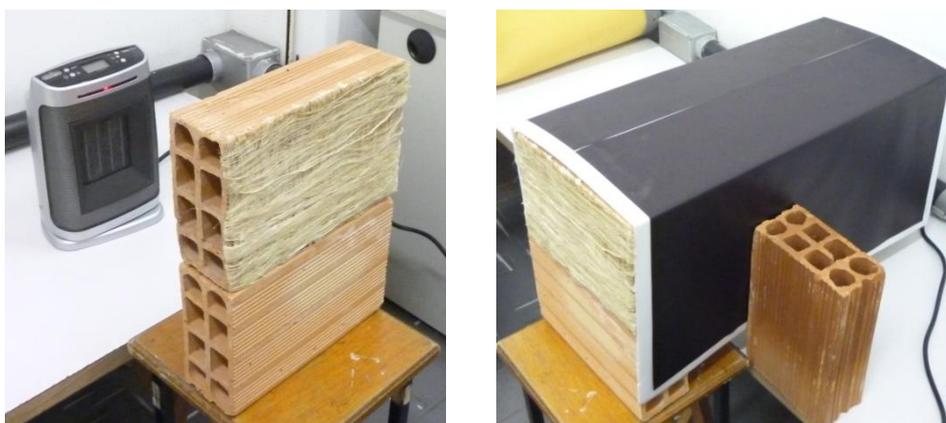
FIGURA 25 – Preparo das amostras: aplicação de fibra de curauá no bloco de cerâmica



Fonte: do autor.

A montagem e preparação do experimento foram realizadas utilizando-se um fechamento de poliestireno expandido (EPS) - isopor - e uma cobertura de papel-cartão, de modo a canalizar o calor do aquecedor para as amostras, conforme mostrado na FIG. 26.

FIGURA 26 – Ambiente de teste: aquecimento das amostras



Fonte: do autor.

As amostras permaneceram à distância de 150 cm em relação ao equipamento de termografia. A temperatura ambiente no momento da medição foi de 30°C, as medições foram realizadas de forma qualitativa pelo método de estimulação ativa. Wigganhauser (2002) descreve que a termografia ativa pode ser utilizada na identificação de falhas não visíveis de com mais segurança do que a passiva. O

ensaio teve início com o aquecedor elétrico ligado a 35 cm da parte posterior das amostras, de forma que elas recebessem o calor do aparelho. As imagens termográficas foram captadas da face frontal do bloco aos 24 e aos 35 minutos de aquecimento e após 40 minutos de resfriamento. As imagens térmicas foram então analisadas pelo *software ThermaCAM™ QuickReport © Flir Systems, 2007*.

3.3 Amostra de compósito 1

A preparação dos compósitos baseados em amido e fibras de curauá foi realizada no Laboratório de Engenharia de Polímeros e Compósitos (LEPCom) na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Foram utilizadas as proporções de 90% m/m de água deionizada, 7% m/m de amido de mandioca e 3% m/m de glicerol. A mistura foi depositada em balão de 500 mL, que foi tampado com uma rolha, a qual foi fixada à haste do agitador mecânico (modelo Fisaton 713D). O balão foi aquecido usando-se uma manta térmica a 80°C por um período de aproximadamente 20 minutos. O sistema foi mantido sob agitação constante (180 rpm), usando-se um agitador mecânico (FIG. 27).

FIGURA 27 - Montagem para a gelificação do amido de mandioca



Fonte: do autor.

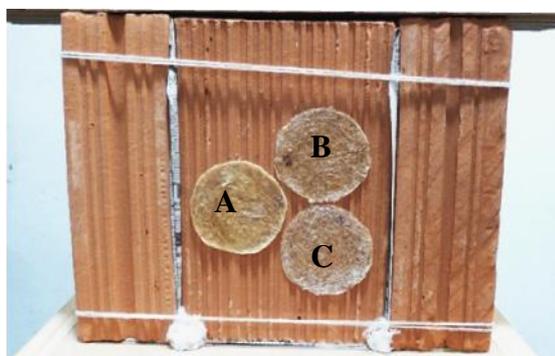
O processo de gelificação do amido ocorre quando a mistura aproxima-se de 80°C e sua coloração passa de branco para transparente. A próxima etapa foi a adição das fibras de curauá, que foram cortadas com uma tesoura em um

comprimento de aproximadamente 5 mm e foram misturadas manualmente ao polímero de amido de mandioca. As proporções de fibra de curauá utilizadas na mistura foram de (A 10% m/m), (B 20% m/m) e (C 30% m/m) em relação à quantidade de amido de mandioca e glicerol da composição (somatório dessas quantidades). Após serem misturados, o conteúdo foi depositado em formas circulares de polipropileno e alocados em estufa marca Imaco, à temperatura de aproximadamente 60 °C durante 48h para que ocorresse a evaporação da água das amostras.

3.3.1 Material experimental 1

As amostras circulares foram então aplicadas sobre bloco cerâmico utilizando-se cola branca para fixação, e após secagem (24 horas) foram feitos os ensaios termográficos. A montagem do experimento foi feita com a ajuda de dois blocos laterais e uma peça de madeira sobre eles para garantir que o calor do aquecedor permanecesse na parte posterior do experimento (FIG. 28). Maldague (2000) obteve em seu trabalho de pesquisa que diferentes técnicas de estimulação térmica podem ser empregadas para provocar um fluxo de calor no objeto em estudo, cada qual com características e limitações próprias. A câmera termográfica foi posicionada a 120 cm de distância das amostras, sendo a temperatura ambiente registrada de 26,2°C. As amostras permaneceram expostas ao calor artificial pelo período de 75 minutos e as imagens foram captadas aos 15, 30, 50 e 75 minutos de aquecimento.

FIGURA 28 - Montagem do modelo 1



(A) Amido/10% m/m fibra, (B) amido/20% m/m fibra, (C) amido/30% m/m fibra.
Fonte: do autor.

3.4 Amostra de compósito 2

O procedimento usado para a produção dos compósitos poliméricos PEBD/amido/fibra de curauá pode ser dividido em duas etapas: a) preparação do compósito amido/fibra de curauá, conforme o procedimento descrito para fabricação da amostra do compósito 1. O compósito foi cortado em pedaços de pequeno tamanho; b) o compósito amido/fibra de curauá foi misturado ao PEBD e PE-g-AM nas proporções de 50, 47 e 3% m/m, respectivamente, usando um misturador *Thermo-Haake*, modelo *Polylab* (FIG. 29), pelo período de cinco minutos à temperatura de 120°C. O compósito resultante foi, então, moldado por compressão em prensa térmica (SAGEC) (FIG. 30), também a 120°C, dando origem a placas retangulares de 20x20 cm e 1 mm de espessura.

FIGURA 29 - Fotografia do misturador Thermo-Haake



Fonte: do autor.

FIGURA 30 - Fotografia da prensa térmica



Fonte: do autor.

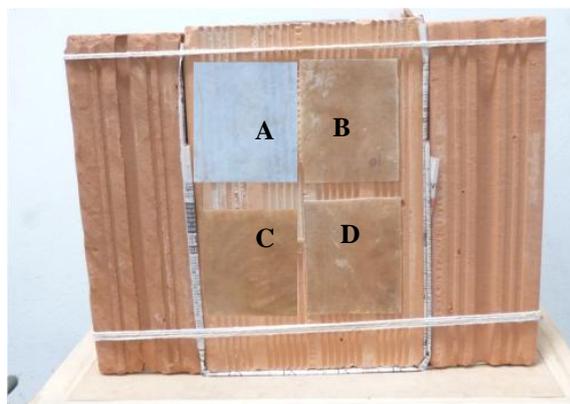
Para facilitar a interpretação dos resultados, as amostras foram classificadas em: **A** (PEBD + PE-g-AM), **B** (PEBD + PE-g-AM + amido com 10% m/m de fibra), **C** (PEBD + PE-g-AM + amido com 20% m/m de fibra) e **D** (PEBD + PE-g-AM amido com 30% m/m de fibra). Também foram preparadas amostras de PEBD e PE-g-AM sem fibra, de forma a se ter um referencial para estudo da influência das fibras.

3.4.1 Material experimental 2

As amostras foram recortadas em dimensão favorável ao ensaio (7 x 10 cm) e foram aplicadas sobre o bloco cerâmico utilizando-se cola branca. Após secagem de 24 horas os ensaios de termografia foram realizados. Os pontos A, B, C e D foram estabelecidos como área de estudo (placa de compósito), sendo a amostra A de controle (sem adição de fibra), B com 10% m/m, C com 20% m/m e D com 30% m/m de fibra de curauá. A montagem do experimento contou com a ajuda de dois blocos laterais para garantir que o calor do aquecedor permanecesse na parte posterior do modelo, conforme mostrado na FIG. 31. A câmera termográfica foi posicionada a 150 cm de distância das amostras e a temperatura ambiente registrada foi de 24°C. O teste consistiu no aquecimento na parte posterior do bloco, até que a face oposta atingisse temperaturas que permitissem a coleta das

imagens. As medidas foram registradas aos 20, 40, 50 e 65 minutos de aquecimento. Foi avaliada a temperatura da superfície da face oposta ao aquecimento do bloco de cerâmica e das amostras.

FIGURA 31 - Montagem do modelo 2



(A) PEBD, (B) Amido/PEBD/10% m/m Fibra,
(C) amido/PEBD/20% m/m fibra, (D)
Amido/PEBD/30% m/m fibra.

Fonte: do autor.

3.5 Amostra de compósito 3

O procedimento usado para a produção dos compósitos poliméricos PE-g-AM/amido/fibra de curauá, novamente, seguiu o mesmo procedimento descrito anteriormente na produção das amostras dos compósitos 1 e 2. Em seguida à elaboração do compósito amido/fibra de curauá, esse compósito foi misturado ao PE-g-AM nas mesmas condições de preparo do compósito 2 (PEBD/PE-g-AM/amido/fibra de curauá). A quantidade de fibras foi calculada de modo que o material final contivesse as quantidades de 10, 20 e 30% m/m de fibra de curauá na mistura conforme TAB. 2.

TABELA 2 - Percentual de reagentes na composição das amostras

Materiais / Amostras		Materiais								
		Amido	Glicerol	Fibra de curauá*	Fibra de curauá**	Amido +fibra	PEBD	PE-g-AM	Fibra de curauá***	
Preliminar	Amostra 1	-	-	100%	100%	Inserção de Polietileno	-	-	-	-
Experimento 1	Amostra 1	63,6%	27,27%	9,09%	10%		-	-	-	-
	Amostra 2	58,33%	25%	16,67%	20%		-	-	-	-
	Amostra 3	53,84%	23,08%	23,08%	30%		-	-	-	-
Experimento 2	Amostra 1	63,6%	27,27%	9,09%	10%		50%	47%	3%	5%
	Amostra 2	58,33%	25%	16,67%	20%		50%	47%	3%	10%
	Amostra 3	53,84%	23,08%	23,08%	30%		50%	47%	3%	15%
Experimento 3	Amostra 1	58,33%	25%	16,66%	20%		50%	-	50%	10%
	Amostra 2	50%	21,43%	28,57%	40%		50%	-	50%	20%
	Amostra 3	43,75%	18,75%	37,5	60%	50%	-	50%	30%	

Obs:* Percentual no compósito amido, glicerol e fibra.

**O percentual de fibra em cada amostra, é calculado em relação ao amido e glicerol.

*** Percentual de fibra com relação ao compósito PE/amido/fibra.

Percentual em destaque foi utilizado para identificar as amostras.

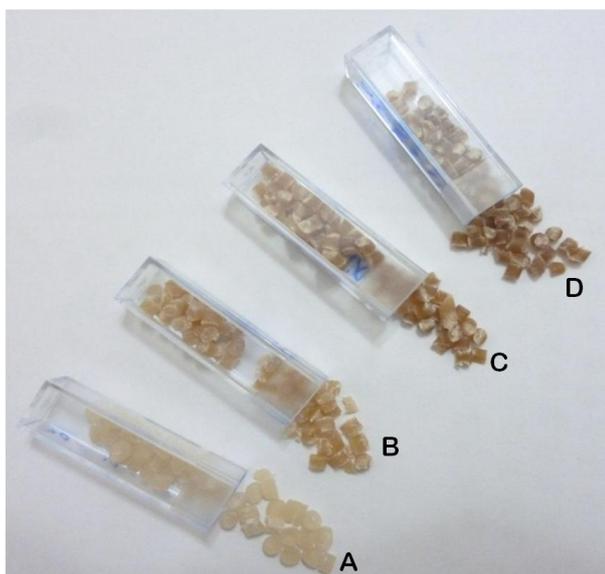
O material que resultou desta etapa do processo foi encaminhado para o moinho de facas modelo MAC250BX, fabricado pela KIE (FIG. 32), em que a trituração do material ocorreu pelo período de cinco minutos. O resultado do processo de trituração foi submetido ao processo de extrusão por meio da monorroscas da marca AX plástico modelo AX 100. Sequencialmente, o material foi peletizado usando-se um peletizador modelo VFNC1-2007P-W, distribuído pela AX Plásticos (FIG. 32). Somente após essas etapas intermediárias o compósito peletizado (FIG. 33) foi processado, da mesma maneira descrita anteriormente, dando origem a placas retangulares de 20x20 cm e 1 mm de espessura. Os materiais foram então caracterizados físico, química e termicamente pelos ensaios de MEV, espectroscopia de absorção na região do infravermelho, medida de ângulo de contato, ensaio de tração uniaxial e análises termogravimétricas (TG) e termografia infravermelha.

FIGURA 32 – Moinho de facas e peletizador



Fonte: do autor.

FIGURA 33 – Material peletizado



(A) PE-g-AM/Amido, (B) Amido/PE-g-AM/10% m/m Fibra, (C) Amido/PE-g-AM/20% m/m Fibra, (D) Amido/PE-g-AM/30% m/m Fibra.

Fonte: do autor.

3.5.1 Material experimental 3 (aplicado)

Com base nos testes realizados nos modelos experimentais 1 e 2 e buscando aproximar o modelo o máximo possível de uma situação real, nesta etapa da pesquisa optou-se por construir um “modelo experimental aplicado” (MARCONI; LAKATOS, 2001), que consistiu em recobrir a superfície do bloco de cerâmica com uma camada de argamassa de reboco, marca Quatzolite (com 2 cm de espessura), e expor a amostra a um ambiente externo e a uma fonte de calor

natural, o sol. Após a cura do reboco aplicado ao modelo (28 dias), as amostras do compósito polimérico foram fixadas ao modelo e permaneceram por 24 horas em temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) para secagem da cola adesiva. Para garantir a não interferência dos ventos, as laterais do modelo foram revestidas com EPS (isopor) e vedadas com fita adesiva *Silvertape* 3M (FIG. 34).

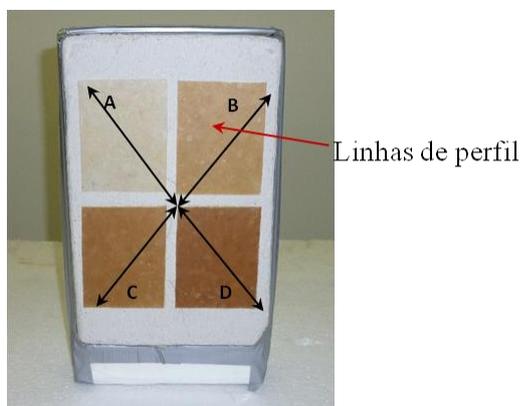
Grinzato, Vavilov e Kauppinem (1998) reforçam o conceito de como estímulos térmicos, como a irradiação solar, fluxo de ar ou radiação de fontes artificiais são importantes na detecção dos defeitos na edificação. O modelo foi então exposto à insolação direta, próximo de outras edificações, pelo período de duas horas e cinco minutos, durante os quais foram feitas as imagens termográficas. Estudos desenvolvidos por Weil (1991), Wiggemhauser (2002), Balaras e Argiriou (2002) e Grinzato, Vavilov e Kauppinem (1998) ressaltam a importância de se levar em consideração, no momento dos ensaios, aspectos e fenômenos físicos externos que podem interferir nas imagens, como a incidência solar.

A câmera foi posicionada a 150 cm de distância do modelo e a temperatura ambiente registrada no momento foi de 25 °C. O experimento consistiu no aquecimento natural e gradativo da parte frontal do modelo, até que a superfície do material atingisse temperaturas para a coleta das imagens. Weil (1991) considera nesse processo a ação solar uma excelente fonte de energia para inspeção diurna. As medidas foram registradas aos 30, 50, 70, 90 e 105 minutos de insolação direta e com 125 minutos foi registrado o resfriamento. A área definida para estudo seguiu os mesmos procedimentos anteriores, sendo A a amostra de controle, B, C, e D as amostras com percentual de fibra de curauá, sendo 10, 20 e 30% m/m, respectivamente. As análises foram realizadas com a ajuda do *software QuickReport* e do programa *Excel*, em que 80 pontos foram captados ao longo das linhas de perfil traçadas na diagonal das amostras, a partir dos quais foram traçados gráficos do controle da temperatura.

Os resultados finais foram apresentados por curvas de regressão polinomiais de 3º grau, em que foi mostrada a aproximação matemática dos dados obtidos por meio de equacionamento das variáveis, percentual de fibra/tempo e da variável

temperatura. Sintetizando os resultados, foi gerado gráfico de superfície de resposta no *software Matlab*.

FIGURA 34 - Montagem do modelo 3



(A) PE-g-AM/Amido, (B) Amido/PE-g-AM/10% m/m Fibra, (C) Amido/PE-g-AM/20% m/m Fibra, (D) Amido/PE-g-AM/30% m/m Fibra.

Fonte: do autor.

3.6 Ensaios de termografia

Para a realização de todos os ensaios termográficos desta pesquisa foram utilizados os mesmos parâmetros e a mesma câmera termográfica *Thermacam Flir* modelo P640, *high definition*, com detector de 640 x 480, 307.000 *pixels* de resolução, escala de temperatura de -40°C a 500°C e precisão de 2° ou 2% (ou seja, a cada 100°C pode haver uma diferença para mais ou para menos de 2°) da leitura de medição, operando na faixa espectral entre 7,5 e 13 μm , calibrada para captar a energia térmica correspondente à emissividade de 0,95, valor indicado pelo ITC (2013) próximo do recomendado por Incropera e DeWitt (2003), que é de 0,93. O equipamento foi disponibilizado pelo Centro de Estudos em *Design* e Tecnologia (CEDtec) da Universidade do Estado de Minas Gerais. Como fonte de calor utilizou-se um aquecedor elétrico portátil de giro, modelo *DCH2590ER Delonghi* (FIG. 35).

FIGURA 35 – Câmera termográfica infravermelha e aquecedor elétrico



Fonte: do autor.

3.7 Caracterização dos materiais

Os materiais foram caracterizados de acordo os métodos descritos a seguir.

3.7.1 Microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura

As amostras foram cortadas em tamanhos de 1 cm x 1cm e observadas em um equipamento da marca Leica, modelo dm2500m, com aumento de 10x e com dispositivo de registro de imagens acoplado. As imagens foram feitas antes e após o ensaio mecânico, com o objetivo de verificar as diferenças entre as amostras antes e após solicitação mecânica.

A análise de MEV foi feita no Centro Federal Tecnológico de Minas Gerais (CEFET-MG). O equipamento utilizado é da marca Shimadzu modelo Lyra 3. As amostras foram fraturadas e recobertas por uma fina cama de ouro antes dos ensaios usando-se um *sputter*.

3.7.2 Espectroscopia de absorção na região do infravermelho

A análise de espectroscopia de absorção na região do infravermelho (FTIR), entre 4.000 e 400 cm^{-1} , foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais do CEFET-MG. A análise foi feita em um equipamento da marca *Shimadzu*, modelo IR *Prestige 21*, equipado com transformada de *Fourier* e acessório ATR. O cristal

utilizado foi KRS-5 e o número de *scans* foi de 32 com resolução de 4 cm^{-1} . Para cada material foram coletados cinco espectros FTIR.

3.7.3 Ensaio de tração uniaxial

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaios Destrutivos do CEFET-MG, em uma máquina da marca Shimadzu, modelo AG-IS 100 KN. Os corpos de prova foram preparados segundo a norma da ASTM D3039. Eles possuíam as seguintes dimensões: 10 mm de largura, 20 mm (parte útil do corpo de prova) e 60 mm no comprimento total do mesmo. As amostras foram ensaiadas com velocidade de 0,5 mm/min. Após a confecção dos ensaios obtiveram-se as propriedades mecânicas desses materiais.

3.7.4 Medida de ângulo de contato

A molhabilidade da superfície dos compósitos e também do polímero puro foi pesquisada com base na medida do ângulo de contato formado entre a água deionizada (10 μL) e filmes preparados a partir dos compósitos empregando-se goniômetro DIGIDROP-DI (GBX Instruments) com videocâmara fotográfica acoplada. Foram feitas três medições consecutivas à temperatura ambiente, empregando-se o modo *Surface Energy* do *software*, que permite a medida direta do ângulo de contato (em graus). Os resultados representam as médias entre os ângulos direito e esquerdo, obtidos após deposição de gotas com volume padronizado (6 μm) sobre filmes com dimensões de 2 x 2 cm.

Quando a água é gotejada sobre uma superfície, as gotas podem se comportar entre dois extremos: espalhar-se sobre a superfície em contato ou minimizar o contato com a superfície. Isso dependerá das forças intermoleculares que se estabelecem entre as fases. A água é um líquido polar, portanto, se a superfície com que a água entrar em contato for polar, ocorrerão interações fortes entre as moléculas da água e os grupos também polares da superfície, molhando, assim, a superfície. Mas se a superfície em contato for apolar, não haverá interações fortes entre as moléculas da água e a superfície em contato. Como resultado, a água tenderá a atingir o estado de menos energia, ou seja, as moléculas da água irão

interagir com elas mesmas, diminuindo o contato com a superfície e formando uma gota.

3.7.5 Análise termogravimétrica

As análises termogravimétricas foram realizadas da temperatura ambiente até 800°C, com taxa de aquecimento de 15C^o/min em atmosfera inerte, usando-se o equipamento da marca *Shimadzu* DTG 60. Foram pesados aproximadamente 5,0 mg de amostras cortadas em diferentes regiões.

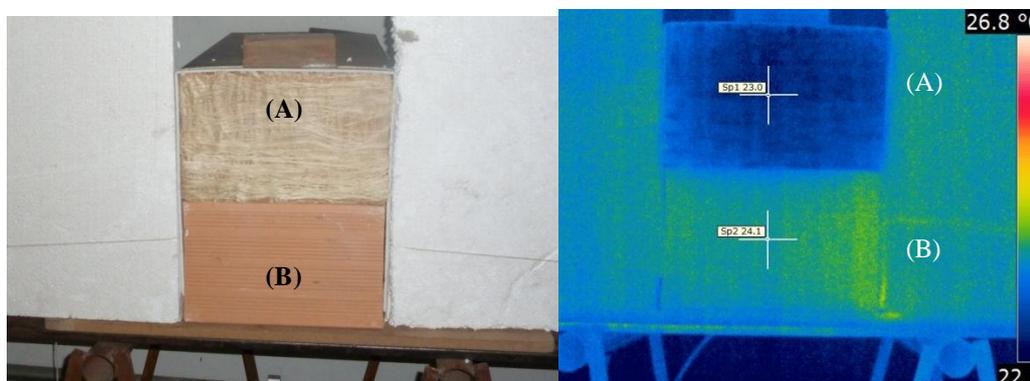
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados encontrados neste estudo.

4.1 Ensaios preliminares

A partir das imagens termográficas, os dados foram analisados qualitativamente utilizando-se o *software QuickReport*. A FIG. 36 apresenta a imagem real dos blocos com (A) e sem (B) fibra de curauá e sua respectiva imagem termográfica obtidas em temperatura ambiente antes do aquecimento artificial. A análise qualitativa dos blocos permite observar que existe uma diferença de temperatura entre as amostras. Na superfície do bloco com a fibra (bloco A) a temperatura registrada foi de 23°C e no bloco sem a fibra (B) a temperatura foi de 24,1° C.

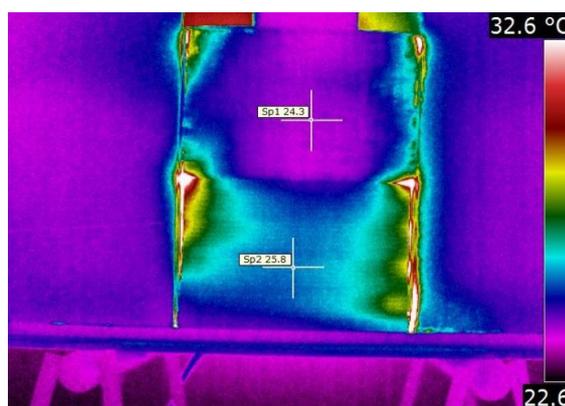
FIGURA 36 – Termograma inicial da amostra antes do aquecimento



Fonte: do autor.

Na FIG. 37 a imagem termográfica foi capturada após 24 minutos de aquecimento (bloco A) 24,3°C e (bloco B) 25,8°C. Observa-se que, ao elevar à temperatura na parte posterior do modelo, na parte frontal ela apresentou 1,5°C a mais que no bloco sem a fibra, indicando que existe diferença na transmissão de calor por condução nos dois tipos de amostras.

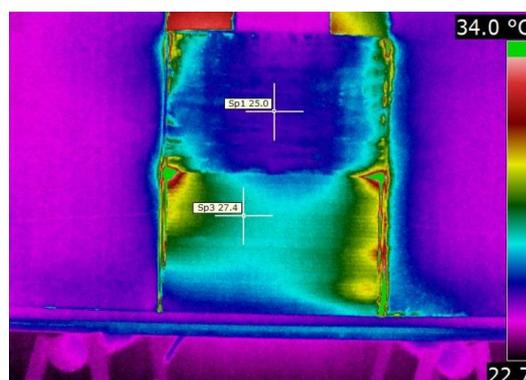
FIGURA 37 – Termograma da amostra com 24 minutos de aquecimento



Fonte: do autor.

A FIG. 38 mostra o termograma após 35 minutos de aquecimento. A escala de cores na lateral direita do termograma permite estimar a diferença de temperatura entre as amostras. Observa-se que, após ser submetida ao mesmo tipo de aquecimento, a temperatura na superfície do bloco sem a fibra permaneceu mais elevada que a da amostra com fibra de curauá (bloco A) 25°C e (bloco B) 27,4°C, diferença térmica entre as amostras de 2,4°C.

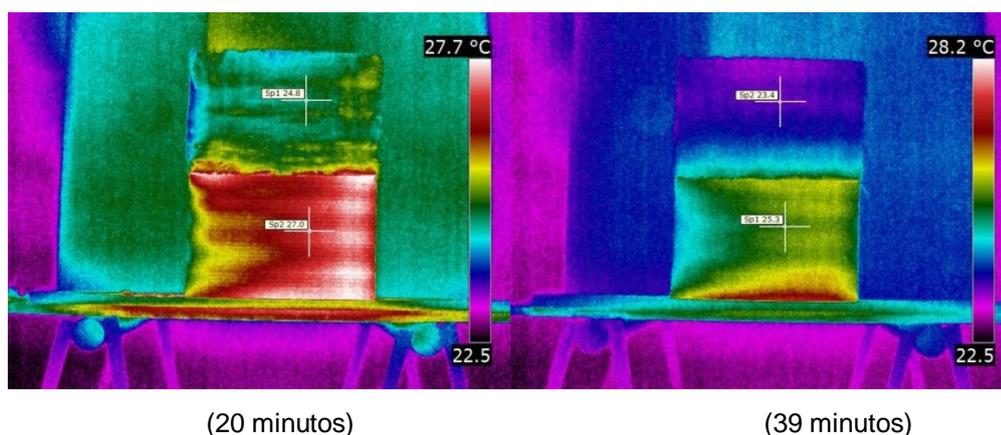
FIGURA 38 – Termograma da amostra com 35 minutos de aquecimento



Fonte: do autor.

As imagens da FIG. 39 reforçam esses resultados após 20 e 39 minutos de resfriamento. As amostras com a fibra de curauá apresentaram temperatura superficial mais baixa que a do bloco sem a fibra, o que poderia indicar que a fibra de curauá contribuiu para diminuir a passagem de calor através do bloco.

FIGURA 39 – Termogramas de resfriamento das amostras com 20 e 39 minutos



Fonte: do autor.

A TAB. 3 reúne os valores de medição após 35 minutos de aquecimento e 39 de resfriamento. Nota-se que houve interferência da fibra no sistema percebida pela diferença de temperatura gradual e constante tanto no aquecimento quanto no resfriamento das amostras. Tais valores se encontram ao final da tabela.

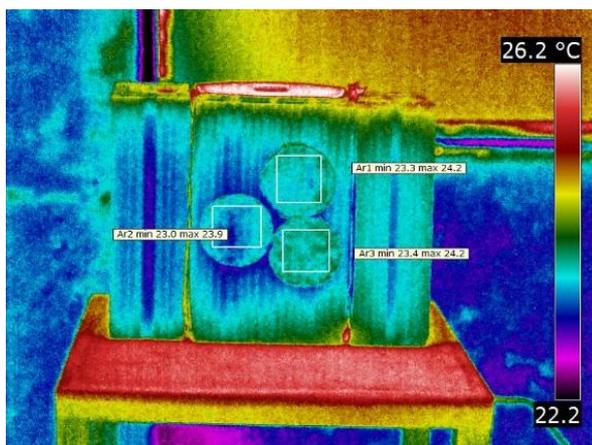
TABELA 3 – Valores relativos às medições feitas antes, durante e após o aquecimento das amostras

Amostras	Hora	Leitura Termográfica			Evolução temperatura	Resfriamento Frontal	
		14:59	15:23	15:34		15:54	16:19
		0 Min	24 Min	35 Min		20 Min	39 Min
Bloco A (Fibra)		23 °C	24,3 °C	25,0 °C	2,2 °C	24,8 °C	23,4 °C
Bloco B		24,1 °C	25,8 °C	27,4 °C	3,3 °C	27,0 °C	25,3 °C
Diferença		1,1 °C	1,5 °C	2,4 °C	1,3 °C	2,2 °C	1,9 °C

4.2 Material experimental 1

O termograma da FIG. 40 mostra o início dos testes. Percebe-se que a área de ensaios sofre diferentes interferências de fontes externas de calor do laboratório. Guerrero, Ocaña e Requena (2005) enfatizam que é importante conhecer o valor da emissividade dos materiais presentes, pois eles contribuem para o correto ajuste da câmera e para a boa interpretação da imagem térmica. A temperatura da bancada de teste e de um elemento ao fundo, apesar de serem mais altas, não estão afetando a área de teste, que apresenta temperatura uniforme nas três amostras do compósito, ficando em torno de 23°C para a mínima e 24°C para a máxima.

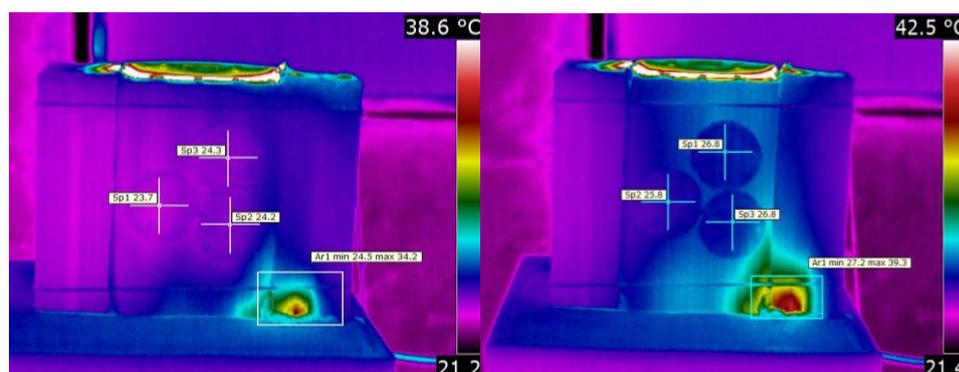
FIGURA 40 - Início do ensaio termográfico



Fonte: do autor.

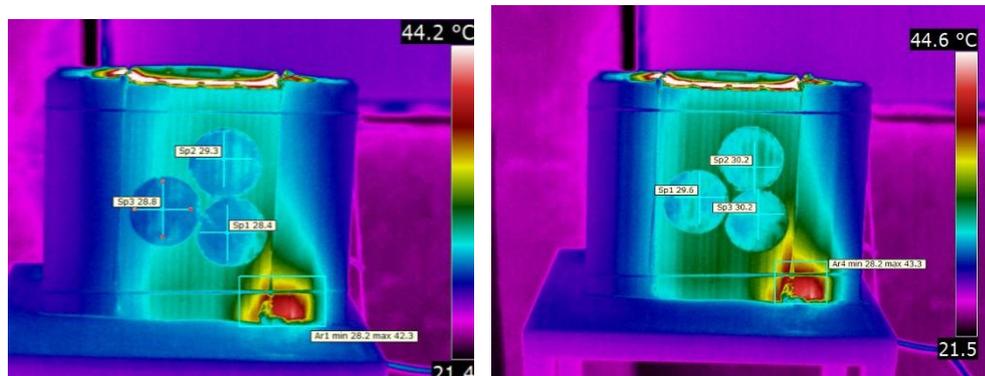
A sequência de termogramas da FIG. 41 mostra a progressão do aquecimento no material. Logo no início do ensaio percebe-se uma fuga de calor na parte inferior frontal direita do experimento (oriunda da parte posterior do bloco). Essa fonte de calor foi monitorada para verificar sua interferência no ensaio e nas amostras. Como era de se esperar, à medida que o calor na parte posterior do bloco de cerâmica aumentou, a temperatura da fonte invasiva também se elevou (máximo de 34,2°C no início 43,3°C ao final do experimento, 9,1°C de aumento na temperatura). As amostras de compósito aos 30 minutos de ensaio mostram visualmente aumento da temperatura (25,8; 26,8 e 26,8°C). Aos 50 e 75 minutos esse aumento também foi percebido (28,8; 29,3; 28,4 e 29,6; 30,2; 30,2°C). As amostras com percentual mais alto de fibra estão com temperatura um pouco mais elevada e reduzida diferença para menor é notada na amostra com 10% m/m de fibra em todas as medidas. A fonte de calor invasiva parece influenciar nos resultados, apesar de a temperatura inicial na superfície do bloco de cerâmica ter sido de 23,5°C e no final ser de 31,7°C. Esse aumento de temperatura pode não ter vindo apenas da parte posterior do modelo, mas também da fonte invasiva que se mostra radial no sentido dessa fonte.

FIGURA 41 - Termograma realizado aos 15, 30, 50 e 75 minutos de aquecimento



15 minutos de aquecimento

30 minutos de aquecimento



50 minutos de aquecimento

75 minutos de aquecimento

Fonte: do autor.

O QUADRO 5 apresenta os valores de leitura correspondentes às medições termográficas. Nota-se que o comportamento foi oposto aos encontrados nos ensaios preliminares. As amostras exibiram aumento de temperatura, porém as com percentual de fibra mais alto foram as que mais aqueceram. A fonte de calor invasiva aumentou na face do modelo (9,1 °C), sugerindo que as amostras com percentual de fibra mais elevado absorveram mais calor dessa fonte invasiva e não do calor aplicado na face oposta do modelo. O estudo de Grinzato, Vavilov e Kauppinem (1998) mostra a interferência de perdas de calor em construções civis, o que pode interferir no conforto térmico da edificação. Kirchhoff (*apud* DOEBELIN, 1990) e Incropera e DeWitt (2003) consideram um ponto a se considerar a condição da superfície da área a ser testada, porque, dependendo do material, fatores externos podem interferir na medição de temperatura.

QUADRO 5 – Relação dos horários de medição da área em estudo e das amostras

Hora	Tempo Aquec.	Fonte de calor Invasiva		Amostras		
		Máximo (°C)	Mínimo (°C)	A (°C)	B (°C)	C (°C)
11:15	00:15	34,2	24,5	23,7	24,3	24,2
11:30	00:30	39,3	27,2	25,8	26,8	26,8
11:50	00:50	42,3	28,2	28,8	29,3	28,4
12:15	00:75	43,3	28,2	29,6	30,2	30,2

4.3 Material experimental 2

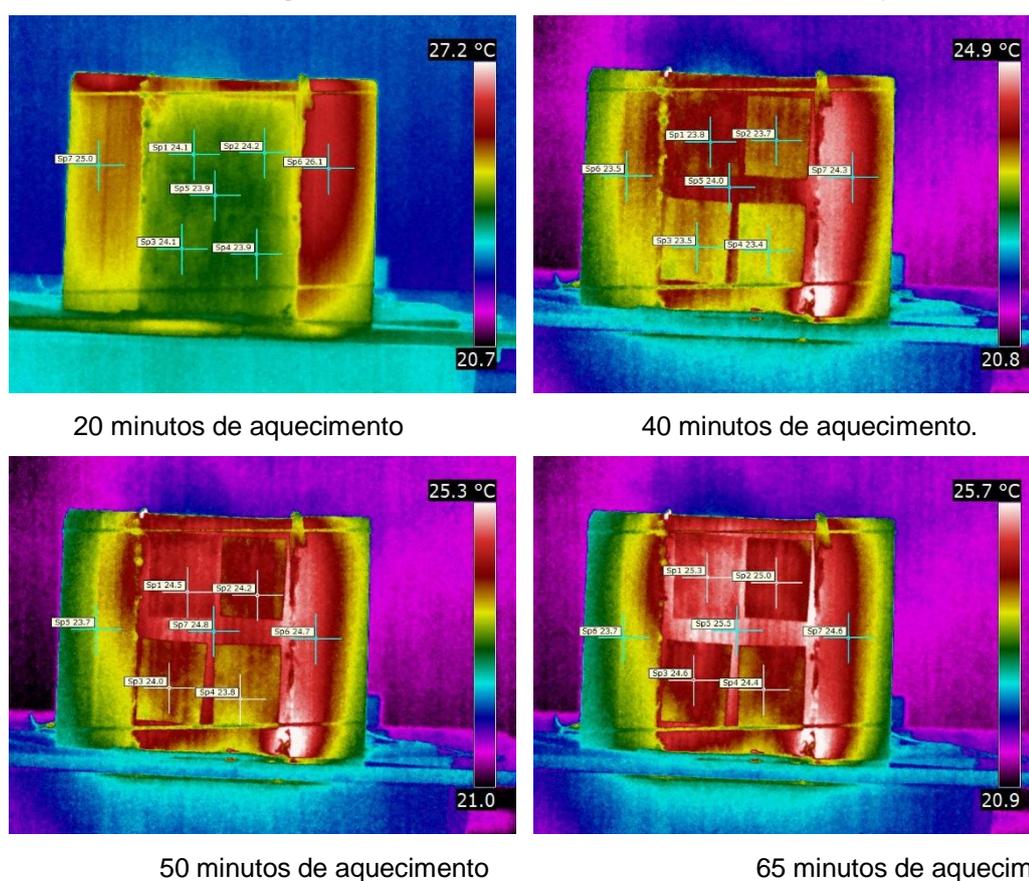
Percebe-se que aos 40 minutos de teste, apesar do aquecimento elétrico na face oposta dos materiais, foi registrada queda da temperatura ambiente (a temperatura máxima caiu de 27,2 para 24,9°C). Essa queda de temperatura não afetou a área de teste, pois o calor do aquecedor elétrico já pode ser percebido por condução na face frontal do experimento. Os blocos utilizados para vedação lateral apresentaram temperatura ligeiramente mais elevada no início dos testes. Essa temperatura também foi monitorada para verificar sua interferência nos ensaios. A FIG. 42 mostra os termogramas obtidos após 20, 40, 50 e 65 minutos.

A amostra de referência (PEBD) exibiu temperatura bem próxima da do bloco (24°C) e a quantidade de fibra presente (PEDB/PE-g-AM/fibras curauá na proporção de 10, 20 e 30% m/m) também foi perceptível. Quanto mais alto o percentual de fibra, maior a resistência térmica da amostra. Aos 50 minutos de teste a amostra de referência (PEBD) praticamente igualou a temperatura do bloco (24.5/24.8°C) e o percentual de fibra ficou ainda mais evidente. Quanto maior o número de fibras na amostra, maior a resistência térmica. Aos 65 minutos o termograma mostrou que o calor aplicado na parte posterior do modelo e transmitido através do material começou a saturar as amostras com baixo percentual de fibra. No entanto, ainda ficou perceptível a interferência da fibra com adição de 30% m/m.

A termografia foi capaz de perceber que a quantidade de fibras influenciou nos resultados e que o material com mais teor de fibras (30% m/m) se manteve mais estável que os outros, com 10 e 20% m/m de fibras. O PEBD ficou visivelmente mais aquecido que os compósitos PEDB/PE-g-AM/fibras curauá. Knupp *et al.*

(2012) apresentam trabalho no qual um dos parâmetros de estudo foi os efeitos da posição do aquecimento sobre o procedimento experimental em placa de nanocompósito fino, feito de resina de poliéster e de nanopartículas de alumina, mostrando que melhorias significativas podem ser conseguidas a partir da adequada localização do aquecimento ao longo da região de estudo e das propriedades a serem estimadas.

FIGURA 42 - Termograma realizado aos 20, 40, 50 e 65 minutos de aquecimento



Fonte: do autor.

O QUADRO 6 informa o horário das medições, o tempo de aquecimento dos materiais, as temperaturas dos blocos laterais esquerdas e direitas (máximas) e da área em estudo. Os resultados confirmam a análise visual. Os blocos laterais não afetaram o ensaio, o monitoramento realizado ao longo do teste confirma que a temperatura na face do bloco evoluiu, enquanto nos blocos laterais foi identificada a regressão das temperaturas. A temperatura no centro do modelo aumentou progressivamente. O calor que passou por condução pelo bloco

mostrou que a amostra com mais alto percentual de fibra teve resistência térmica melhor se comparado às outras amostras.

QUADRO 6 – Relação dos horários de medição da área em estudo e das amostras

Hora	Tempo Aquec.	Área em estudo Medidas máximas			Amostra Medida pontal			
		Lateral Esq. (°C)	Lateral Dir. (°C)	Área central do modelo (°C)	A (°C)	B (°C)	C (°C)	D (°C)
10:40	00:20	25,0	26,1	23,9	24,1	24,2	24,1	23,9
11:00	00:40	23,5	24,3	24,0	23,8	23,7	23,5	23,4
11:10	00:50	23,7	24,7	24,8	24,5	24,2	24,0	23,8
11:15	00:65	23,7	24,6	25,5	25,3	25,0	24,6	24,4

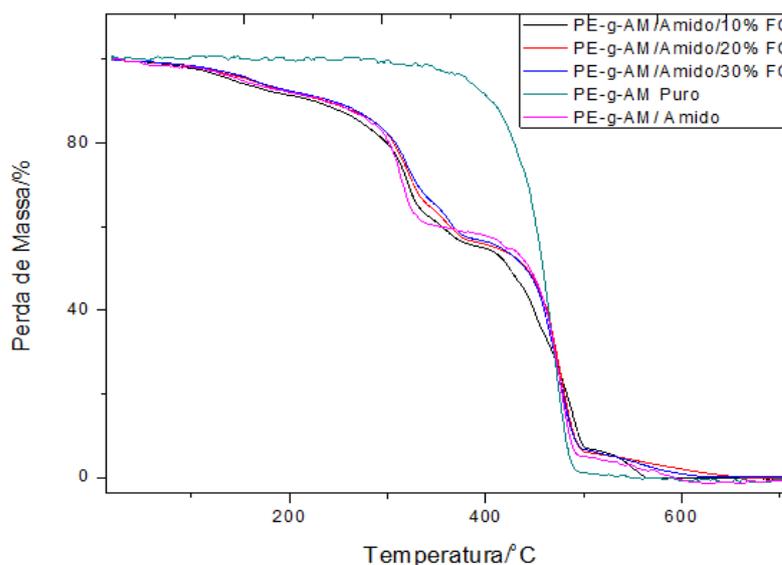
4.4 Material experimental 3 (aplicado)

O material experimental 3 foi caracterizado conforme a seguir.

4.4.1 Caracterização dos materiais: análise termogravimétrica

A FIG. 43 apresenta as curvas resultantes da análise termogravimétrica do PE-g-AM puro, PE-g-AM/Amido e dos compósitos de PE-g-AM/amido/fibra de curauá nas proporções de 10, 20 e 30% m/m de fibra. As temperaturas de T_{onset} , T_{endset} e perda de massa P(%) estão mostradas na TAB. 4. A curva do copolímero puro apresentou uma única etapa de degradação térmica diferindo das demais, em que se podem identificar pelo menos três etapas. A FIG. 43 permite a visualização ampliada do início da degradação térmica dos materiais. A temperatura de início da degradação (T_{onset}) para todos os materiais foi em torno de 127°C, a primeira perda foi, em média, de 5%, referente à etapa de desidratação (perda de água) do material. Como se pode verificar, a adição de fibras nos compósitos não elevou o grau de hidratação do material final, que é associada principalmente do amido.

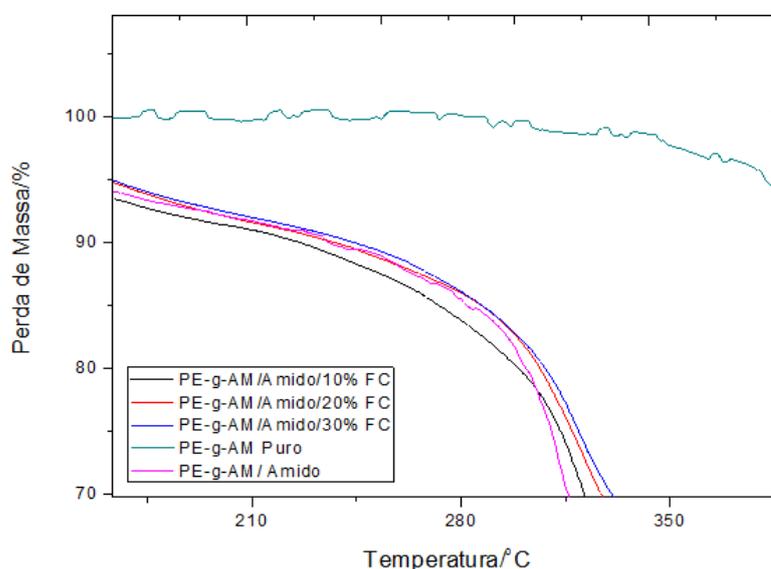
FIGURA 43 – Gráfico de TG dos materiais



Fonte: do autor.

A investigação acerca do segundo intervalo permitiu abstrair que o PE-g-AM puro se mantém estável com o aumento de temperatura, ao contrário do que ocorre com os compósitos. Esses materiais apresentam uma etapa de perda de massa, que é atribuída à degradação térmica da hemicelulose, presente na fibra de curauá. Essa etapa inicia-se, em média, em 281°C e termina (T_{endset}) em torno de 323°C, com perda de massa, em média, de 24% (FIG. 44). De maneira geral, foi possível verificar que o aumento do teor de fibras levou à redução da estabilidade térmica dos compósitos.

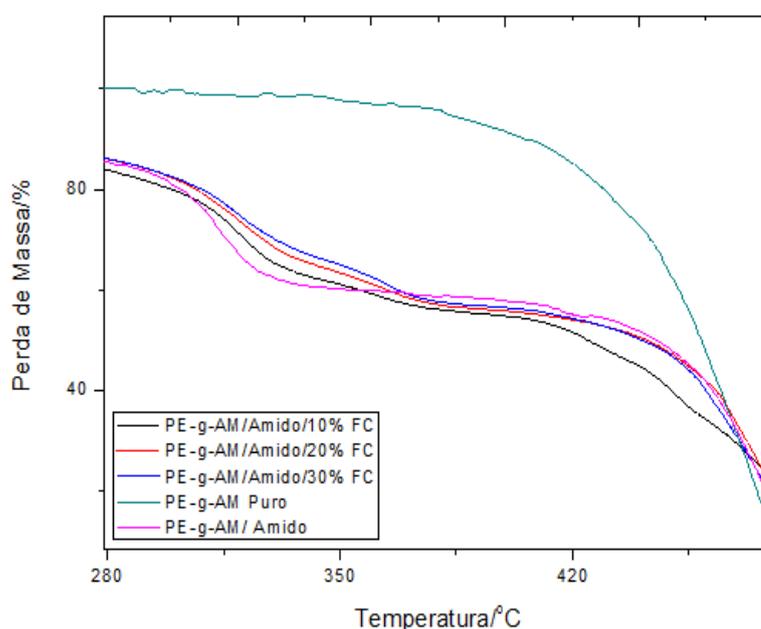
FIGURA 44 – Gráfico de TG com o segundo intervalo de perda



Fonte: do autor.

O terceiro intervalo representado de forma ampliada permite detectar que o PE-g-AM ainda se mantém estável ao programa de variação de temperatura ao qual as amostras foram submetidas. Entretanto, os compósitos apresentam perda de massa, que é referente à degradação das cadeias de celulose, um componente presente tanto na estrutura do amido quanto na da fibra. Essa perda inicia-se, em média, na temperatura de 361°C e termina em torno de 384°C, com perda de massa, em média, de 29% (FIG 45).

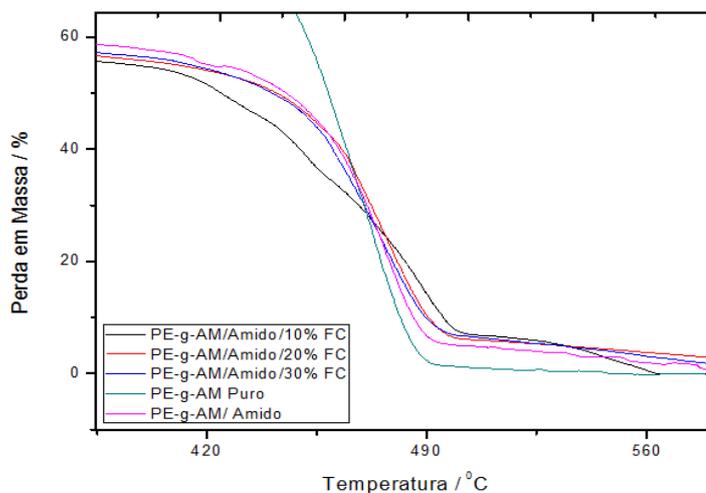
FIGURA 45 – Gráfico de TG com o terceiro intervalo de perda



Fonte: do autor.

O quarto intervalo de perda de massa representado de forma ampliada mostrou que o PE-g-AM iniciou sua degradação térmica com perda de massa de 96% em uma única etapa. Já os compósitos apresentaram, além dessa, perda da referente principalmente à estrutura da lignina que está presente tanto no amido quanto na fibra. Essa perda inicia-se, em média, em 448°C e termina em torno de 489°C, com perda de massa, em média, de 61% (FIG. 46).

FIGURA 46 – Gráfico de TG com o quarto intervalo de perda



Fonte: do autor.

Os resultados obtidos pelas análises térmicas realçaram que o material é termicamente estável até a temperatura de 281°C, sofrendo desidratação em torno de 127°C. Com isso, pode-se inferir que os materiais produzidos resistem a variações de temperaturas moderadas sem perder sua integridade estrutural. Isso garante a utilização dos mesmos como revestimento para conforto térmico, uma vez que as variações máximas de temperatura a que os materiais serão submetidos durante a vida útil não atingiriam aquele inicial para degradação, garantindo elevada margem de segurança. Os resultados obtidos podem ser visualizados na TAB. 4.

TABELA 4 – Dados obtidos na análise termogravimétrica

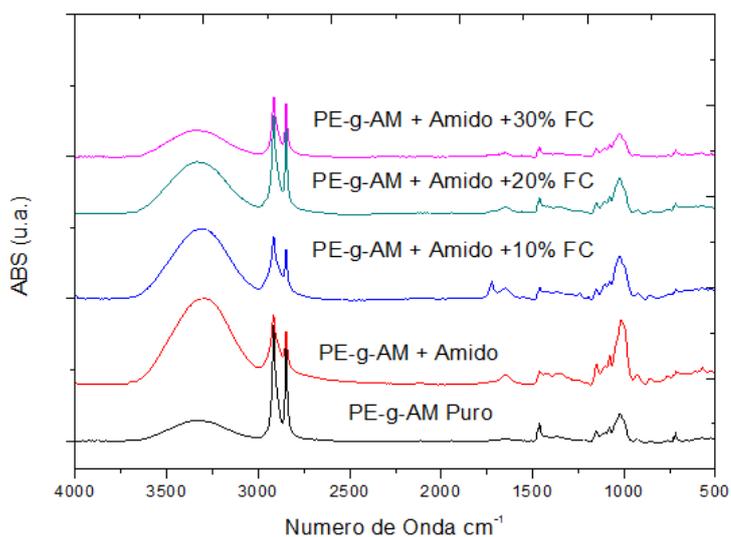
Material	Intervalo 1		Intervalo 2		Intervalo 3		Intervalo 4	
	$T_{on\ set} - T_{end\ set} (°C)$	P (%)	I - T (°C)	P (%)	I - T (°C)	P (%)	I - T (°C)	P (%)
PE-g-AM	-	-	-	-	-	-	438,9–484,4	-96,4
PE-g-AM/ Amido	127,1–56,3	-5,3	301,0–321,5	-30,5	450,5–486,1	-55,02	575,5–577,0	-4,6
Mat. 10% m/m fibra	109,3–136,4	-4,8	299,7–322,1	-22,7	325,1–340,2	-31,9	442,9–497,1	-48,8
Mat. 20% m/m fibra	139,4–179,1	-5,3	229,3–318,5	-19,3	328,9–352,3	-12,7	456,5–490,7	-50,2
Mat. 30% m/m fibra	141,8–166,5	-4,9	292,1–328,2	-23,2	339,5–356,3	-15,1	449,5–487,6	-50,9

$T_{on\ set}$ – Temperatura de início da degradação $T_{end\ set}$ – Temperatura de término da degradação;
P (%) – Perda.

4.4.2 Espectroscopia de absorção na região do infravermelho

As espectroscopias de absorção na região do infravermelho, realizadas nas amostras com a finalidade e investigar a interação entre as fases de PE-g-AM, PE-g-AM/amido e compósitos PE/amido/fibra curauá, encontram-se na FIG. 47. A absorção próxima de 3.300 cm^{-1} é relativa ao estiramento de vibração do grupo O-H no espectro do copolímero puro. O surgimento dessa banda é referente aos indícios de degradação térmica gerada durante o processamento.

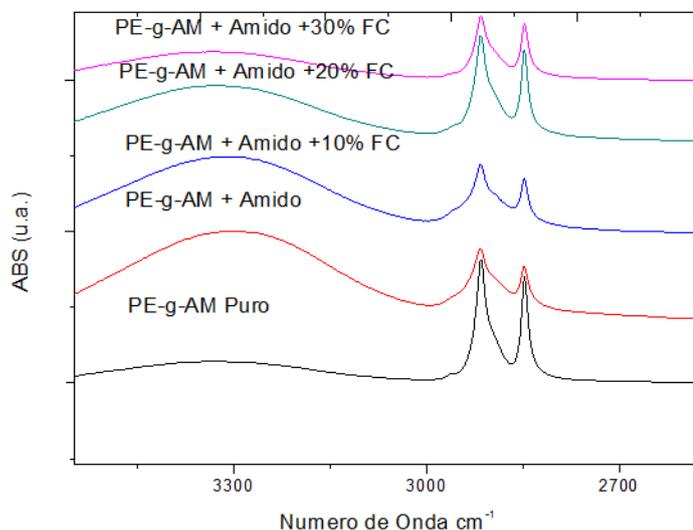
FIGURA 47 – Espectros de FTIR dos compósitos de PE-g-Am/amido e PE-g-AM/amido/fibras com as composições de 10, 20 e 30% m/m



Fonte: do autor.

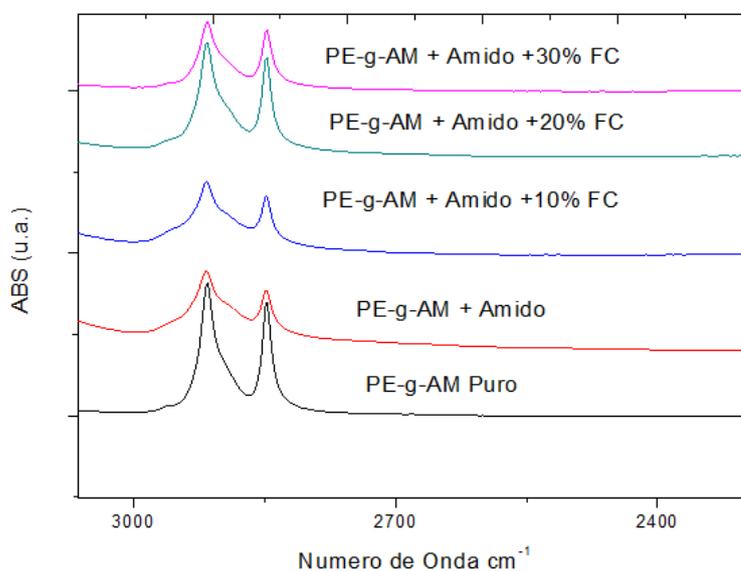
O aumento na intensidade das bandas formadas em torno de 3.325 cm^{-1} após a adição de amido e fibra é referente à ligação de O-H, presente na estrutura química de ambos (FIG. 48). A região ampliada, em torno de 2.915 e 2.848 cm^{-1} , permite perceber as bandas referentes aos estiramentos de vibração simétricos e assimétricos das ligações do grupo CH, do agrupamento CH_3 (FIG. 49).

FIGURA 48 – Espectros de FTIR entre 3.800 e 2.600 cm^{-1} dos compósitos de PE-g-Am/amido e PE-g-AM/amido/fibras com as composições de 10, 20 e 30% m/m



Fonte: do autor.

FIGURA 49 – Espectros de FTIR entre 2915 e 2848 cm^{-1} dos compósitos de PE-g-Am/amido e PE-g-AM/amido/fibras com as composições de 10, 20 e 30% m/m

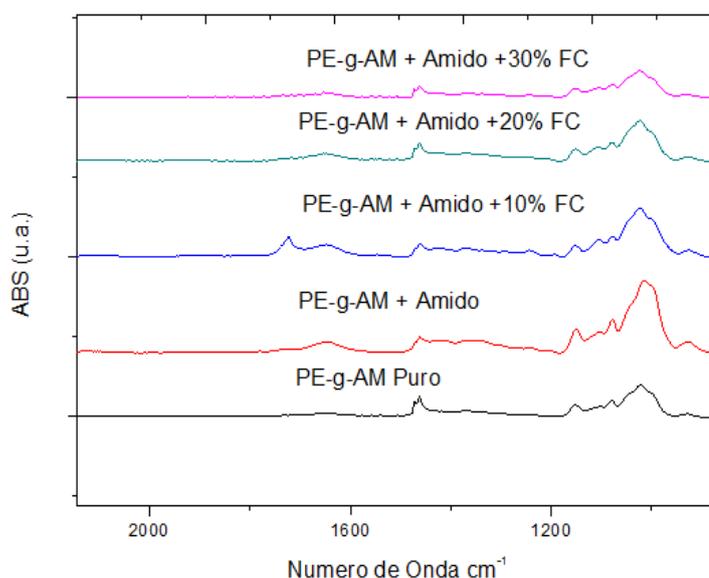


Fonte: do autor.

As bandas que surgem em torno de 1.462 e 1.373 cm^{-1} são referentes às deformações angulares do grupo CH, das ligações do agrupamento CH_3 . O aumento de intensidade das bandas em torno de 1.051 cm^{-1} é referente ao C-O-C

presente nos três materiais que constituem os compósitos PE-g-AM, amido e fibra (FIG. 50).

FIGURA 50 – Espectros de FTIR entre 1462 e 1373cm⁻¹ dos compósitos de PE-g-AM/amido e PE-g-AM/amido/fibras com as composições de 10, 20 e 30% m/m



Fonte: do autor.

Devido à semelhança da estrutura química do amido e da fibra lignocelulósica, os grupamentos químicos absorvem-se no infravermelho em regiões semelhantes, dificultando a investigação em termos de interações químicas específicas entre os componentes do material. No QUADRO 7 são apresentadas as principais bandas observadas nos espectros FTIR das amostras.

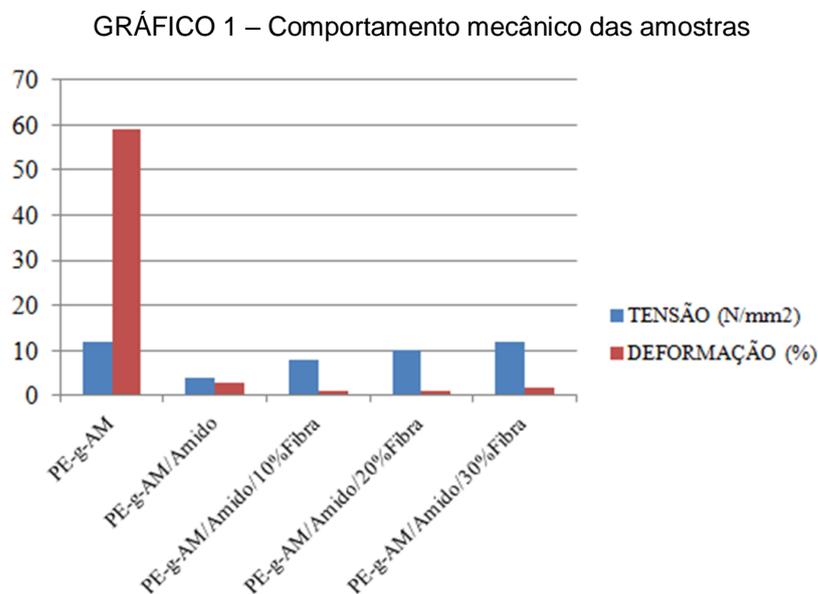
QUADRO 7 – Principais bandas observadas no espectro FTIR

Tipos de absorção	PE-g-AM	PE-g-AM/amido/fibra
	Nº de onda / cm ⁻¹	Nº de onda / cm ⁻¹
Estiramento do grupo O-H	3300	3280
Estiramento de vibração CH ₃	2915	2910
Deformações angulares CH ₃	1462	1464

4.4.3 Ensaio de tração uniaxial

O perfil da curva de tensão em função da deformação para o polímero puro é característico de material dúctil, exibindo deformação plástica. Já os compósitos

são característicos de materiais frágeis, apresentando rompimento logo após o término da deformação elástica. O GRÁF. 1 mostra os resultados de resistência à tração e de deformação até a ruptura para o PE-g-AM e compósitos PE-g-AM/amido/fibra obtidos a partir do ensaio de tração uniaxial.

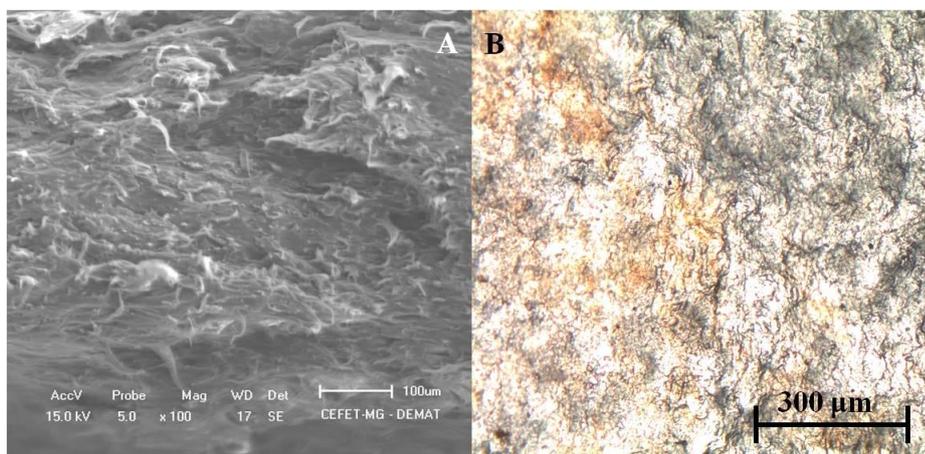


A adição de amido ao PE-g-AM reduz drasticamente a tração e deformação até a ruptura. Esse comportamento é típico de misturas com pobre adesão interfacial. Entretanto, o aumento do teor de fibras na mistura PE-g-AM eleva a resistência do material final, comprometendo a deformação até a ruptura. As fibras desempenharam o papel de carga de reforço nos materiais produzidos.

4.4.4 Microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV)

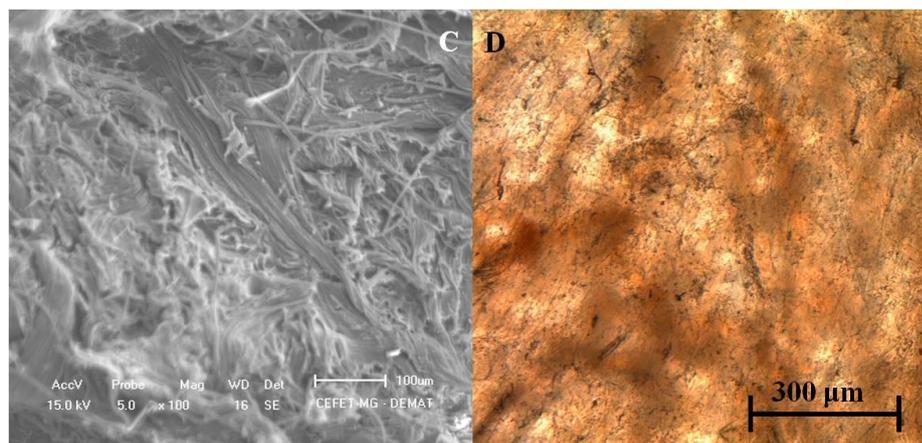
As FIG. 51, 52, 53 e 54 contêm as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (fratura) e microscopia ótica da blenda PE-g-AM e compósitos PE-g-AM/fibras curauá.

FIGURA 51 – MEV (A) e MO (B) do material PE-g-AM/amido



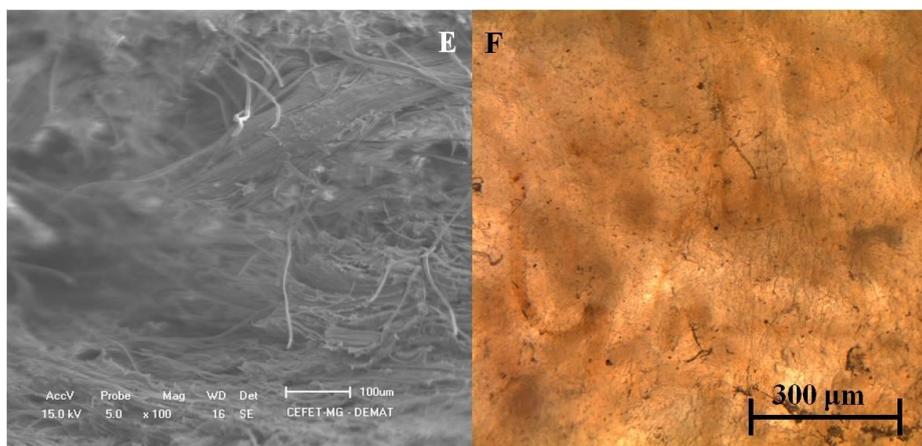
Fonte: do autor.

FIGURA 52 – MEV (C) e MO (D) do material PE-g-AM/amido/10% m/m fibra



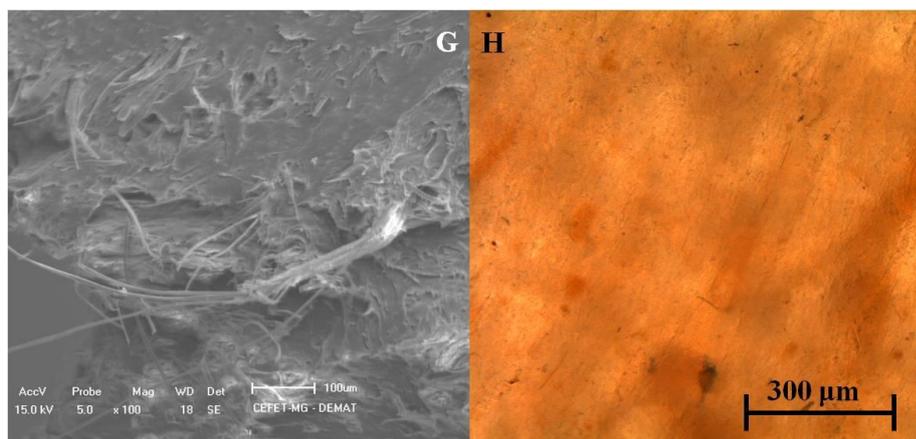
Fonte: do autor.

FIGURA 53 – MEV (E) e MO (F) do material PE-g-AM/amido/20% m/m fibra



Fonte: do autor.

FIGURA 54 – MEV (G) e MO (H) do material PE-g-AM/amido/30% m/m fibra



Fonte: do autor.

Ao comparar as imagens de MEV da blenda com as dos compósitos foi possível verificar a presença das fibras de curauá misturadas na matriz polimérica em toda a extensão da imagem. As fibras não se encontram incorporadas à matriz em uma direção preferencial, o que fica evidenciado principalmente na FIG. 54. Esse resultado justifica a pequena deformação até a ruptura obtida a partir dos ensaios de tração uniaxial.

4.4.5 Medida de ângulo de contato

Pode-se avaliar o comportamento do espalhamento da gota de água sobre uma superfície com base na medida do ângulo de contato. Segundo esse critério, tem-se:

Para $\theta = 0^\circ$, a superfície é totalmente hidrofílica;

- para $0^\circ < \theta < 90^\circ$, a superfície é predominantemente hidrofílica;
- para $90^\circ < \theta < 180^\circ$, a superfície é predominantemente hidrofóbica;
- para $\theta = 180^\circ$, a superfície é totalmente hidrofóbica.

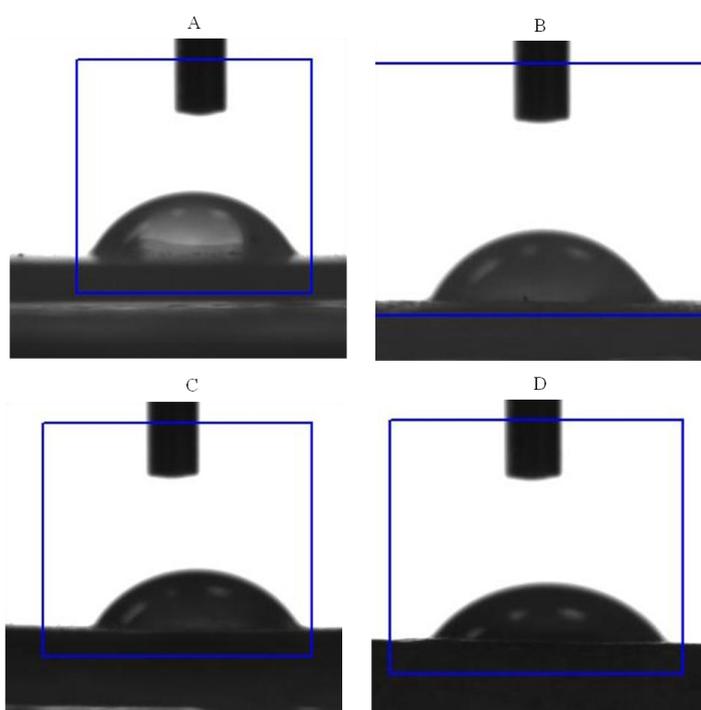
Os valores dos ângulos de contato obtidos estão apresentados no QUADRO 8.

QUADRO 8 – Resultados obtidos na medição do ângulo de contato

Material	Ângulo
PE-g-AM	62,2°
PE-g-AM /Amido	54°
PE-g-AM / Amido / 20% m/m Fibra	59°
PE-g-AM / Amido / 30% m/m Fibra Curauá	50,6°

O comportamento do espalhamento durante os experimentos de medida do ângulo de contato entre a água e as amostras de PE-g-AM (A), PE-g-AM/amido (B), PE-g-AM/amido/20% m/m de fibra (C) e PE-g-AM/amido/30% m/m de fibra está ilustrado na FIG. 55.

FIGURA 55 – Comportamento do espalhamento sobre as amostras



Fonte: do autor.

Conforme pode ser observado na FIG. 55, ao serem comparadas as imagens foi perceptível que o caráter hidrofílico do amido teve influência sobre o material, diminuindo o ângulo de contato. Em um primeiro momento, a fibra de curauá aumentou o caráter hidrofóbico do composto, PE-g-AM/amido/20% m/m quando comparado ao composto PE-g-AM/amido. Já com a adição de mais fibras o composto PE-g-AM/amido/30% m/m tornou-se mais hidrofílico. Esse resultado pode ser atribuído aos grupos hidroxila e outros grupos polares localizados nos heteropolissacarídeos ramificados presentes nas fibras de curauá, fazendo com

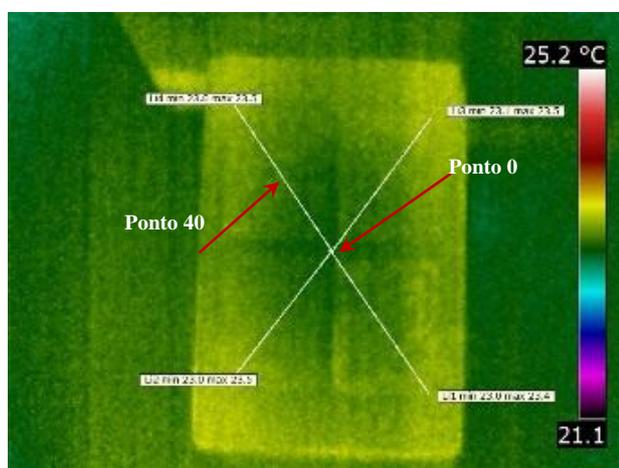
que a superfície das fibras, e conseqüentemente dos compósitos, tenha caráter hidrofílico. Entretanto, o amido pode formar ligações de hidrogênio fortes com as hidroxilas presentes nas fibras de curauá, tornando esses grupos menos livres, o que reduziria a hidrofiliçidade dos compósitos, justificando o resultado obtido para o PE-g-AM/amido /20% m/m (HUANG; NETRAVALI, 2009).

De acordo com o esperado, a adição de amido e fibra contribuiu para o aumento da hidrofiliçidade do compósito. Essa variação poderia influenciar a vida útil e o desempenho do produto, tornando-se um parâmetro de elevada importância. Isso porque se apurou que o comportamento do material compósito mesmo com a presença de amido e fibras de curauá apresentou variação na superfície das amostras PE-g-AM, PE-g-AM/amido, PE-g-AM/amido/fibra curauá, porém não representa uma inutilidade para o material.

4.5 Análise termográfica material experimental 3

O termograma apresentado na FIG. 56 mostra o material experimental (aplicado) antes do aquecimento. Percebe-se, pela análise visual qualitativa, que o compósito copolímero PE-g-AM/amido/fibra de curauá em percentuais de 10, 20 e 30% m/m possuem temperatura inicial bastante uniforme se comparado ao restante do experimento.

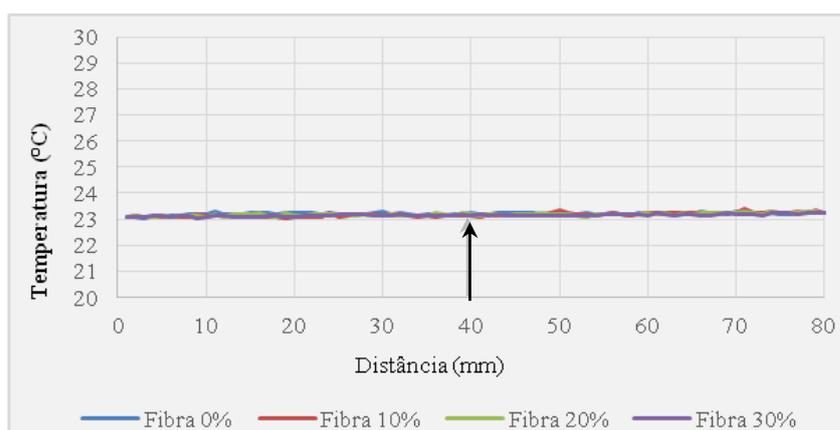
FIGURA 56 - Termograma inicial antes do aquecimento



Fonte: do autor.

Essa análise qualitativa é confirmada pelo GRÁF. 2, que mostra os valores medidos ao longo de quatro linhas de perfil traçadas na diagonal da amostra. A temperatura inicial é constante nas quatro amostras, próxima dos 23°C em todas elas e também na superfície do experimento. Tomaram-se como referência, para as análises em todos os gráficos, os pontos (zero) tidos com temperatura no centro do modelo e 40 (marcados com uma seta) como centro da amostra. O modelo foi então colocado em um ambiente natural e submetido à insolação direta pelo período de duas horas e cinco minutos. A insolação direta é considerada por Castanedo *et al.* (2007) como um tipo de energia externa que incide sobre uma superfície, provocando um estímulo natural que se propaga através do material. Neste estudo a insolação natural foi considerada uma estimulação passiva.

GRÁFICO 2 – Linha de perfil inicial antes do aquecimento

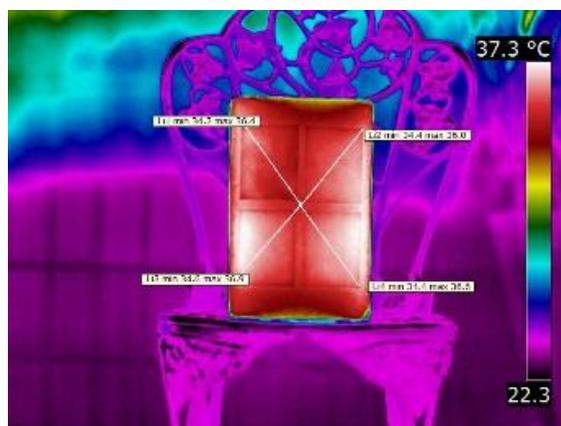


Segundo Avdelidis e Moropoulou (2003), a emissividade é um fator importante nesse tipo de estimulação, porque a partir dela podem-se obter leituras mais corretas da temperatura e, como consequência, melhor imagem termográfica. Durante o período de teste foi realizada variação desses parâmetros de entrada [emissividade (ϵ) e de temperatura refletida - TR] para avaliar sua interferência. Tomaram-se como referência as leituras feitas nos modelos com $\epsilon = 0,95$ e TR = 50°C. Variou-se o valor da TR (de 50°C para 20°C), a temperatura aumentou 1,5°C. Variando-se a TR (de 50°C para 100°C), a temperatura caiu -3,4°C. A alteração da (ϵ) ocasionou variação de temperatura mais significativa, Variou-se a ϵ (de 0,95 para 0,16) e a temperatura caiu -16,7°C. Variando-se ϵ e TR (0,16 e 20°C), a temperatura passou de 40,7 para 118,2°C, diferença de 77,5°C. Isso

torna o conhecimento dessa variável muito importante, especialmente em testes de materiais com característica de baixa emissão de radiação ou alta reflexão.

Nesse sentido, os parâmetros considerados para todas as análises deste experimento foram: emissividade 0.95, temperatura refletida 50.0°C, temperatura atmosférica 20.0°C, umidade relativa do ar 50% e distância entre o equipamento 150 cm. As primeiras imagens termográficas foram registradas com 30 minutos de exposição solar direta. O termograma da FIG. 57 mostra as temperaturas superficiais após 30 minutos de insolação. A análise visual, neste momento, não permite que se faça avaliação do comportamento do compósito, uma vez que existem variações nas regiões laterais com temperaturas aparentemente mais altas. No entanto, a análise quantitativa das linhas de perfil traçadas na diagonal da amostra permite registrar a temperatura do bloco no centro do modelo e ao longo de cada linha de perfil.

FIGURA 57 - Termograma do material 3 após 30 minutos de insolação



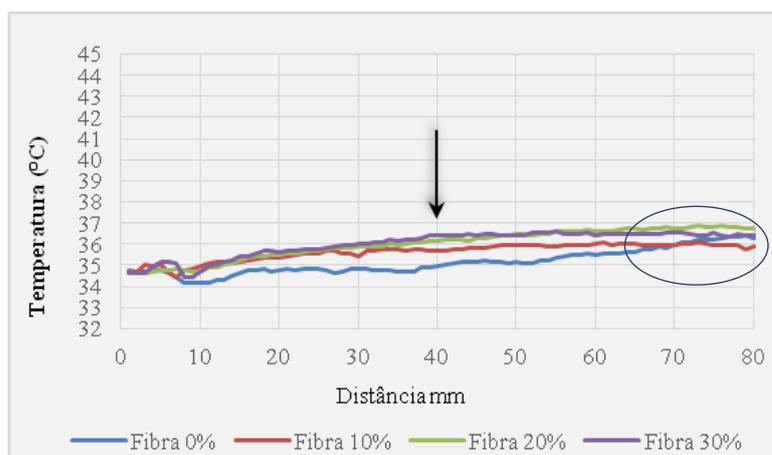
Fonte: do autor.

A partir destes dados foi possível elaborar o GRÁF. 3. Após 30 minutos de insolação a temperatura no centro do experimento subiu 11,6°C em relação à temperatura inicial (de 23,1 para 34,7°C). Para Maldague (2000), na termografia passiva um material com diferencial de temperatura do ponto quente em relação ao entorno, na ordem de 1°C a 2°C (fora da faixa da incerteza da medida do equipamento), pode indicar algum tipo de interferência. Entretanto, quando essa

diferença está acima de 4°C, é uma forte evidência de comportamento diferenciado das áreas.

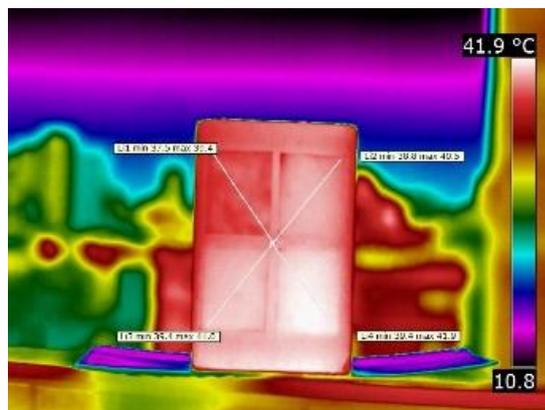
Tomando-se como referência o ponto 40 no eixo das abscissas, percebe-se que a amostra de referência (PE-g-AM) apresenta a temperatura mais baixa, seguida da amostra com 10% m/m de fibra. As amostras com percentual de 20 e 30% m/m são as que apresentaram temperatura mais alta, porém não é claro o comportamento se se avaliarem os pontos ao longo das linhas de perfil, pois as temperaturas variam ao longo das distâncias, principalmente no ponto 70 e 80, onde elas tendem para uma mesma temperatura. Isso confirma a análise visual anterior feita no termograma.

GRÁFICO 3 - Linhas de perfil após 30 minutos de insolação



O termograma da FIG. 58 exemplifica o comportamento dos materiais presentes nas amostras de compósito após 50 minutos de insolação. É perceptível a interferência nas amostras com adição de 10, 20 e 30% m/m de fibra de curauá, cuja temperatura se mostra visivelmente diferenciada em relação à amostra de referência.

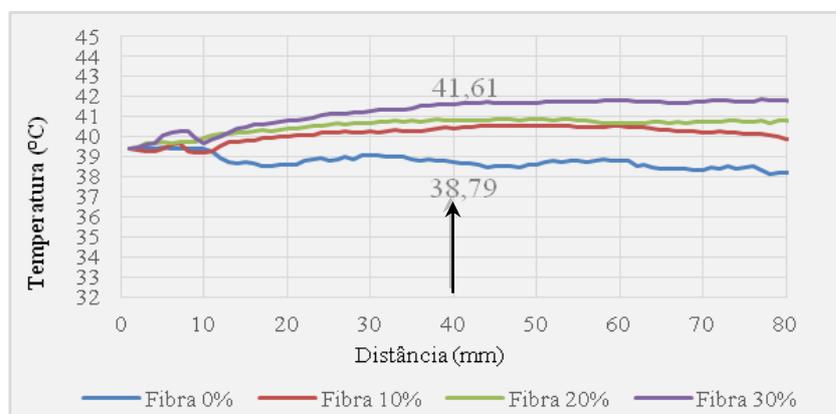
FIGURA 58 - Termograma do material 3 após 50 minutos de insolação



Fonte: do autor.

O GRÁF. 4 informa que a temperatura do centro do experimento subiu 4,7°C (de 34,7 para 39,4 °C). Percebe-se claramente a influência das fibras no composto. A análise dos valores de temperatura das amostras ao longo das linhas de perfil permite perceber um comportamento regular. A amostra de referência (PE-g-AM/amido) permanece com a menor temperatura (38,9 °C) e as amostras com percentual de 10 e 20% m/m ficaram mais próximas, com temperatura intermediária, porém distintas: quanto mais alto o percentual de fibra, mais elevada a temperatura, ficando a amostra de percentual mais alto (30% m/m) com temperatura de 41,6°C, diferença de 2,7°C em relação à amostra de referência.

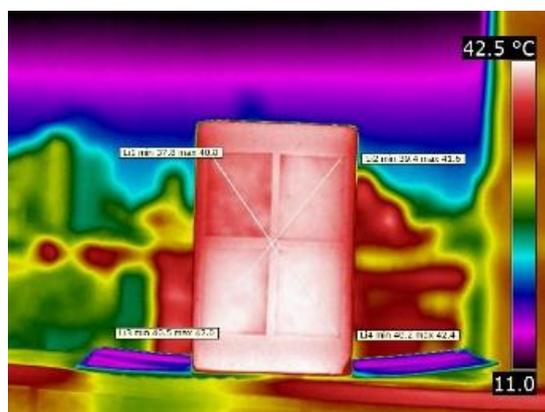
GRÁFICO 4 - Linhas de perfil após 50 minutos de insolação



O termograma da FIG. 59 mostra o experimento após 70 minutos de insolação. A análise visual permite diferenciar a temperatura entre a amostra de referência

(PE-g-AM/amido) e as com percentual de fibra, mas entre as amostras com 20 e 30% m/m a diferença se mostra discreta.

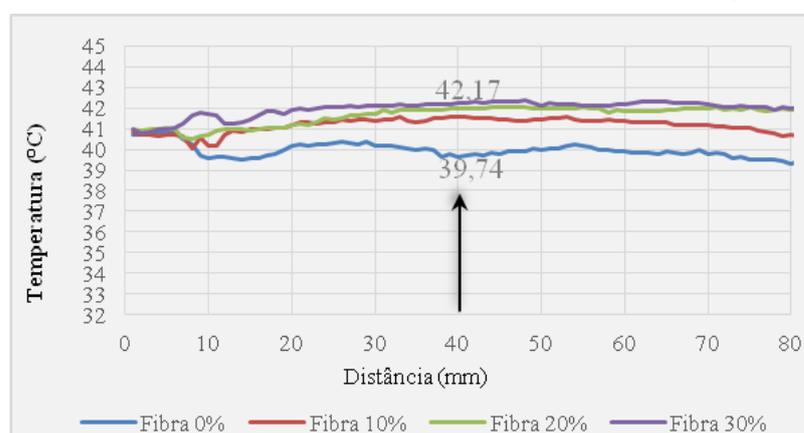
FIGURA 59 - Termograma do material 3 após 70 minutos de insolação



Fonte: do autor.

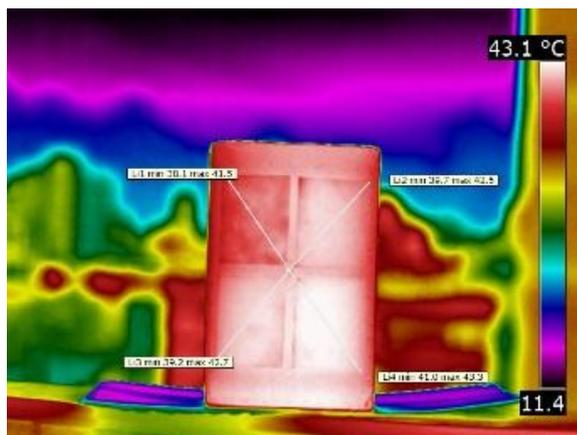
A análise quantitativa feita pelo GRÁF. 5 mostra que a amostra de referência apresenta a temperatura mais baixa (39,7°C) e a com percentual mais alto de fibra possui temperatura mais elevada (42,1°C). Nota-se neste momento que as amostras com fibra ficaram com temperatura visivelmente acima da amostra de referência e bastante próximas entre si. A temperatura do centro do experimento subiu 1,3°C (de 39,4 para 40,7 °C). A análise ao longo da linha de perfil mostra comportamento diferenciado entre as amostras com e sem fibra. Chama a atenção o fato de as temperaturas dos compósitos contendo fibra ficarem mais próximas entre si à medida que a temperatura aumenta.

GRÁFICO 5 - Linhas de perfil após 70 minutos de insolação



O termograma da FIG. 60 mostra o experimento após 90 minutos de exposição solar. A análise visual permite identificar as variações de temperatura entre as amostras com a fibra e registra-se diferença maior na amostra de referência (PE-g-AM/amido).

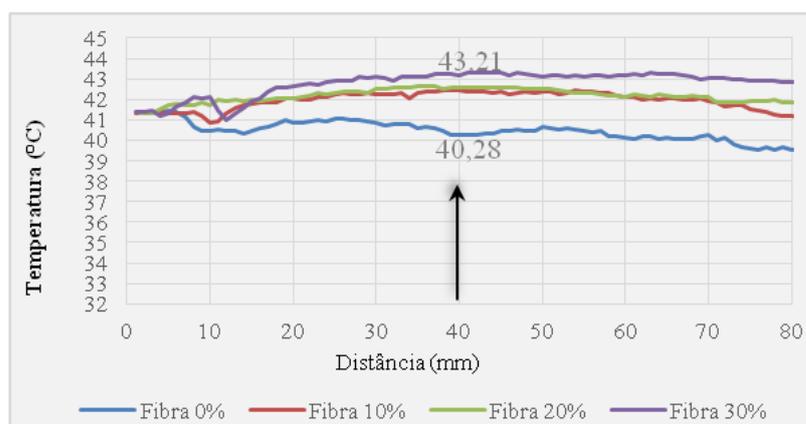
FIGURA 60 – Termogramado material 3 após 90 minutos de insolação



Fonte: do autor.

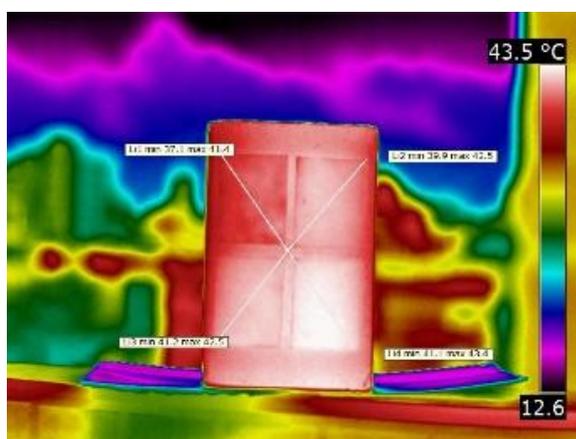
No GRÁF. 6 constata-se que após 90 minutos de insolação a temperatura do centro do experimento subiu apenas 0,7°C (de 40,7 para 41,4°C). A amostra de referência apresentou a menor temperatura (40,28) e a amostra com percentual de 30% m/m de fibra foi a que apresentou a maior temperatura (43,21). Os compósitos manifestaram o mesmo comportamento do ensaio anterior, porém com temperaturas um pouco mais altas. A análise ao longo da linha de perfil mostra clara diferença entre o material de referência e aquele com percentual mais alto de fibra (2,9 °C).

GRÁFICO 6 - Linhas de perfil após 90 minutos de insolação



O termograma da FIG. 61 mostra os resultados após 105 minutos de exposição solar. A análise visual do modelo também permite diferenciar as temperaturas entre as amostras com percentuais de fibra. Houve aproximação visual entre as amostras de 10 e 20% m/m, mas a de referência apresentou-se visivelmente com temperatura mais baixa.

FIGURA 61 - Termograma do material 3 após 105 minutos de insolação

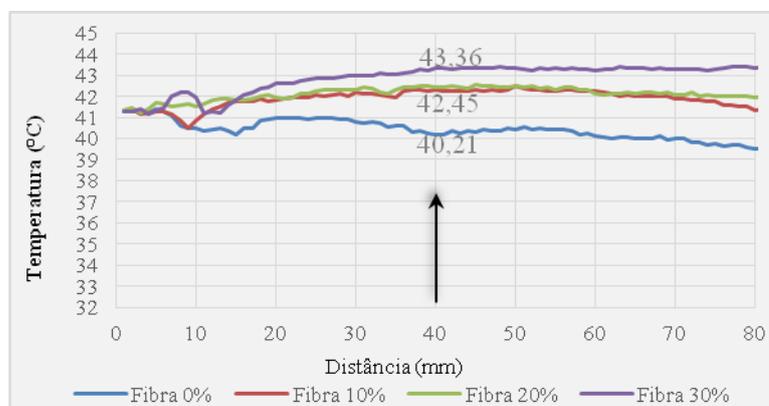


Fonte: do autor.

O GRÁF. 7 ressalta que a temperatura do centro do modelo permaneceu a mesma (41,4°C), a amostra de referência continuou com a menor temperatura (40,21°C) e a com percentual de 30% m/m de fibra apresentou a maior temperatura (43,36°C). As amostras com 10 e 20% m/m de fibra tiveram o mesmo comportamento anterior, ficando bem próximas as temperaturas - em torno de 42,45°C - e a uma distância considerável das outras duas amostras. A análise ao

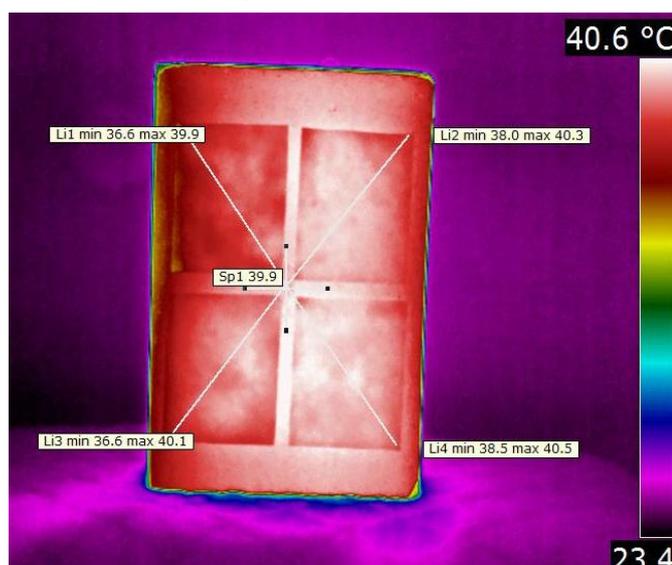
longo da linha de perfil revela que o comportamento das amostras se manteve estável nas últimas duas medições, porém com temperaturas mais elevadas.

GRÁFICO 7 - Linhas de perfil após 105 minutos de insolação



A amostra foi removida do ambiente externo para o laboratório e uma última leitura foi feita aos 125 minutos. Pela análise visual da FIG. 62 nota-se que o ambiente do laboratório teve temperatura mais estável e sem interferência de fontes externas, uma ligeira queda na temperatura superficial das amostras pode ser percebida.

FIGURA 62 - Termograma do material 3 após 125 minutos

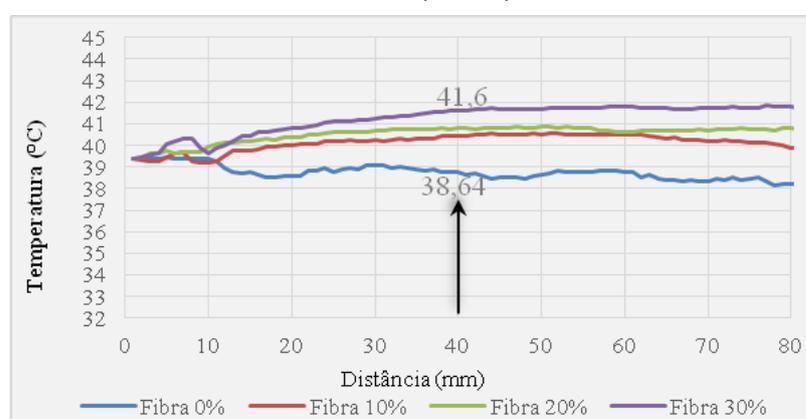


Fonte: do autor.

O GRÁF. 8 sugere um resfriamento do modelo de 1,5°C. A temperatura caiu de 41,4 para 39,9°C. A queda da temperatura atingiu todas as amostras e no

resfriamento elas se comportaram da mesma maneira, estáveis. A amostra de referência foi a que apresentou a menor temperatura (38,6°C) e a com mais alto percentual de fibra, a maior temperatura (41,6 °C). As amostras com percentual de 10 e 20 m/m tiveram durante todo o experimento um comportamento bastante similar, com temperaturas bem próximas e sempre entre as faixas de medição das duas outras amostras. Isso sugere que no resfriamento o material vai se comportar da mesma maneira: quanto mais alto o percentual de fibra no compósito, mais lentamente ele vai se resfriar.

GRÁFICO 8 - Linhas de perfil após 125 minutos



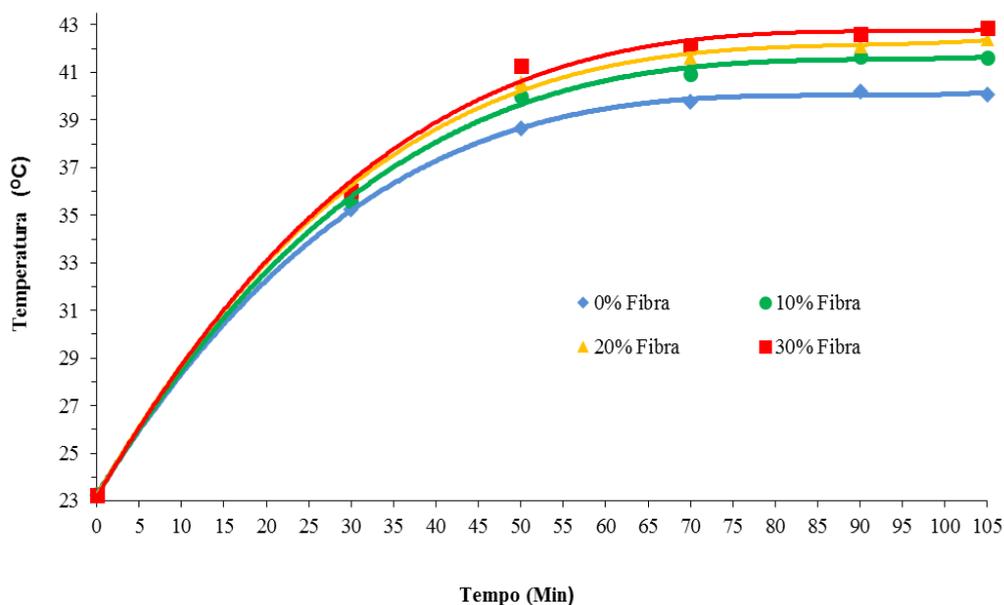
Larget, Breyse e Sirieix (2011), em estudo experimental com aquecimento natural, compararam as curvas do aquecimento do modelo experimental com modelagem numérica. O estudo comprova que a termografia infravermelha passiva foi sensível em detectar a influência da densidade, calor específico, condutividade térmica e coeficiente de difusividade daquele material. Após a análise das imagens termográficas e dos gráficos gerados pelo *software QuickReport* para obtenção das temperaturas em diferentes tempo de exposição, a TAB. 5 sumariza a média de temperatura obtida com a análise dos diferentes percentuais de fibra e ao longo do tempo (min) de aquecimento dos materiais.

TABELA 5 - Análise da temperatura por termografia (°C) em relação ao tempo e percentual de fibra

Percentual de Fibras	Tempo (Min)						
	0	30	50	70	90	105	125
0%	23,25°C	35,27°C	38,63°C	39,77°C	40,19°C	40,09°C	38,63°C
10%	23,26°C	35,61°C	39,98°C	40,94°C	41,65°C	41,62°C	39,98°C
20%	23,26°C	36,01°C	40,59°C	41,63°C	42,10°C	42,40°C	40,59°C
30%	23,23°C	36,02°C	41,27°C	42,10°C	42,60°C	42,87°C	41,27°C

Por meio desses dados foi elaborado o GRÁF. 9, no qual é possível ver a sua evolução em relação ao tempo e ao percentual de fibra. Nele são apresentadas as curvas de regressão polinomiais de ordem 3, ou seja, 3º grau. Essas curvas representam a aproximação matemática dos dados obtidos por meio do equacionamento das variáveis independentes (variáveis de estudo: porcentagem de fibra e tempo) e da variável dependente (variável de resposta: temperatura).

GRÁFICO 9 - Curvas de regressão polinomiais



Por esse processo, para os materiais desenvolvidos com 0, 10, 20 e 30% m/m de fibra obtiveram-se os coeficientes de determinação (R^2) de 0,997, 0,999, 0,999 e 0,999, respectivamente. Isso significa que mais de 997% da variável dependente, considerando o pior caso, conseguem ser explicados pelos regressores presentes nas curvas/equacionamentos desenvolvidos, o que, para Montgomery (2012), um coeficiente acima de 0,99 é estatisticamente uma excelente aproximação dos

dados. Assim, as equações (11), (12), (13) e (14) descrevem, respectivamente, os processos com 0, 10, 20 e 30% m/m de fibra, sendo "y" a temperatura (°C) e "x" o tempo (min).

$$y = 2E-05x^3 - 0,0065x^2 + 0,6173x + 23,15 \quad (11)$$

$$y = 2E-05x^3 - 0,0067x^2 + 0,6139x + 23,21 \quad (12)$$

$$y = 2E-05x^3 - 0,0063x^2 + 0,5866x + 23,23 \quad (13)$$

$$y = 2E-05x^3 - 0,0065x^2 + 0,5696x + 23,26 \quad (14)$$

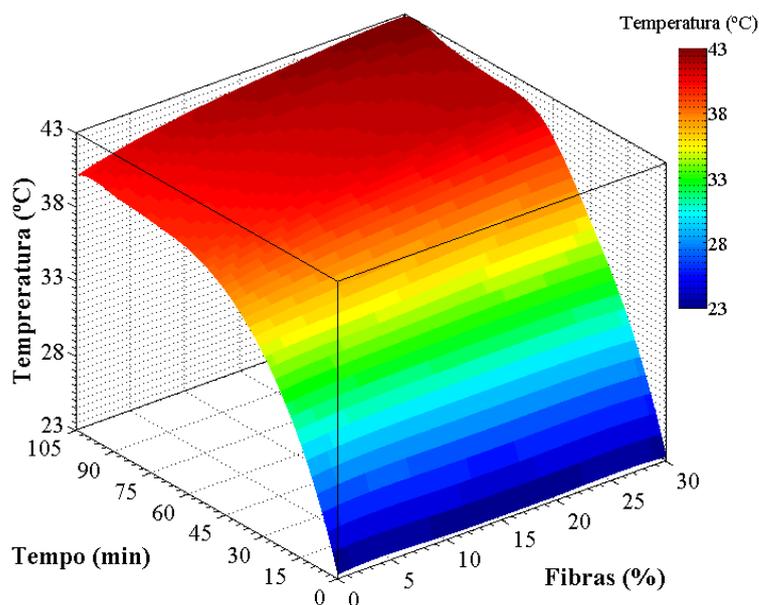
Assim, primeiramente pela análise da TAB. 5 e do GRÁF. 9, fica evidente a relação entre o percentual de fibra/ temperatura, em que o aumento da quantidade de fibra é proporcional à capacidade térmica ou capacidade calorífica do compósito. Ao mesmo tempo, com base nos dados já apresentados, foram desenvolvidos gráficos de superfície de resposta no *software Matlab 2011*. Neste estudo, esses gráficos tiveram como objetivo estimar valores das variáveis de resposta do processo, temperatura (°C), em função das variáveis de estudo fibras (%) e tempo (minuto) e, ainda, à visualização do comportamento e interações do material em estudo.

As FIG. 63 e 64 apresentam, respectivamente, a superfície de resposta tridimensional e o mapa de contorno bidimensional (topológico) para a temperatura em função do percentual de fibras e do tempo. Essas superfícies foram geradas utilizando-se os 24 dados da TAB. 5 como o modelo de interpolação polinomial de grau 3 implementado no *software Matlab 2011* e obtiveram coeficiente de determinação (R^2): 0,9988; e para teste um *Mean Squared Error* (SSE): 1.237. No trabalho correlacionado de Sousa *et al.* (2012) foi apresentado um estudo em que a estimativa dos fluxos de calor na superfície de um modelo foi avaliado a partir de termografia e demonstrado por simulação numérica e experimental.

Analisando a FIG. 63, fica evidente que quanto mais alto o percentual de fibra e o tempo de exposição do modelo à insolação, maior é a temperatura obtida. Ao mesmo tempo, destaca-se que a partir de 75 minutos o percentual de fibra tem

grande influência sobre a temperatura do modelo, representada por uma maior inclinação da superfície.

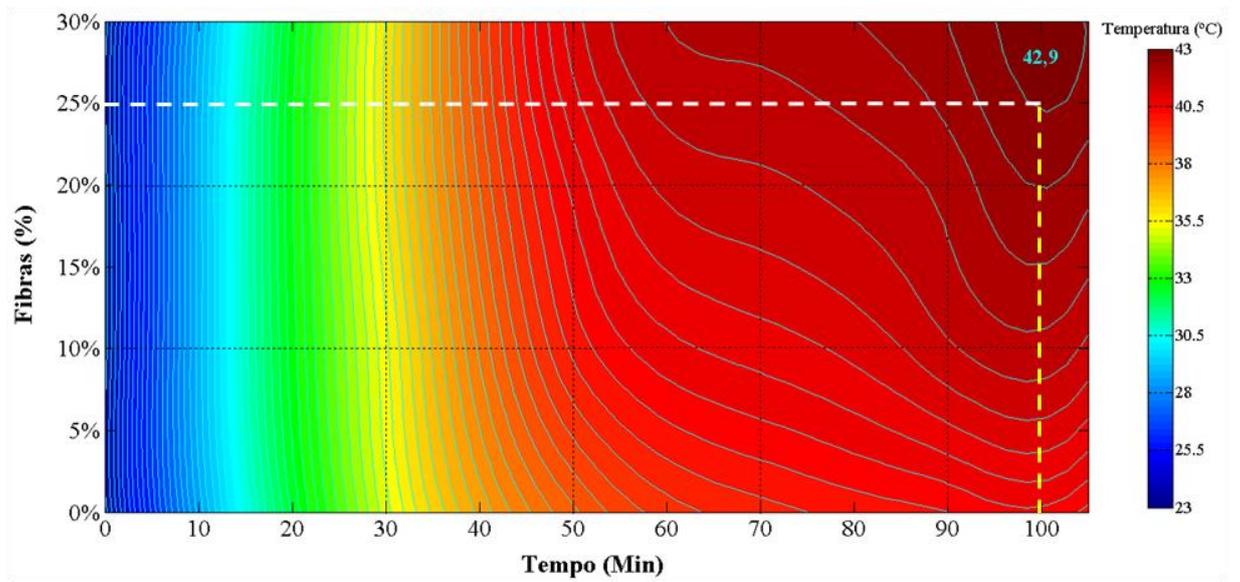
FIGURA 63 - Superfície de resposta temperatura em função do percentual de fibras e tempo



Fonte: do autor.

Ao mesmo tempo, analisando o mapa da FIG. 64, que possui curvas de nível com divisões de 0,3 graus Celsius ($0,3^{\circ}\text{C}$), observa-se o sentido do eixo "x" (tempo), que até 25 minutos de insolação direta o percentual de fibra não influi em ganho significativo de temperatura (capacidade calorífica do compósito), representado por linhas praticamente verticais e paralelas. No intervalo de 25-50 minutos inicia-se um ganho de temperatura em função da quantidade de fibra. A partir de 50 minutos fica destacado o ganho de temperatura representado no mapa por curvas de nível bem definidas e crescentes no sentido de "y" (% de fibras) e que a temperatura máxima obtida pelos modelos com o mínimo de fibra encontra-se em aproximadamente 101 minutos (linha amarela) com 25% de fibra (linha branca). Em outro trabalho correlacionado realizado por Noethena, Jiab e Meyendorf (2012) também é demonstrado por simulação de elementos finitos o processo de detecção de fissuras de superfície, utilizando-se a termografia ativa e aquecimento por corrente de alta intensidade. Os resultados mostram boa correlação com as medições feitas com uma câmara de infravermelhos.

FIGURA 64 - Mapa de temperatura em função do percentual de fibras e tempo



Fonte: do autor.

5 CONCLUSÃO

Os compósitos baseados em polietileno e fibra curauá desenvolvidos mostraram potencial para serem usados como revestimento térmico em edificações, pois apresentam elevada resistência térmica, hidrofobicidade controlada com o teor de fibra e bom desempenho na resistência térmica, que também é passível de ser controlada variando-se o teor de fibra incorporado. Em adição, esse material apresenta integridade física e pode ser submetido a diferentes tipos de processamento, podendo ser facilmente conformado.

A termografia infravermelha é uma técnica nova e ainda pouco difundida no Brasil, especialmente na área do *design*. No entanto, ela apresenta potencial para aplicações em análises térmicas de elementos construtivos da edificação.

A utilização do equipamento requer conhecimentos específicos tanto do material a ser analisado quanto das variáveis de entrada, em especial a emissividade e a temperatura refletida, que podem interferir de forma significativa nos resultados. Variações desses parâmetros podem exibir diferenças de leitura acima de 77,5°C.

Outro parâmetro de influência nos resultados foi o tipo de estimulação utilizado. O método passivo por insolação natural proporcionou melhores condições de análise do que o método ativo por estimulação elétrica. No primeiro caso, as temperaturas de 25,3°C saturaram as amostras de compósito com fibra (FIG. 42), enquanto na estimulação passiva isso ocorreu com temperatura de 41,4°C (GRÁF. 6).

O aumento da quantidade de fibra é proporcional à capacidade térmica ou capacidade calorífica do compósito. O aumento da temperatura nas amostras com 10 e 20% m/m de fibra foi em torno de 2°C, sendo que no compósito com 30% m/m o ganho foi de 3,15°C.

As análises feitas pelas curvas de regressão polinomiais e pelos gráficos de superfície de resposta possibilitaram melhor visualização dos resultados,

mostrando que a partir de 25 minutos a capacidade calorífica do compósito é influenciada diretamente pelo percentual de fibras existentes, promovendo significativos ganhos na temperatura. Ainda, quando comparadas as respostas apresentadas nas FIG. 63 e 64 com o GRÁF. 9 evidencia-se a grande representatividade dos mesmos, podendo, assim, por meio deles, inferir valores de temperatura em porcentagens intermediárias de fibras (0-30%) e/ou em faixas intermediárias de tempo (0-105 minutos).

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas análises obtidas dos experimentos, são sugeridos os seguintes temas para trabalhos futuros:

- a) Estudo da degradabilidade de compósitos poliméricos com fibra natural de curauá.
- b) Influência térmica da cor em compósitos poliméricos com fibra natural de curauá.
- c) Análise térmica de compósitos poliméricos com fibras vegetais de curauá em ambiente de resfriamento.
- d) Análise comparativa das características térmicas e mecânicas de compósitos utilizando-se diferentes tipos de polímeros.
- e) Desenvolvimento de placas de compósito polimérico com fibra de curauá para avaliação do conforto térmico em ambientes.
- f) Verificação da influência de diversos ciclos de aquecimento e resfriamento no material desenvolvido para avaliar fatores como a degradação e conforto térmico.

REFERÊNCIAS

ABENDI. Associação Brasileira de Ensaio não Destrutivos e Inspeção. Disponível em: <http://www.abendi.org.br/>. Acesso em: 04/09/2012.

ALBINATE, S.R.; PACHECO, E.B.A.V.; VISCONTE, L.L.Y. Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para misturas com poliolefinas. **Química Nova**, v. 36, 2013.

AGUILAR, M.T.P. *et al.* Estudo do desenvolvimento de argamassas de revestimento Fabricadas com Sílica ativa e escória. **Revista Metalurgia & Materiais**, v. 59, n. 534, jun 2003.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idarea=493>. Acesso em: 24/05/2013.

AQUINO, E.M.F. *et al.* Moisture effect on degradation of jute/glass hybrid composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 26, n. 2, 2007.

ARAÚJO, Carla R. de; MOTHÉ, Cheila Gonçalves. Caracterização térmica e mecânica de compósitos de poliuretano com fibras de curauá. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, UFRJ, v. 14, n. 4, p. 274-278, 2004.

ASHRAE. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers. 1994. Disponível em: www.ashrae.org. Acesso em: 26/05/11.

AVDELIDIS, N.P.; MOROPOULOU, A. Emissivity considerations in building thermography. **Energy and Buildings**, v. 35, p. 663-667, 2003.

BALARAS, C.A.; ARGIRIOU, A.A. Infrared thermography for building diagnostics. **Energy and Buildings**, v. 34, p. 171-183, 2002.

BARBOSA, M.J.; LAMBERTS, R. Uma metodologia para especificar e avaliar o desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares, aplicada a Londrina – PR. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 2, p. 15-18, 2002.

BARREIRA, E.S.B.M. **Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higratérmico de edifícios**. 2004. 196f. Dissertação (Mestrado em construção de edifícios) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto-PT.

BATIZ, E.C. *et al.* Avaliação do conforto térmico no aprendizado: estudo de caso sobre influência na atenção e memória. **Produção**, v. 19, n. 3, p. 477-488, set./dez. 2009.

BLEDZKI, A.K.; GASSAN, J. Composite reinforced with cellulose based fibers. **Prog Polym Sci**, v. 24, p. 200-272, 1999.

BRITO, G.F. *et al.* Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 6.2, p. 127-139, 2011. ISSN 1809-8797.

CALLISTER JR., W.D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. Belo Horizonte: LTC, 2007.

CALLISTER, W.D. **Fundamentals of materials science and engineering**: an integrated approach. 2. ed., Jonh Wiley & Sons, Inc., pp. 124, 2005.

CAMILOTI, L.; LUZ, N.; PISETTA, R. Experiência de consumo: as sensações no processo de compra no ponto de venda físico e no ponto de venda virtual. **UNOESC & Ciência – ACSA**, Joaçaba, v. 2, n. 1, p. 59-66, jan./jun. 2011.

CANTO, E.L. **Plástico**: bem supérfluo ou mal necessário? São Paulo–SP: Moderna, 1995.

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

CASTANEDO, C. *et al.* Active infrared thermography techniques for the nondestructive testing of materials. *In*: CHEN, C.H. **Ultrasonic and advanced methods for nondestructive testing and material characterization**. World Scientific Publishing, 2007.

CASTANEDO, C.I.; MALDAGUE X. **Defect depth retrieval from pulsed phase thermographic data on plexiglas and aluminum samples**. *Thermosense XXVI*, v. 5405, Society of Photo-optical instrumentation engineers, 2004.

CASTANEDO, C.I. **Quantitative subsurface defect valuation by pulsed phase thermography**: Depth retrieval with the phase. These (obtention grade de Philosophiae Doctor Ph.D.). Faculté des Sciences et de Génie Université Laval – Québec, Oct 2005.

CASTRO, D.O.; RULOVO FILHO, F.A.; FROLLINI, E. Biopolietileno de alta densidade reforçado por fibras de curauá. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS 10°, **Anais...** CBPol, 2012.

CERCLÉ, C.; SARAZIN, P.; FAVIS, B.D. **High performance polyethylene/thermoplastic starch blends through controlled emulsification phenomena**: carbohydrate polymers. São Paulo: Elsevier, 2013.

CHÁVEZ, C.R.A. *et al.* Sustainability of bio-based plastics: general comparative analysis and recommendations for improvement. **Journal of Cleaner Production**, 2012.

CHRYSOCHOOS, A. Infrared thermography applied to the analysis of material behavior: a brief overview. **Quantitative Infrared Thermography Journal**, v. 9, n. 2, p. 193-208, 2012.

CLARK, M.R.; McCANN, M.C.; FORDE, M.C. Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. **NDT&E International**, v. 36, p. 265–275, 2003.

CONCEIÇÃO, Z.E.; LÚCIO, M.M.J.R. Evaluation of thermal comfort conditions in a classroom equipped with radiant cooling systems and subjected to uniform convective environment. **Applied Mathematical Modelling**, v. 35, p. 1292-1305, 2011.

CORDEIRO, I.M.C.C. *et al.* Economical analysis of cultivation systems with *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby (Parica) and *Ananas comosus* var. *erectifolius* (L.B. Smith) Coppus & Leal (Curaua) crop at Aurora Para. **Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia**, v. 26, n. 2, pp. 243-265, 2009.

CORTIZO, E.C. **Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações**: ênfase em edificações do patrimônio histórico. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

COUTINHO, F.M.B.; MELLO, I.L.; SANTA MARIA, L.C. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 13, 2003.

DALTRO, N.R. **Desenvolvimento de um laminado compósito híbrido a base de fibras de vidro/licurí**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2011.

DE MORAES, D. **Metaprojeto**: o design do design. São Paulo: Blucher, 2010. 228 p.

DE PAOLI, M.A. *et al.* Efeito da forma de processamento e do tratamento da fibra de curauá nas propriedades de compósitos com poliamida-6. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, UNICAMP, v. 19, n. 1, p. 31-39, 2009.

DOEBELIN, E.O. **Measurement systems**: application and design. 4. ed. Singapore: McGraw-Hill, 1990.

ELETOBRAS. Centrais Elétricas Brasileiras. Disponível em: <http://www.eletobras.com/elb/procel/main.asp?TeamID=%7B32B00ABC-E2F7-46E6-A325-1C929B14269F%7D>. Acesso em: 24/05/13.

FANGER, P.O. Human requirement in future air-conditioned environments. **International Journal of Refrigeration**, v. 24, 2001.

FAO. Food and Agriculture Organization **A produção de fibras no mundo**. Disponível em: www.fao.org. Acesso em: 25/05/11.

FARIAS FILHO, J.; TOLEDO FILHO, R.D.; LIMA, P.R.L. Efeito da argila calcinada sobre a durabilidade de argamassas reforçadas com fibras curtas de sisal. **Rev Bras Eng Agric Ambient** [on-line]. v. 14, n. 10, pp. 1109-1114, 2010. ISSN 1807-1929.

FERREIRA, V.F.; ROCHA, D.R. Potencialidades e oportunidades na química da sacarose e outros açúcares. **Química Nova**, v. XY, n. 00, p. 1-16, 2009.

FORD E.T.L.C. *et al.* Gradiente de temperatura em um compósito de fibra do coco-latex. *In: 8º CONGRESSO IBERO AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA. Anais...*, Cusco, 2007.

FORTY, A. **Objetos de desejo: design e sociedade desde 1750**. Cosac 2007.

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

GIVONI, B. **Climate considerations in building and urban design**. Nova York: John Wiley Professio, 1998.

GOMES, A. *et al.* Development and effect of alkali treatment on tensile properties of curaua fiber green composites. *Composites Part A. Applied Science and Manufacturing*, v. 38, p. 8, pp. 1811-1820, 2007.

GRINZATO, E.; VAVILOV, V.; KAUPPINEM, T. Quantitative infrared thermography in buildings. **Energy and Buildings**, v. 29, p. 1-9, 1998.

GUERRERO, I.C.; OCAÑA, S.M.; REQUENA, I.G. Thermal - physical aspects of materials used for the construction of rural buildings in Soria (Spain). **Construction and Buildings Materials**, v. 19, p. 197-211, 2005.

HELLIER C.J. **Handbook of nondestructive evaluation**. The McGraw-Hill Companies, 2003

HOAREAU, W. *et al.* Sugar cane bagasse and curaua lignins oxidized by chlorine dioxide and reacted with furfuryl alcohol: Characterization and stability. **Polymer Degradation and Stability**, v. 86, p. 567-576, 2005.

HOLST, G.C. **Common sense approach to thermal imaging. spie optical engineering press**. A Publication of Spie. The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington USA, 2000.

HUANG, X.; NETRAVALI, A. **Biodegradable green composites made using bamboo micro/nano-fibrils and chemically modified soy protein resin**. *Composites Science and Technology*. São Paulo: Elsevier, 2009.

HUDSON, R.D. **Infrared systems engineering**. Pure & Applied Optics. New York, John Wiley & Sons, 2006.

HUGHES, M. The economics and marketpotential for low environmental impact polymers *In*: TUCKER, N.; JOHNSON, M. (ed.). **Low environmental impact polymers**. Rapra Technology, Shawbury, p. 80, 2004.

IMRE, B.; PUKÁNSZKY, B. Compatibilization in bio-based and biodegradable **polymer blends**. Special Section. **European Polymer Journal**, v. 49, p. 1215-1233, 2013.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2008. 643 p.

IPAAM. Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia. Disponível em: <http://www.ipam.org.br>. Acesso em: 25/05/11.

ISO. International Standardization Organization. **ISO 7730**: moderate thermal environments – determination of the PMV and PD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Switzerland: ISO, 1994.

IST. Instituto Superior Tecnológico, Lisboa, Portugal. **Termogafria Infravermelha**. Disponível em: <http://www.ist.utl.pt>. Acesso em: 25/06/13.

KNUPP, D.C. *et al.* Space-variable thermophysical properties identification in nanocomposites via integral transforms, Bayesian inference and infrared thermography. **Inverse Problems in Science and Engineering**, v. 20, n. 5, p. 609-637, July 2012.

KREITH, F. **Princípios de transmissão de calor**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

KRÜGER, E.L. A importância do conhecimento de térmica em edificações por engenheiros civis. **Revista Tecnologia e Humanismo**, Curitiba, n. 19, p. 18-21, ago. 1999.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW - PROCEL, 1997.

LAMBERTS, R. *et al.* **Desempenho térmico de edificações**. Florianópolis, 2007. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br>. Acesso em: julho de 2012.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PAPST, A.L. **Desempenho térmico das edificações**. Laboratório de eficiência energética em edificações, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A.A.P.; GOULART, S. **Conforto e stress térmico**. Florianópolis, 2002. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br>. Acesso em: julho de 2012.

LANA, S.L.B.; LAGE, A.C.A. Creative people: the key of the innovation process. *In*: XXIV WORLD CONFERENCE, **Anais...**, Barcelona, 2007.

LARBI YOUCEF, M.H.A. *et al.* Quantitative diagnosis of insulated building walls of restored old constructions using active infrared thermography. **Quantitative Infrared Thermography Journal**, v. 8, n. 2, p. 65-87, 2011.

LARGET, M.; BREYSSE, D.; SIRIEIX, C. Characterisation of geometrical properties of concrete using passive infrared thermography. **European Journal of Environmental and Civil Engineering EJECE**, v. 15, n. 5, p. 759-772, 2011.

LEDO, I.A.M. **O cultivo do curauá no Lago Grande de Franca**. Banco da Amazônia, Belém, 1967.

LEGA, M. *et al.* Using advanced aerial platforms and infrared thermography to track environmental contamination. **Environmental Forensics**, v. 13, n. 4, p. 332-338, 2012.

LEITE, P.G. **Curso de ensaios não destrutivos de metais**. Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 1966.

LEVY NETO, F.L.; PARDINI, L.C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

MALDAGUE, X.P. Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation, trends in optical nondestructive testing. *In*: PRAMOD, R. (ed.). **Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography**. Editora Springer. pp. 591-609, 2000.

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

MALHOTRA V.M.; SIVASUNDARAM, V. Resonance frequency methods. *In*: **CRC handbook on nondestructive testing of concrete**. 1 ed. Chapter 6, Boston, USA, CRC Pres, 1991.

MANO, E.B. *et al.* Polyolefin composites with curaua fibers: effect of the processing conditions on mechanical properties, morphology and fibers dimensions. **Composites Science and Technology**, v. 70, pp. 29-35, 2010.

MANO, E.B. **Polímeros**. São Paulo-SP: Edgard Blücher, 1985.

MARCONI, M.A.; LAKATOS, E.M. **Metodologia de trabalho científico**. 6. ed., São Paulo: Atlas, 2001.

MARTINS, G.S. *et al.* Caracterização mecânica e térmica de compósitos de poli (cloreto de vinila) reforçados com fibras de sisal. **Polímeros**, v. 14, n. 5, pp. 326-333, 2004. ISSN 0104-1428.

MATTOSO, L.H.C. *et al.* Produção e informação. *In*: SILVA, O.R.R.F.; BELTRÃO, N.E.D.M. (org.). **O agronegócio do sisal no Brasil**. 1. ed. Brasília: EMBRAPA, p.161, 1999.

MENDONÇA, L.V. Termografia por infravermelho: inspeção de betão. **Revista Engenharia e Vida**, n. 16, p. 53-57, 2005.

MEOLA, C. *et al.* Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures. **Engineering Failure Analysis**, v. 12, p. 875-892, 2005.

MISHRA, S. *et al.* Studies on mechanical performance of biofibre/glass reinforced polyester hybrid composites. **Composites Science and Technology**, v. 63, n. 10, pp. 1377-1385, 2003.

MONTEIRO, S.N.; AQUINO, R.C.M.P.; LOPES, F.P.D. Performance of curauá fibers in pullout tests. **Journal of Materials Science**, v. 43, pp. 489-493, 2008.

MONTGOMERY, D.C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 5. ed., São Paulo: LTC, 2012.

MORTAZAVI, S.; GHASEMI, I.; OROMIEHIE, A. **Effect of phase inversion on the physical and mechanical properties of low density polyethylene/thermoplastic starch**. Polymer Testing. São Paulo: Elsevier, 2013.

NEIRA, D.S.M. **Fibra de sisal (agave sisalana) como isolante térmico de tubulações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.

NOETHENA, M.; JIAY, Y.; MEYENDORF, N. Simulation of the surface crack detection using inductive heated thermography. **Nondestructive Testing and Evaluation**, v. 27, n. 2, p. 139-149, June 2012.

NOGUEIRA, M.; NOGUEIRA, J.S. Educação, meio ambiente e conforto térmico: caminhos que se cruzam. **Rev Eletrônica Mestr Educ Ambient**, v. 10, p. 1517-1256, 2003.

OLIVEIRA, C.A. **Termografia**: exame sem dor e não invasivo. Disponível em: <http://www.mundosemdor.com.br/termografia-%E2%80%93-exame-100-seguro-nao-tem-dor-e-nao-e-invasiva/>. Acesso em: 2012.

PAPPALETTERE, C. **Corso di Meccanica Sperimentale Seminario sulla: Termografia**. Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Gestionale, Bari, Itália. 2004.

PEDRA, S.A. **Potencialidades da termografia infravermelha aplicada ao design do conforto térmico de alvenaria estrutural**. Dissertação para Conclusão de Mestrado. Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG. Belo Horizonte, 2011.

RANTALA, J. *et al.* **Lock-in thermography with mechanical loss angle heating at ultrasonic frequencies**: quantitative Infrared Thermography. Eurotherm Series 50 Edizione ETS, Pisa, p. 389-393, 1997.

RANTALA, J.; WU, D.; BUSSE, G. Amplitude modulated lock-in vibrothermography for nde of polymers and composites. **Research in Nondestructive Evaluation**, v. 7, pp. 215-218, 1996.

RODRIGUES, L.P.S.; SILVA, R.V.; AQUINO, E.M.F. Accelerated environmental aging in hybrid composite with synthetic and natural fibers. *In*: **COBEM – International Congress of Mechanical Engineering**, 20. ed., Gramado-RS, Proceedings, ABCM, 2009.

ROGALSKI, A. Infrared detectors: na overview. *Infrared Physics & Technology. Journal of Alloys and Compounds*, v. 371, 2004.

ROSA, D.S.; PANTANO FILHO, R. **Biodegradação**: um ensaio com polímeros. Itatiba-SP: Moara, 2003.

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

SALES, R.B.C. *et al.* Concrete study using infrared thermography and forced resonant frequency. **Advanced Materials Research**, v. 168-170, p. 778-786, 2011.

SATYANARAYANA, K.G.; ARIZAGA, G.G.C.; WYPYCH, F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers: an overview. **Progress in Polymer Science**, v. 34, p. 982-1021, 2009.

SATYANARAYANA, K.G.; GUIMARÃES, J.L.; WYPYCH, F. *In*: SHEPARD, S.M.; AHMED T.; LHOTA, J.R. **Experimental considerations in vibrothermography**: thermal wave imaging. 845 Livernois, Ferndale, MI 48220. Orlando, v. 12-16, April 2007.

SILVA, E.; MARQUES, M.; FORNARI JÚNIOR, C. Aplicação de fibra de coco em matrizes cimentícias. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 8, p. 1555-1561. 2012.

SILVA, H.S.P. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras de curauá e híbridos com fibras de vidro**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM. Porto Alegre 2010.

SILVA, R.C.; SANTANA, A.C. Configuração da cadeia produtiva do curauá. *In*: 1º SIMPÓSIO DE CADEIAS PRODUTIVAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NA AMAZÔNIA; 9º SEMINÁRIO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA; 3º SEMINÁRIO DE PESQUISA DA UFRA - 19 a 21 de outubro de 2011, **Anais...**, Belém, PA, 2011.

SILVA, R.V.; AQUINO, E.M.F. Curaua fiber: A new alternative to polymeric composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 27, n. 1, pp. 103-112, 2008.

SIMANKE, G.A.; LEMOS, C.; PIRES, M. **Linear low density polyethylene: Microstructure and sealing properties correlation**. Polymer Testing. São Paulo: Elsevier, 2013.

SINGH, B. *et al.* Studies on polymer composites based on sisal polyester and glass modified sisal fibers, filler and unsaturated polyester resin. **Research and Industry**, v. 39, n. 1, pp. 38-42, 1994.

SNELL Jr., J.R.; SPRING, R. W. **Infrared thermography advances**: thermal NDT methods have continued to evolve with the advancements in thermal imaging and image processing. October 2, 2007. NDT Magazine. Disponível em: <http://www.ndtmag.com/Articles>. Acesso em: setembro de 2013.

SOUSA, J.F.L. *et al.* Three-dimensional (3D) inverse heat flux evaluation based on infrared Thermography. **Quantitative InfraRed Thermography**, v. 9, n. 2, p. 177-191, Dec. 2012.

SPINACÉ, M.A.S. *et al.* Characterization of lignocellulosic curua fibres. **Carbohydrate Polymers**, v. 77, pp. 47-53, 2009.

SPINACÉ, M.A.S. *et al.* Poliolefinas reforçadas com fibras vegetais curtas: sisal vs. curauá. **Polímeros**, v. 21, n. 3, p. 168-174, 2011.

TAGHIZADEH, A.; FAVIS, B. D. **Effect of high molecular weight plasticizers on the gelatinization of starch under static and shear conditions**: carbohydrate polymers. São Paulo: Elsevier, 2013

TARPANI, J.R. *et al.* Inspeção termográfica de danos por impacto em laminados de matriz polimérica reforçados por fibras de carbono. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, 2009.

TAVARES, S.G.; CUNHA, A.M.; ANDRADE, R.M. Ensaio térmico não destrutivo para avaliação de defeitos e inclusões não aparentes em materiais. *In*: 7º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECÂNICA, México D. F., 12 al 14 de Outubro, 2005, **Anais...**, México, 2005.

TAVARES, S.G. **Desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

TITMAN, D.J. Applications of thermography in non-destructive testing of structures. **NDT&E International**, v. 34, p. 149-154, 2001.

TOMCZAK, F. **Estudos sobre as propriedades de fibras de coco e curauá no Brasil**. Tese de Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Federal do Paraná, 2010.

TOMCZAK, F.; SATYANARAYANA, K.G.; SYDENSTRICKER, D.T.H. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil: Part III - morphology and properties of Brazilian curaua fibers. *Composites Part A. Applied Science and Manufacturing*, v. 38, n. 10, pp. 2227-2236, 2007.

VERATTI, A.B. **A revolução infravermelha.** Disponível em: www.termonautas.com.br/art21.asp. Acesso em: maio 2007.

WEIL, G.J. Infrared thermographic techniques. *In: MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. CRC handbook on nondestructive testing of concrete*, 1 ed. Chapter 13, Boston, USA, CRC Pres,1991.

WIGGENHAUSER, H. Active IR-applications in civil engineering. **Infrared Physics & Technology**, v. 43, p. 233-238, 2002.

XAVIER, A.A.P.; LAMBERTS, R. Proposta de zona de conforto térmico obtida a partir de estudos de campo em Florianópolis. *In: V ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E II ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, Fortaleza, 1999, **Anais...**, Fortaleza, 1999.

ZAH, R. *et al.* Curaua fibers in the automobile industry - A sustainability assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 11-12, p. 1032-1040, 2007.

ZYLBERMAN, A. **Consumo eficiente de energia e água e ciclo de vida dos edifícios terão de passar a ser o “novo normal” para o setor de construção.** IBEF NEWS, abril 2012. Disponível em: <http://www.ibef.com.br/ibefnews/pdfs/166/sustentabilidade.pdf>. Acesso em: julho 2012.

